Apresentação

Bem-vindo ou bem-vinda! Este é o seu segundo volume do **curso de Física**! Apresentamos os principais conceitos estudados em Física. A maioria deles aparece em situações que podem ser observadas no seu dia-a-dia, em casa, na rua, no trabalho, no céu...

Com isso, buscamos mostrar a você que os fenômenos físicos ocorrem em **todo lugar e a todo momento**, e que os conhecimentos da Física estão acessíveis a todas as pessoas que têm curiosidade em relação a eles, mesmo as pessoas que estejam fora das universidades ou dos laboratórios científicos.

Essa maneira de expor idéias - por meio de situações comuns, observando o que ocorre ao nosso redor - facilita a compreensão dos conceitos científicos, muitas vezes abstratos, e ajuda a explicar os mais diversos fenômenos que ocorrem na natureza.

Seu livro de Física está dividido em dois volumes. No primeiro, você aprende um pouco mais sobre os fenômenos físicos e de que modo essa ciência estuda tais fenômenos. Observar fenômenos relacionados aos **movimentos**, analisa **forças**, verifica que existem diferentes formas de **energia** na natureza, descobre fenômenos que ocorrem, por exemplo, quando mergulhamos objetos em líquidos, e muitas outras questões. Nesta parte da Física, a maioria dos fenômenos estudados são **macroscópicos**, isto é, são visíveis para todos nós.

No segundo volume, você aprende mais coisas sobre o **calor** e a **temperatura**, sobre o **som**, sobre a **luz** e como ela se comporta, e estuda fenômenos relacionados à **eletricidade**. Além disso, vê alguns temas de **Física Moderna**, como a tão falada **Física Nuclear**. Nessa parte, você estuda a interpretação **microscópica** dos fenômenos, isto é, interpretação daquilo que não é diretamente observado a olho nu.

Os livros estão organizados da seguinte maneira.

Cada aula abre com a seção **Para começar**. Ali você vai encontar uma introdução ao principal assunto tratado na aula. Apresentamos uma situação, ou uma pergunta, relacionada aos conceitos que serão discutidos.

A aula, propriamente dita, tem início na seção **Fique ligado**. Aí é bom ficar bem atento, pois serão discutidos e explicados os conceitos novos.

Outras duas seções vão aparecer com freqüência:

Com a mão na massa, na qual sugerimos atividades ou exercícios para serem feitos no decorrer da aula.

Passo-a-passo, em que apresentamos exemplos ou exercícios resolvidos detalhadamente.

No final da aula existem mais duas seções importantes:

Para terminar, na qual apresentamos, de forma reduzida, os principais conceitos discutidos.

Finalmente, na seção **Mãos à obra**, você vai encontrar alguns exercícios que vão ajudar a fortalecer seus estudos.

Esperamos que, a partir deste estudo, você, caro aluno ou cara aluna, passe a observar de outra forma a natureza que o[a] cerca, e mais do que isso, saiba que a ciência é uma maneira mais organizada de estudar o que acontece na natureza, e que o conhecimento - que vem sendo acumulado durante séculos e milênios - é fruto da curiosidade de várias gerações de homens e de mulheres.

Compreendendo melhor a ciência, é possível observar o mundo com outros olhos, com os olhos não apenas de um simples observador, mas de um cidadão ou de uma cidadã que compreende muitas coisas e que pode participar da construção das transformações que ocorrem no mundo de hoje e na nossa sociedade!

Desejamos a você bons estudos!

AUTORIA
Alberto Gaspar
Cristiano Rodrigues de Mattos - coordenador
Ernst W. Hamburger - supervisor
Norberto Cardoso Ferreira
Roberta Simonetti

APOIO
Universidade de São Paulo

AULA

1

O mundo da Física

PARA COMEÇAR

A curiosidade do homem pode ser compreendida de várias maneiras: alguns dizem que vem de uma necessidade de sobrevivência, outros dizem que é uma forma de prazer ou, ainda, no pensamento religioso, que é uma forma de conhecer a Deus. Mas uma coisa não podemos negar: **o homem é curioso!**

- Por que as coisas caem?
- O Sol é uma bola de fogo?
- A Terra está parada? E a Lua, como ela fica lá em cima?
- Quando começou o tempo?
- Como surge o pensamento?
- Como surgiu a vida? Existe vida depois da morte?

Essas são perguntas que o homem vem se fazendo há muito tempo. Algumas sabemos responder, outras não. Algumas têm mais de uma resposta, a diferença está no método usado para respondê-las.

Alguns métodos permitem conhecer o mundo que nos cerca, outros nos levam a ilusões sobre este mundo. Observe estes casos:

HORÓSCOPO:

"A Lua **energiza** seu signo apesar de estar em **fase** com saturno com o qual apresenta **tensão**. Você deve aproveitar as **vibrações** de mercúrio que completa hoje seu **ciclo**. Assim, curta hoje os seus amigos. Número de sorte 23."

ESPELHO, ESPELHO MEU... VOCÊ SABIA?

"Para vermos inteiramente nosso rosto num espelho plano é suficiente que ele tenha metade do tamanho (altura) do rosto. Tente observar este fato."

Os trechos escritos nos quadros acima poderiam ser encontrados num jornal ou falados pela televisão. Freqüentemente encontramos frases que propõem, sugerem, ou mesmo ordenam que façamos, ou não façamos, certas coisas: "Não fume no elevador. Lei Municipal número tal".

Essa afirmação tenta nos dizer que se fumarmos no elevador estaremos sujeitos às penas da tal lei. Voltemos aos quadros.

O primeiro nos diz algumas coisas a respeito da situação dos astros em que podemos, ou não, acreditar. Mais ainda, nos fala para "curtir" os nossos amigos, o que é bom, e, indiretamente, propõe que joguemos no número 23. Dentro do quadro encontramos palavras que parecem científicas: **energizar**, **vibração**, **tensão**, **fase**. O texto usa essa linguagem para tentar nos convencer de que tudo que foi escrito é verdade. Mas os horóscopos são produtos da Astrologia que não é uma ciência. Suas definições não são exatas e variam de astrólogo para astrólogo. Na verdade o que foi dito é a **opinião** de quem fez o horóscopo e o astrólogo pode, ou não, acertar as suas previsões.

No segundo quadro estamos no campo da ciência. Ele procura nos descrever um **fato**. Se uma pessoa, em qualquer lugar do mundo, seguir as instruções e se olhar num espelho que tenha, pelo menos, metade da altura do seu rosto, conseguirá ver o rosto por inteiro. Não estamos mais diante de uma **opinião**, mas sim de um **fato, que pode ser verificado.**

Devemos ouvir o que as pessoas têm a dizer, porém devemos ser capazes de julgar o que foi dito. Não é porque "saiu no jornal" ou "deu na tv" que é verdade! Por outro lado, devemos ter cuidado, pois julgar não é discordar de tudo, o importante é **fazer perguntas**, é **ter curiosidade** e ir em busca dos fatos e suas explicações. A ciência e seus métodos podem nos ajudar a responder muitas perguntas, a tomar posições e a fazer julgamentos.

Uma questão de método

Fique ligado

A ciência é uma forma de olhar o mundo, mas não é a única.

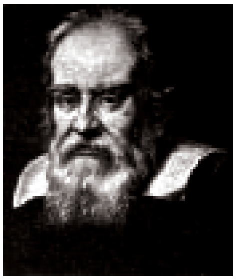
Muitas pessoas imaginam que as perguntas religiosas estão completamente separadas das perguntas científicas, mas isso nem sempre é verdade. Por exemplo, Isaac Newton, quando criou o conceito de **força**, queria evidenciar a ação de Deus no mundo: suas perguntas eram religiosas e se confundiam com as científicas.

O método científico tem permitido à humanidade construir conhecimentos sobre o mundo, propiciando compreender e controlar a natureza em alguns aspectos.

O método científico busca uma verificação dos fenômenos por meio de observações e experiências (fatos), ou seja, busca na natureza a resposta para suas perguntas e a confirmação de suas **hipóteses** (opiniões baseadas em fatos).

Por exemplo, uma pergunta que vem sendo feita desde a Antigüidade se refere à **queda dos corpos**: um corpo pesado e um leve, soltos ao mesmo tempo e de uma mesma altura, chegam juntos ao chão?

Várias pessoas deram soluções para essa pergunta. Os gregos antigos achavam que o **lugar natural** das coisas pesadas era o solo, por isso caem, sendo que as de maior peso chegam primeiro. Assim como as coisas leves sobem para o céu, lugar natural do que é leve, como o fogo ou os gases quentes. Essa forma de olhar a queda dos corpos se manteve por muitos milênios, quase como uma afirmação sagrada, da qual não se podia duvidar, mas, por volta de 1500, cientistas criaram o **método experimental**, que é a base do método científico. Um fenômeno que ocorre em todos os lugares, como o reflexo de um rosto num espelho, é chamado de um fenômeno natural. Galileu Galilei, o primeiro a escrever sobre esse método, estudou o fenômeno da queda dos corpos fazendo observações e medições do fenômeno, ou seja, ele começou a observar **como, quando e em que situação o fenômeno ocorria**. Galileu deixou cair uma bala de canhão e uma de mosquete, cem vezes mais leve, do alto da Torre de Pisa, na Itália.



Homem de espírito científico e pesquisador, o italiano Galileu Galilei (1564-1642) deu muitas contribuições à ciência, principalmente no campo da Astronomia.

Isso permitiu a Galileu chegar à seguinte conclusão:

Dois corpos abandonados, ao mesmo tempo, de uma mesma altura, chegam juntos (simultaneamente) ao solo, mesmo que tenham pesos diferentes.

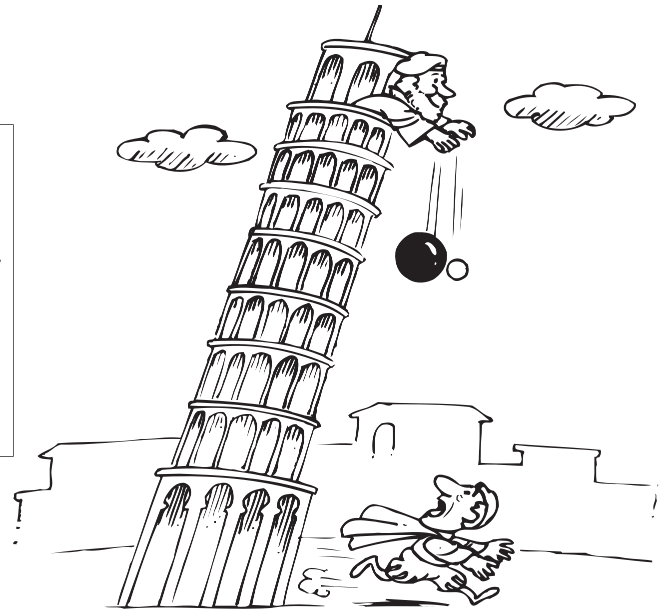


Figura 1. Torre de Pisa

À primeira vista essa afirmação nos surpreende, porque raramente temos a oportunidade de ver uma formiga e um elefante caindo simultaneamente de uma mesma altura e verificar se eles chegam juntos ao chão!

Então usemos o método científico, **duvidemos** dessa afirmativa! Vamos usar o método experimental para **verificar** se ela é correta!

O método experimental

O que você vai fazer agora é uma experiência simples para observar a queda dos corpos na superfície da Terra e conhecer um pouco mais sobre o método experimental.

Pegue uma folha de papel do seu caderno. Segure a folha sobre a palma da mão esquerda e o caderno sobre a palma da direita, mantendo os dois à mesma altura do chão, como mostra a Figura 2. Espere alguns instantes e solte-os ao mesmo tempo. **Qual dos dois objetos cai mais rápido**?

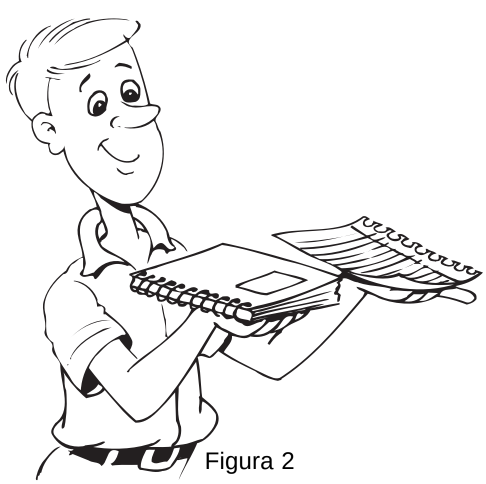


Figura 2

Você deve estar pensando que a resposta é óbvia: o caderno chega primeiro! Afinal ele é mais pesado.

Pois bem, você tem razão, mas somente na primeira parte da sua resposta. Realmente, nessas condições, o caderno cai mais rápido do que a folha de papel. Ou seja, apenas confirmamos o que já se esperava.

Façamos outra experiência.

Pegue duas folhas iguais de papel. Coloque cada uma na palma de cada mão. Espere alguns instantes e solte-as ao memo tempo. **Qual dos dois objetos cai mais rápido?**

Provavelmente uma das duas caiu mais rápido do que a outra. E se você repetir essa experiência diversas vezes, em várias tentativas, a da direita cairá primeiro e em outras a da esquerda cairá primeiro. Isso significa que essa experiência não é conclusiva. Não podemos afirmar, antes de fazer a experiência, qual folha cairá mais rápido.

Mas como podem dois corpos de mesmo peso não cairem juntos?

O que está atrapalhando?

Podemos fazer algumas **hipóteses**.

Talvez o ar esteja, de alguma forma, atrapalhando a descida das folhas e de maneira incontrolável, pois a cada descida as folhas percorrem caminhos diferentes, e chegam em instantes diferentes.

Podemos, e **devemos** testar essa **hipótese**:

Pegue duas folhas de papel, amasse uma completamente, até formar uma bola e segure-a com a mão direita; com a palma da mão esquerda, segure a outra folha sem amassá-la. Espere alguns instantes e solte-as. Faça novamente a pergunta: **qual dos dois objetos cai mais rápido**?

Nessa experiência podemos ver claramente que o ar interfere na queda dos corpos, pois a folha amassada cai rapidamente, e em linha reta, e a outra não.

Será possível diminuir a influência do ar sobre o movimento da folha de papel?

Pegue seu caderno novamente, sustentando-o sobre a palma da mão direita. E agora coloque a folha sobre o caderno. Espere alguns instantes e solte-os. **Qual dos dois objetos cai mais rápido**?

Se você repondeu que os dois caem juntos, maravilha!

O que fizemos? Nós controlamos a experiência. Impedimos que o ar atrapalhasse a queda da folha de papel e também pudemos ver que **tanto a folha, quanto o caderno, caem juntos até o chão**.

Com essa experiência foi possível compreender que:

Nem sempre, os fenômenos naturais são observados com facilidade. Para estudar as leis da natureza, temos de criar condições adequadas, que possam ser controladas.

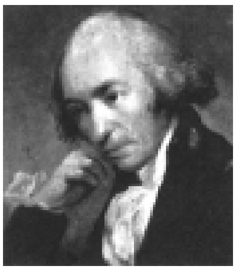
Essa foi a grande "sacada" de Galileu ao criar o método experimental. Nas próximas aulas, voltaremos a estudar o movimento da queda dos corpos na superfície da Terra.

Demos um exemplo do método experimental, que é a base do método científico, utilizado pela ciência, incluindo a Física. Mas, o que é mesmo Física?

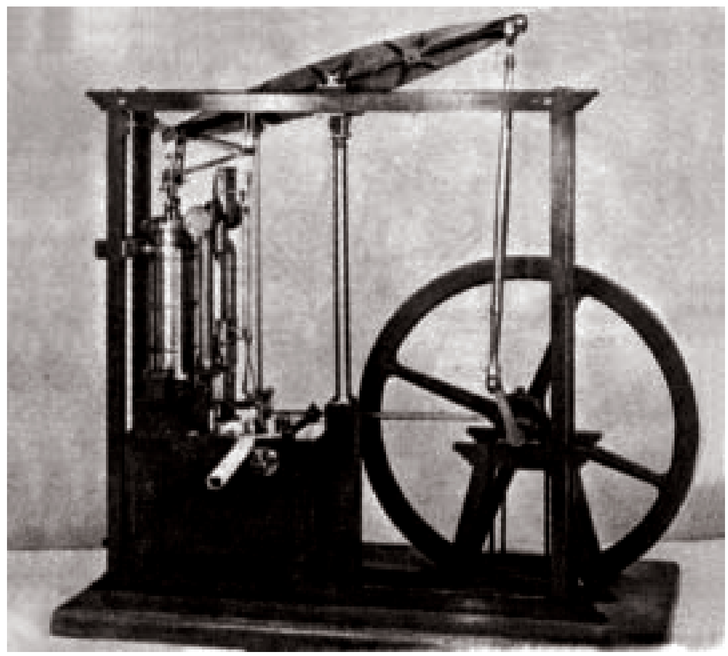
O que é a Física?

Há cerca de 200 anos, não precisaríamos nos preocupar com essa pergunta. Os conhecimentos que estão incluídos no que hoje chamamos Física, Química, Astronomia (não confunda com Astrologia!), Engenharia etc. estavam todos dentro do que se chamava **Filosofia Natural**.

Mas as informações sobre as substâncias, sobre o movimento dos astros, a construção de máquinas — sobre a natureza e os artefatos construídos pelos homens — foram crescendo tanto, que foi necessário o estabelecimento de ciências diferentes.



O escocês James Watt (1736-1819) aperfeiçoou a máquina a vapor. Sua contribuição para a Revolução Industrial foi decisiva.



Com Galileu Galilei, houve um grande avanço na ciência. Com a ajuda do método experimental, desenvolveram-se muitas técnicas que, cada vez mais, foram sendo aplicadas no dia-a-dia do homem.

A invenção da máquina a vapor, em 1769, por James Watt e, mais as descobertas de Ampère e outros com relação à eletricidade, fez com que surgissem pessoas interessadas também em **o que fazer com esses conhecimentos.** Pessoas se preocupavam e se dedicavam a aplicar os conhecimentos da ciência e são agora os engenheiros, mais interessados na tecnologia, que abandonaram a Filosofia Natural.

Daquele conjunto de conhecimentos que era a Filosofia Natural restou o estudo da Mecânica, do Calor, da Eletricidade, do Eletromagnetismo, da Luz, etc, que recebeu o nome de Física.

As divisões da Física

A Física estuda vários tipos de fenômenos da Natureza. Para facilitar o seu estudo costuma-se dividi-la. Até o início do século as principais partes da Física eram: a **Mecânica**, a **Termodinâmica**, e o **Eletromagnetismo**.

No século XX, a partir de grandes descobertas, surgiram novos ramos, entre eles: **Física Atômica e Nuclear**, **Mecânica Quântica**, **Relatividade**. Os novos conceitos introduzidos neste século provocaram uma verdadeira revolução na Física. Hoje é comum também dividir a Física em Clássica (antes de 1900) e Moderna (após 1900). Alguns desses assuntos serão abordados ao longo do nosso curso.

O quadro a seguir mostra algumas perguntas que podem surgir no nosso dia-a-dia, e identifica qual o ramo da Física que trata de respondê-las.

PERGUNTAS	QUEM RESPONDE	ALGUNS CONCEITOS
• Por que somos jogados para frente do ônibus quando ele freia bruscamente? • Por que nos dias de chuva é mais difícil frear um automóvel? • Como um navio consegue boiar?	MECÂNICA	Força Espaço Inércia Tempo Velocidade Massa Aceleração Energia Densidade
• Como funciona um termômetro? • Por que o congelador fica na parte superior da geladeira? • O que ocorre com a naftalina, que "some" do fundo da gaveta?	TERMODINÂMICA	Calor Energia térmica Pressão Volume Dilatação Temperatura Mudanças de estado
• Como vemos os objetos? • Como os óculos ajudam a melhorar a visão? • Como se forma a nossa imagem num espelho?	ÓPTICA	Raio de luz Reflexão Refração Lentes Espelhos
• O que é a corrente elétrica? • Como funciona um chuveiro elétrico? • Para que serve um fusível?	ELETROMAGNETISMO	Carga elétrica Corrente elétrica Campos elétricos Campos magnéticos Ondas eletromagnéticas
• O que é, de fato, a luz? • O que compõe todas as coisas? • O que são microondas?	FÍSICA ATÔMICA/NUCLEAR	Átomos Núcleos Fótons Elétrons

AULA

1

Aplicações da Física

Desde tempos imemoriais homens e mulheres investigam os **fenômenos da natureza** para poderem viver melhor. Sua curiosidade os fez aprofundar em seus conhecimentos sobre os ciclos do dia e da noite, sobre as fases da Lua, as estações do ano; sobre como se desenvolvem plantas e animais, para melhorar a agricultura e as criações, e assim produzir mais alimentos; sobre como produzir e controlar o fogo, e inventar ferramentas que facilitam o trabalho.

A construção de casas, represas, pontes; a utilização da roda, de carros e dos diferentes tipos de máquinas, tudo isso foi sendo incorporado ao conhecimento da humanidade.

Nos últimos séculos, a ciência vem avançando muito rapidamente, assim como a tecnologia, que aplica os conhecimentos científicos a situações práticas. Tornou-se possível fazer máquinas muito pesadas – os aviões – voarem, facilitando, depois, a construção de outras – as naves espaciais, que levaram o homem à Lua e que nos ajudam a desvendar os mistérios do universo.

Já se conhece muita coisa sobre o universo e as **estrelas**, mas as pesquisas ainda não se esgotaram. Sabemos que o Sol, a estrela mais próxima da Terra, é essencial para a existência da vida em nosso **planeta**.

Praticamente toda **energia** utilizada na Terra provém do Sol: ele nos fornece **luz** e **calor**, que são fundamentais para a manutenção da vida. E, hoje, existem equipamentos que permitem aproveitar mais e melhor essa energia.

Um ramo importante da Física é a Física Nuclear, que deu origem a reatores nucleares que produzem **energia elétrica**. Com os conhecimentos desse ramo da Física também foi possível construir bombas nucleares, que são as armas de destruição mais ameaçadoras, para a humanidade e para nosso planeta, já construídas.

No entanto, graças a esse mesmo conjunto de conhecimentos, foram desenvolvidos equipamentos e técnicas para a Medicina que salvam muitas vidas, pois permitem saber como estão funcionando os órgãos no interior do corpo humano. Exemplo disso são as radiografias (chapas de **raios X**), as tomografias e as ultra-sonografias.

Os conhecimentos adquiridos no ramo da Física Atômica nos permitiram construir lâmpadas especiais que produzem o **laser** – um tipo de **luz** dotada de certas características que permitem fazer microcirurgias (como as realizadas nos olhos), abrir cortes e fechá-los em cirurgias diversas, dispensando, em algumas situações, o uso do bisturi. O laser tem também muitas aplicações na indústria, como em dispositivos para cortar metais, em aparelhos de **som** que fazem as chamadas “leituras digitais” e em outros equipamentos.

A invenção dos computadores também ocorreu em conseqüência da aplicação de conceitos da Física à Eletrônica e à Microeletrônica. A utilização de computadores vem revolucionando as indústrias com a automatização dos processos de produção, como, por exemplo, nas fábricas de automóveis, de tecidos e de alimentos. Também está presente em bancos e lojas: os cartões magnéticos de bancos e de crédito são usados como substitutos do dinheiro.

Nossa sociedade está aproveitando cada vez mais os avanços científicos e tecnológicos que possibilitam uma melhor qualidade de vida para um número cada vez maior de pessoas. O resultado desses avanços aparecem na maior quantidade e na melhor qualidade de alimentos, na melhoria da saúde, numa vida mais longa, na maior comunicação entre as pessoas (livros, jornais, rádio, televisão, informática), entre outras coisas.

Na próxima aula, vamos dar o primeiro passo dessa longa caminhada pelo **mundo da Física**.

AULA

2

A culpa é da barreira!

A torcida vibra. Daquela distância é gol na certa, é quase um pênalti. O árbitro conta os passos regulamentares. A regra diz: são 10 passos (9,15 metros) para a formação da barreira, mas ela nunca fica na posição correta. Os jogadores avançam, o árbitro ameaça, mostra o cartão amarelo para um ou outro jogador, eles se afastam, voltam a avançar e a falta acaba sendo batida assim mesmo. É gol?


Figura 1

Nem sempre e, muitas vezes, a culpa é da barreira. Todos concordam, torcida, comentaristas, árbitros, dirigentes, mas parece que nada se pode fazer. Afinal quem garante que a distância não estava certa? Será que os passos do juiz são um instrumento de medida confiável ? E se ele for baixinho ou muito alto ou estiver mal-intencionado, querendo prejudicar um dos times? Você compraria um terreno medido desse jeito?

Muitas sugestões já foram feitas – até proibir a formação da barreira –, mas ninguém pensaria em dar uma trena ao juiz para que ele, com o auxílio do bandeirinha, medisse a distância correta. Seria tão absurdo como levar um juiz de futebol para medir um terreno. São coisas diferentes que exigem formas diferentes de agir. No futebol, a precisão das medidas não é muito necessária e, de certa forma, toda aquela movimentação na cobrança de uma falta também faz parte do jogo. Muita gente até acha que se fosse tudo muito certinho o futebol perderia a graça, mas certamente medir um terreno desse jeito não teria graça nenhuma.

Entretanto, durante muito tempo, as medidas de comprimento foram feitas assim, utilizando partes do corpo humano como instrumentos de medida. O diâmetro de um dedo, o tamanho de um palmo, pé ou braço, o comprimento de um passo foram utilizados como medidas de comprimento durante séculos por todos os povos da Antigüidade. É comum, até nos dias de hoje ouvir dizer: "esta mesa tem 10 palmos" ou "esta sala tem 30 pés". E, assim, todos os objetos são medidos comparando-os com outros "objetos especiais" que hoje chamamos de **padrões**.

À medida que o comércio entre os povos foi se desenvolvendo, surgiu a necessidade de criar padrões utilizáveis por todos. Pense na dificuldade dos chineses em comercializar sua seda com os europeus se ambos não usassem um padrão comum de comprimento?

Porém, de nada adiantaria criar padrões se não fosse possível compará-los. Para isso foram criados **instrumentos de medida** que, com o tempo, foram sendo tão aperfeiçoados que exigiram que se adotassem padrões mais precisos.

A história das grandezas físicas é a história da necessidade de fazer medidas e de todo o progresso que daí resultou. Apesar de existir uma quantidade enorme de grandezas, unidades e instrumentos de medida, a Física procura operar com o menor número possível para simplificar sua tarefa e tornar mais fácil a troca de informações entre todos aqueles que com ela trabalham ou dela precisam. É o que vamos ver em seguida.

Grandezas, padrões e unidades

Nem tudo pode ser medido. Como medir a preguiça de uma pessoa ou o amor que ela sente por outra? Seria possível criar um "amorômetro"? Para os físicos isso é impossível, preguiça e amor não são **grandezas físicas**. Não dá para dizer que alguém tem 300 de preguiça e 689,5 de amor. Esses números não significam nada porque não existe um padrão para essas grandezas**. Grandeza física** é alguma coisa que pode ser medida, isto é, que pode ser representada por um número e uma unidade.

Veja alguns exemplos:

- A distância da bola à barreira deve ser de **10 jardas** ou **9,15 metros**.
- A bola deve ter entre **400 gramas** e **500 gramas**.
- O tempo de uma partida é de **90 minutos**.

No primeiro exemplo, a grandeza física é o **comprimento** e a unidade é a **jarda** ou o metro. No segundo, a grandeza física é a **massa**, a unidade é o **grama**, um **submúltiplo** da unidade quilograma**.** No terceiro exemplo, a grandeza física é o **tempo**, a unidade é o minuto, um múltiplo da unidade **segundo**.

Nesses exemplos estão três **grandezas fundamentais**: comprimento, massa e tempo. A partir dessas grandezas fundamentais, pode-se definir outras grandezas que, por isso, chamam-se **grandezas derivadas.** São exemplos de grandezas derivadas a **área** de uma superfície, o **volume** e a **densidade** de um corpo, a **velocidade** e **aceleração** de um automóvel, a **força** exercida por um motor e muitas outras.

Veja alguns exemplos práticos onde aparecem grandezas (*) derivadas e suas unidades:

- Um terreno retangular tem 8 metros de frente por 25 metros de fundo. A sua área (A) é: $A = 8\ m \cdot 25\ m = 200\ m^2$ ou 200 **metros quadrados,** que é uma unidade de área.

(*) Essas grandezas foram colocadas aqui apenas para servir de exemplo. Elas serão estudadas mais adiante no curso.

- Uma lata de óleo de 900 cm^3 (centímetros cúbicos) contém 720 g (gramas) de óleo. A densidade (d)* desse óleo é: d = 720 g   900 cm^3 = 0,8 g/cm^3 ou 0,8 **gramas** por **centímetro cúbico**, que é uma unidade de densidade.
- Um carro percorre 120 km (quilômetros) em 2 h (horas). A sua velocidade média (v_m)* é: v_m = 120 km   2 h = 60 km/h ou 60 **quilômetros por hora**, que é uma unidade de velocidade.

Todas essas unidades são derivadas. O **metro quadrado** deriva do **metro**, o **grama por centímetro cúbico** deriva do **quilograma** e do **metro**, o **quilômetro por hora** deriva do **metro** e do **segundo**.

Até há algum tempo, não havia ainda um conjunto de unidades fundamentais que fosse reconhecido e adotado em todo mundo (é por isso que no futebol, inventado pelos ingleses, as distâncias costumam ser medidas em jardas). A partir de 1948, esse conjunto começou a ser estabelecido e, em 1960, recebeu o nome de **Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Atualmente, só os Estados Unidos ainda não adotam o SI, mas passarão a utilizá-lo em breve.

O Sistema Internacional de Unidades (SI)

O SI estabelece 7 grandezas físicas fundamentais das quais são derivadas todas as outras. São elas:

COMPRIMENTO	MASSA	TEMPO	CORRENTE ELÉTRICA	TEMPERATURA	QUANTIDADE DE MATÉRIA	INTENSIDADE LUMINOSA

A Mecânica utiliza as três primeiras e suas derivadas.

Cada unidade fundamental tem um **padrão**, alguma coisa que pode ser reproduzida em qualquer lugar. Por exemplo, se alguém for verificar se uma régua tem suas divisões corretas deve utilizar o padrão adequado.

Os padrões de comprimento, o **metro** e, de tempo, o **segundo**, têm definições muito complicadas devido às exigências da Ciência e da Tecnologia modernas.

O padrão de **massa** é o mais antigo, criado em 1889, e também o mais simples (Quadro 1). Cada país deve ter laboratórios capazes de reproduzir os padrões ou cópias devidamente aferidas e cuidadosamente guardadas.

No Brasil essa tarefa é desempenhada pelo Inmetro, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, do Ministério da Indústria e do Comércio.

Não é necessário saber essas definições, entretanto é importante saber que existem os padrões, as unidades fundamentais e derivadas e formas corretas de expressá-las (Quadro 2 - ver página 19).

QUADRO 1 - TRÊS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SI

GRANDEZA	NOME	SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
Comprimento	Metro	**m**	Distância percorrida pela luz, no vácuo, num intervalo de tempo de 1/299792458 s.
Massa	Quilograma	**kg**	Massa de um cilindro padrão de platina--irídio conservada no Bureau Internacional de Pesos e Medidas em Sèvres, na França.
Tempo	Segundo	**s**	Duração de 9.192.631.770 períodos da radiação de transição de dois níveis do estado fundamental do átomo do césio 133.

Observações
1. Note que os símbolos não são abreviaturas, por isso não têm ponto final.
2. As definições serão discutidas mais adiante no curso, por isso, não é necessário decorá-las.

QUADRO 2 – ALGUMAS UNIDADES DERIVADAS DO SI		
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
Densidade	Quilograma por metro cúbico	kg/m^3

Existem inúmeras unidades práticas ainda em uso devido ao costume ou às suas aplicações tecnológicas. Muitas dessas unidades, principalmente as de origem inglesa, tendem a desaparecer com o tempo e serem substituídas por unidades do SI. Por enquanto elas ainda são muito usadas e é interessante conhecê-las (algumas delas se encontram no Quadro 3).

QUADRO 3 - ALGUMAS UNIDADES PRÁTICAS MAIS USADAS			
GRANDEZA	NOME(S)	SÍMBOLO(S)	RELAÇÃO COM A UNIDADE CORRESPONDENTE DO SI
Comprimento	Milímetro ❖	mm	0,001 m
	Centímetro ❖	cm	0,01 m
	Quilômetro ☼	km	1.000 m
	Polegada ✡	in	0,0254 m ou 2,54 cm
	Pé ✡	ft	0,3048 m ou 30,48 cm
	Jarda ✡	yd	0,9144 m ou 91,44 cm
	Milha ✡	mi	1.609 m ou 1,609 km
Massa	Grama ❖	g	0,001 kg
	Tonelada ☼	t	1.000 kg
	Quilate ✡	-	0,0002 kg ou 0,2g
	Libra ✡	lb	0,454 kg ou 454g
	Arroba ✡	-	14,688 kg
Tempo	Minuto ☼	min	60 s
	Hora ☼	h	60 min ou 3.600 s
	Dia ☼	d	24 h ou 86.400 s
Área	Hectare ☼	ha	10.000 m^2
	Alqueire (SP) ✡	-	2,42 ha
	Alqueire (MG, RJ e GO) ✡	-	4,84 ha
Volume	Litro ☼	l	0,001 m^3 ou 1.000 cm^3
Velocidade	Quilômetro por hora ☼	km/h	(1/3,6) m/s
	Milha por hora ✡	mi/h	1,609 km/h
	Nó ✡	-	1,852 km/h

❖ Submútiplos do SI ☼ Múltiplos do SI ✡ Unidades não-pertencentes ao SI

você deve ter notado que algumas unidades têm símbolos diferentes, como a polegada o pé e a jarda.

Essas unidades foram adaptadas do inglês: polegada é **inches**, daí o símbolo **in**; pé é **feet**, por isso seu símbolo **ft** e a jarda é **yard**, por isso seu símbolo **yd**. Atualmente é comum utilizar o símbolo **pol**. para indicar a unidade polegada.

Algarismos significativos

Quando se trabalha com medidas quase sempre aparece uma dúvida: com quantos algarismos se escreve uma medida?

Tente medir o diâmetro do seu lápis. Que resultado você obteve?

7 mm? 7,1 mm? 7,15 mm?

Essa pergunta tem **inúmeras respostas**, e **todas podem estar certas**!

Se você mediu com uma régua comum, provavelmente achou 7 mm, ou talvez 7,5 mm ou ainda 0,7 cm. Se você dispõe de um instrumento mais preciso, como um micrômetro ou um paquímetro, pode ter achado 7,34 mm ou 7,4082 mm. Se você repetir a medida várias vezes pode ser que em cada uma ache um valor diferente! Como saber qual é o valor correto? Como escrever esse valor?

Na verdade, nem sempre existe um valor correto nem uma só forma de escrevê-lo. O valor de uma medida depende do instrumento utilizado, da escala em que ele está graduado e, às vezes, do próprio objeto a ser medido e da pessoa que faz a medida.

Por exemplo, a medida do diâmetro do lápis com uma régua comum será feita na escala em que ela é graduada (centímetros ou milímetros) e dificilmente alguém conseguirá expressá-la com mais de dois algarismos. Nesse caso, certamente o segundo algarismo é avaliado ou **duvidoso.**

Se for utilizado um instrumento mais preciso, é possível fazer uma medida com um número maior de algarismos e, ainda, acrescentar mais um, o duvidoso.

Todos os algarismos que se obtêm ao fazer uma medida, incluindo o duvidoso, são **algarismos significativos.** Se outra pessoa fizer a mesma medida, talvez encontre um valor um pouco diferente mas, ao escrevê-lo, deverá utilizar o número correto de algarismos significativos.

Paquímetro e micrômetro – instrumentos de precisão

Figura 2 - **Paquímetro**

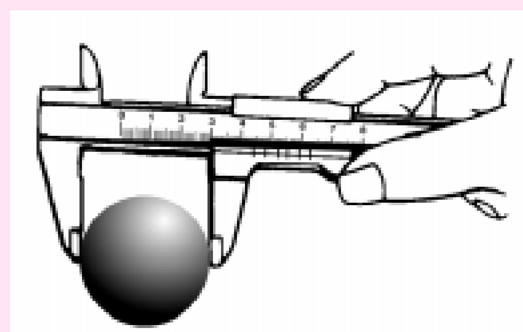


Figura 3 - **Micrômetro**

Uma régua comum não permite medidas muito precisas porque não há como subdividir o espaço de 1 mm: a distância entre os traços é muito pequena. O paquímetro e o micrômetro são instrumentos que utilizam duas escalas, uma fixa, semelhante à escala de uma régua comum e uma escala móvel que, de maneira muito engenhosa, permite dividir a menor divisão da escala fixa. No paquímetro, essa escala corre junto à escala fixa, enquanto que no micrômetro ela está gravada numa espécie de cilindro móvel que gira à medida que se ajusta ao instrumento para efetuar a medida (veja as Figuras 2 e 3).

Passo a passo

Suponha que, ao medir o diâmetro desse lápis com um paquímetro, Maristela encontre o valor 7,34 mm e Rosinha 7,37 mm. Pelo resultado, percebe-se que elas têm certeza do 7 e do 3, mas o último algarismo é incerto.

Imagine agora que elas resolvam entrar num acordo e considerar, como melhor medida, um valor que seja igual à média aritmética dos seus resultados.

Qual será esse valor?

Para achar a média aritmética **m** basta somar as medidas de cada um e dividir por 2 (que é o número total de medidas). Assim teremos:

$$m = \frac{7{,}34\,mm + 7{,}37\,mm}{2}$$

$$\mathbf{m = \frac{14{,}71\,mm}{2} = 7{,}355\ mm}$$

Será correto expressar o diâmetro do lápis com tantos algarismos?

É claro que não! Se cada uma só teve certeza de **dois** algarismos e avaliaram, discordando, mais **um**, não tem sentido dar uma resposta com **quatro** algarismos!

Nesse caso, para manter a coerência e expressar a medida com o número correto de algarismos significativos, deve-se desprezar o último algarismo obtido no cálculo da média aritmética.

É comum utilizar a seguinte regra: quando esse algarismo (o que deve ser desprezado) for maior ou igual a 5 acrescenta-se 1 ao último algarismo que restou.

Teremos então 7,355 mm = **7,36 mm**, que é a melhor forma de expressar a média aritmética das medidas de Maristela e Rosinha: mantêm-se os mesmos dois algarismos dos quais têm certeza, o 7 e o 3, mas o algarismo duvidoso passa a ser o 6. É provável que esse valor seja, provisoriamente, o melhor valor dessa medida. Se outras pessoas participarem e fizerem outras medidas, a média aritmética terá um número muito maior de parcelas e o seu valor representará melhor o diâmetro do lápis.

PARA TERMINAR

Talvez não haja um só dia em nossas vidas em que não se conviva com alguma forma de medida. Ao nascer ganham-se os primeiros números: altura e peso (seria melhor, comprimento e massa). A partir de então, as grandezas e as medidas povoam nosso dia-a-dia, tornando-se cada vez mais variadas e complexas. Temos que nos familiarizar com novos instrumentos de medida, relógios, balanças, termômetros, medidores de combustível, de pressão, de consumo de água ou energia elétrica e o que mais o progresso exigir. No entanto, mais importante que tudo isso, é entender que toda medida resulta de um esforço do homem para compreender e interpretar a natureza. Fomos nós, seres humanos, que criamos as grandezas, os padrões, as unidades e os instrumentos de medida. Portanto, nenhuma medida é a expressão da verdade, independentemente do número de algarismos significativos que possua. Há, certamente, medidas e instrumentos mais confiáveis, processos de medição mais adequados a determinados fins. E é importante distinguir uns dos outros. A vida tem mais barreiras do que parece e é preciso ser capaz de perceber se elas estão à distância correta, se o juiz mediu corretamente os passos regulamentares, se os jogadores não avançaram. Caso contrário, como dizem os jogadores, fazer um gol fica muito difícil!

Exercício 1

Nas palavras a seguir, procure distinguir quais são, ou não, grandezas físicas: **cansaço, calor, energia, rapidez, curiosidade, trabalho, honestidade, pontualidade, temperatura, força, aceleração** e **coragem.**

Exercício2

Siga os exemplos e faça as transformações de unidades pedidas ao lado:

Exemplos		Transforme
5 cm = 5 · 0,01 m = 0,05 m 0,75 km = 0,75 · 1.000 m = 750 m 5,8 in = 5,8 · 0,0254 m = 0,14732 m	I	a) 3 cm em m b) 2,5 mm em m c) 0,8 km em m d) 1,2 ft em m e) 4,5 in em m f) 20 yd em m g) 500 mi em m
1 m = 1 000 mm 1 m = 100 cm 1 m = 0,00 1km	II	a) 5 m em mm b) 0,4 m em mm c) 3 m em cm d) 1,2 m em cm e) 150 m em km f) 180.000 m em km
3,5 g = 3,5 · 0,001 kg = 0,0035 kg	III	a) 12 g em kg b) 20 t em kg c) 50 lb em kg
1 kg = 1.000 g 1 kg = 0,001 t	IV	a) 0,7 kg em g b) 8,2 kg em g c) 300 kg em t d) 630.000 kg em t
5 min = 5 · 60 s = 300 s 1 h 20 min = 1h + 20 min = = (1 · 3.600 s) + (20 · 60 s) = = 3.600 + 1.200 = 4.800 s	V	a) 1,5 min em s b) 2 h 15 min em s c) 5 h 22 min13 s em s
2,8 l = 2,8 · 0,001 m^3 4,5 l = 4,5 · 1.000 cm^3 = 4.500cm^3	VI	a) 500 l em m^3 b) 69 l em cm^3

Exercício 3

O diâmetro de muitas peças cilíndricas (canos, roscas, parafusos etc.) costuma ser dado em polegadas ou frações de polegadas. Seguindo o exemplo ao lado, faça as tranformações pedidas.

Exemplos	Transforme em mm
I) Transformar 4,5 in em mm: 4,5in=4,5 · 25,4 mm = 114,3 mm	a) 3,0 in b) 6,8 in
II) Transformar 3/4 in em mm: 3/4 in = 0,75 in = 0,75 · 25,4 mm = 19,05 mm	c) 1/4 in d) 5/16 in

Exercício 4

É comum encontrar em nossas estradas uma placa onde está escrito: **Velocidade máxima 80 km**. Você acha que essa placa está certa?

Exercício 5

Três pessoas, utilizando um paquímetro, medem o diâmetro de um cilindro e obtêm as seguintes medidas: 38,45 mm, 38,41 mm e 38,42 mm. Qual é o valor médio dessa medida, expresso com o número correto de algarismos significativos?

Exercício 6

Uma estrela está a 400 anos-luz da Terra. Isso significa que a luz dessa estrela demora 400 anos para chegar à Terra. Qual é a distância entre essa estrela e a Terra?
(Dado: velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s ou 300.000.000 m/s).

Sugestões

- A distância da estrela à Terra é a distância percorrida pela luz. Como vamos ver na próxima aula, essa distância pode ser calculada multiplicando-se a velocidade da luz pelo tempo que ela gasta para vir da estrela à Terra.

- O tempo deve ser dado em segundos, logo você deve transformar anos em segundos. Admita que 1 ano = 365 dias.

AULA

3

Bola pra frente

PARA COMEÇAR

Nas aulas anteriores, descrevemos alguns aspectos da Física, bem como discutimos algumas unidades utilizadas nessa ciência, principalmente num de seus ramos: a Mecânica. É exatamente aqui que iniciaremos o estudo da Física propriamente dito. Vamos começar por uma das partes da Mecânica: a Cinemática.

A Cinemática é o estudo dos movimentos. Mas ela não vai muito a fundo. Se estivermos interessados em descrever apenas **como** um determinado objeto está se movendo, estaremos trabalhando dentro da Cinemática. É nesse campo que vamos estudar a velocidade dos objetos, sua aceleração, fazer previsões sobre onde poderá ser localizado um objeto que está se movendo com determinadas características e assim por diante. Porém, se quisermos conhecer as causas, ou seja, **por que** um objeto está se movendo de uma certa maneira, já estaremos em um outro campo da Mecânica: a Dinâmica.

Para saber como se movem os objetos e fazer previsões a respeito de seu movimento precisamos, inicialmente, localizá-los, isto é, saber onde eles estão.

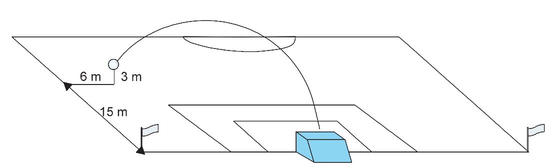


Figura 1

Fique ligado

Localizando os objetos

Estádio cheio! O goleiro bate o tiro de meta, tentando jogar a bola fora de campo para ganhar tempo. A torcida vaia! Um torcedor tira uma foto do lance e, mais tarde, mostrando a foto, tenta explicar a situação para o filho: “A bola estava a 15 m da bandeirinha, do lado esquerdo do nosso goleiro, a 6 m de distância da lateral esquerda e a 3 m de altura”. Aparentemente, a bola estava localizada. A foto ajudou muito! Na realidade, ele deveria dizer que os 15 m foram medidos sobre a lateral esquerda e, não, entrando 15 m pelo campo e, assim por diante. Um fato importante é que, para localizarmos um objeto que se movimenta no espaço, como o caso da bola, precisamos fornecer três distâncias. Além disso, é necessário explicar como foram feitas as medidas, e a partir de que ponto. No exemplo, o ponto em questão era uma das bandeirinhas que limitam o campo.

Todavia, os objetos em seu movimento, às vezes podem ser localizados de maneira mais fácil. É o caso, por exemplo, das bolas de bilhar que, em geral, andam apenas sobre uma superfície plana.

Figura 2

Bilhete de Sherlock Holmes para seu Asistente

Quando cheguei aqui, percebi que a bola branca tinha sido movida.

Ontem eu tinha feito uma marca de giz num dos cantos da tabela, perto de uma das caçapas. Eu medi, então, 80 centímetros sobre a lateral maior da mesa. Depois, medi 67 centímetros até a bola.

Eu tinha dado ordens expressas para que nada fosse tocado, pois a bola branca deveria estar com as impressões digitais do criminoso. Eu fechei tudo antes de sair!

Hoje, quando cheguei aqui, a situação tinha mudado. As novas medidas eram, na mesma ordem, 68 cm e 79 cm. Alguém esteve aqui! A bola não pode ter se deslocado sozinha!

Discutiremos depois.

Abraços, Sherlock

Lendo o bilhete deixado pelo famoso detetive Sherlock Holmes para seu assistente, que estava chegando ao local do crime, vemos que Holmes procura localizar bem a bola branca. Para tanto, ele utiliza apenas duas distâncias, e, além disso, um ponto a partir do qual efetuou as medidas das distâncias. No caso, o ponto era a marca de giz feita perto da caçapa.

Existem situações cuja localização do ponto que desejamos estudar pode ser feita de maneira ainda mais fácil.

A Figura 3 mostra um pistão dentro de um motor de automóvel. O pistão se move, dentro de um cilindro, para cima e para baixo. Assim sendo, para localizarmos o ponto P, marcado no cilindro, bastará conhecer apenas uma distância: por exemplo, sua distância até a base do pistão é 6 cm.

Figura 3

Os objetos mudam de posição – Referenciais

Para localizar os objetos no espaço, no plano e ao longo de uma reta, a Física utiliza maneiras especiais. São os sistemas de referência (ou referenciais).

(a) (b) (c)

Figura 4

No primeiro caso, no campo de futebol, a posição da bola poderia ser dada da seguinte maneira: escolhemos um ponto O – no caso, a base da bandeirinha e três eixos que podem ser entendidos como três réguas: OX, OY e OZ. Com o auxílio dessas três réguas, medimos as distâncias:

$$x = 15 \text{ m}, \quad y = 6 \text{ m} \quad \text{e} \quad z = 3 \text{ m}.$$

Com esses três valores podemos localizar a bola de futebol.

No segundo caso, na mesa de bilhar, necessitamos da origem, ou seja, do canto marcado com giz e das duas distâncias. Aqui, houve uma mudança de posição. Então teremos duas posições da bola de bilhar:

A – primeira posição: x = 80 cm, y = 67 cm

B – segunda posição: x = 68 cm, y = 79 cm

Finalmente, para o pistão, teremos de indicar que a origem é a base do pistão e que a posição do ponto P é x = 6 cm.

Esses sistemas de referência servem para localizar os objetos que estamos estudando e também para auxiliar na compreensão das mudanças de sua posição. Foi assim que Sherlock descobriu que a bola de bilhar tinha sido movimentada.

Os objetos se movimentam

Vimos anteriormente que os referenciais podem nos ajudar a saber quando a posição de um objeto varia. A bola de bilhar mudou da primeira posição: que podemos chamar de A (x = 80, y = 67), para a posição que poderíamos chamar de B (x = 68 cm, y = 79 cm). Falamos, nesse caso, em deslocamento.

Deslocamento é apenas uma mudança de posição.

Porém, o deslocamento poderia ter sido feito em 1 segundo, em 1 hora ou num tempo qualquer.

Mais ainda: a bola poderia ter ido diretamente de A para B ou, então, ter passado por caminhos os mais variados, com maior ou menor velocidade etc.

Quando estivermos interessados em conhecer não somente o deslocamento da bola, mas também o percurso que ela fez, como se deslocou ao longo desse percurso, se foi mais ou menos rapidamente, assim por diante, estaremos estudando o movimento da bola.

No movimento de um objeto, estudamos, portanto, como ocorreram seus deslocamentos ao longo do tempo e a trajetória (o caminho, o percurso) que ele seguiu.

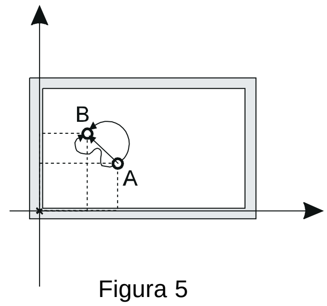


Figura 5

Na mesma marcha

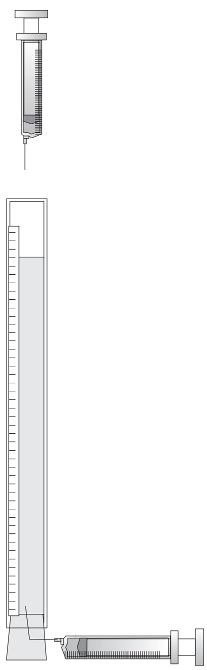


Figura 6

Vamos iniciar nosso estudo dos movimentos por uma situação bastante simples. A Figura 6 representa um tubo de vidro contendo óleo de cozinha. O tubo é tapado com uma rolha de borracha. Se, com auxílio de uma seringa e de uma agulha de injeção, colocarmos uma gota de água dentro do óleo, a gota vai descer lentamente, sempre na mesma marcha.

Podemos estudar também gotas que subam! É claro que, nesse caso, água não serve! Mas, se usarmos álcool, poderemos colocar uma gota espetando a agulha da seringa na rolha de borracha. Ela vai subir, também, sempre na mesma marcha, isto é, sempre com a mesma velocidade.

É esse movimento que iremos estudar: o de uma gota de álcool subindo num tubo contendo óleo.

Já vimos que, para o estudo de um movimento, necessitamos de um referencial. O movimento da gota é, de certo modo, parecido com o do pistão. A gota vai andar apenas numa direção. Assim, bastará apenas uma régua para ser usada como referencial. Precisamos também saber **quando** a gota estava em determinada posição. Então, será necessário um relógio ou, melhor ainda, um cronômetro.

Bola pra cima!

x (cm)

Figura 7

Vamos supor que a gota de álcool já esteja subindo através do óleo. Se fotografássemos o tubo e o relógio, de 4 em 4 segundos, ficaríamos com um conjunto de fotos semelhante ao representado na Figura 7. Os números que aparecem perto dos relógios representam os instantes em que foram tiradas as fotos.

A primeira foto é aquela em que o cronômetro estava marcando zero. Depois, temos fotos nos instantes 4, 8 até 32 s. Nós acrescentamos, nesse conjunto de fotos, um eixo que substitui a régua, e outro no qual são indicados os instantes.

Vamos supor que, lendo a posição na régua em cada foto, obtivéssemos a Tabela 1. Ou seja: na primeira foto, a gota estaria na posição x = 18 cm, da régua. Na segunda foto ela estaria na posição x = 22 cm etc. No instante 32 s, a gota se encontraria na posição x = 50 cm.

Analisando a Tabela 1 podemos ver, por exemplo, que entre os instantes $t_1 = 4$ s e $t_2 = 20$ s, a gota passou da posição $x_1 = 22$ cm para a posição $x_2 = 38$ cm.

TABELA 1

t (s)	x (cm)
0	18
4	22
8	26
12	30
16	34
20	38
24	42
28	46
32	50

Portanto ela se deslocou

38 – 22 = 16 cm

Porém, entre 4 s e 20 s, decorreram:

20 – 4 = 16 s

Dessa maneira, a gota percorreu 16 cm em 16 s. Como a gota percorreu o trecho sempre com a mesma marcha, sua velocidade foi de 1 cm/s. Essa foi sua velocidade média.

Definimos **velocidade média** como sendo:

$$v_{\text{média}} = \frac{\text{deslocamento}}{\text{tempo}} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

As duas diferenças $x_2 - x_1$ e $t_2 - t_1$, costumam ser representadas por Δx e Δt (Δ é uma letra grega, delta, assim, lemos "delta x" e "delta t").

Não é necessário usar obrigatoriamente os instantes $t_1 = 4$ s e $t_2 = 20$ s. Poderíamos usar $t_1 = 12$ s (nesse caso a posição x_1 seria 30 cm – veja na Tabela 1), e $t_2 = 32$ s (nesse caso, a tabela diz que a posição x_2 é 50 cm). Então:

$$v_{\text{média}} = \frac{50 - 30}{32 - 12} = \frac{20 \text{ cm}}{20 \text{ s}} = 1 \text{ cm / s}$$

Nesse movimento, como se vê, a velocidade da gota não varia. Ela anda sempre em linha reta e na mesma marcha! Em todos os instantes, a velocidade da gota é igual à sua velocidade média. É por isso que esse movimento é chamado **Movimento Retilíneo Uniforme**. Não necessitamos então escrever $v_{\text{média}}$ bastará escrevermos v (de velocidade).

Uma característica do Movimento Retilíneo Uniforme é esta: a velocidade em qualquer instante, é igual à velocidade média.

Outras gotas, outras velocidades

TABELA 2

t (s)	x (cm)
0	12
4	20
8	28
12	36
16	44
20	52

Se introduzíssemos outras gotas dentro do óleo, por exemplo uma gota maior, poderíamos constatar que a velocidade seria diferente. Se a gota fosse maior, ela subiria com velocidade maior. Poderíamos ter, por exemplo, uma situação igual àquela representada pelo gráfico da Figura 8 e pela Tabela 2.

x (cm)

t (s)

Figura 8

Tanto nesse caso, como na situação anterior, todos os pontos do gráfico ficam numa reta. Essa é outra característica do Movimento Retilíneo Uniforme.

No Movimento Retilíneo Uniforme, o gráfico da posição em função do tempo é uma linha reta.

Vamos calcular a velocidade da gota neste caso. Se escolhermos:

$$t_1 = 4\ \text{s} \rightarrow \text{ então } x_1 = 20\ \text{cm}$$
$$t_2 = 12\ \text{s} \rightarrow \text{ então } x_2 = 36\ \text{cm}$$

A velocidade será:

$$v = v_{\text{média}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{36 - 20}{12 - 4} = \frac{16}{8} = 2\ \text{cm / s}$$

Se compararmos os gráficos dos dois movimentos, como está na Figura 8, podemos ver que a reta que representa o movimento da gota mais rápida, é mais inclinada do que a primeira. Pode–se dizer que:

Quanto maior for a velocidade de um objeto, mais inclinada, com relação ao eixo dos tempos, é a reta que representa esse movimento.

Desce!

Vamos voltar e supor, agora, que a gota seja de água. Ela vai ser introduzida pela parte superior e descer ao longo do tubo. **Se não mexermos na régua**, as posições da gota, em seu movimento, vão diminuir, ou seja, os valores da posição vão decrescer. Poderíamos ter uma tabela como a 3 e um gráfico como o da Figura 9.

TABELA 3

t (s)	x (cm)
0	55
5	45
10	35
15	25
20	15
25	5

t (s)

Figura 9

Vamos calcular a velocidade da gota nesse caso. Se escolhermos:

$t_1 = 5$ s $\rightarrow$ então $x_1 = 45$ cm
$t_2 = 20$ s $\rightarrow$ então $x_2 = 15$ cm

A velocidade será:

$$v = v_{\text{média}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{15 - 45}{20 - 5} = \frac{30}{15} = -2 \text{ cm / s}$$

Qual o significado dessa velocidade negativa? Ela indica que a gota está se deslocando no sentido oposto à orientação da régua. Trocando em miúdos: a gota está indo de posições que são representadas por números maiores para posições representadas por números menores. Porém, se tivéssemos invertido a régua antes de colocar a gota, a velocidade seria positiva! Isso porque a gota iria das posições menores para as posições maiores. Esse é um fato bastante importante: o sinal da velocidade depende de como colocamos a régua!

A velocidade depende do referencial.

Como localizar a gota em qualquer instante

TABELA 4	
t (s)	**x (cm)**
8	20
10	24
t	**x**
6	16
4	12
12	28
2	8

Vamos supor que tivéssemos uma tabela que descrevesse um movimento uniforme, como os anteriores, mas que os valores estivessem embaralhados (Tabela 4). Mais ainda: no meio deles, colocamos um par de valores desconhecidos: **t** e **x**. Vamos ver que, se utilizarmos a definição de velocidade média duas vezes, poderemos obter uma função muito importante.

Vamos calcular a velocidade média escolhendo:

$t_1 = 8$ s $\rightarrow$ então $x_1 = 20$ cm
$t_2 = 10$ s $\rightarrow$ então $x_2 = 24$ cm

A velocidade será:

$$v = v_{\text{média}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{24 - 20}{10 - 8} = \frac{4}{2} = 2 \text{ cm/s}$$

Vamos agora escolher:

$t_1 = 6$ s $\rightarrow$ então $x_1 = 16$ cm
$t_2 = t$ s $\rightarrow$ então $x_2 = x$ cm

A velocidade média será:

$$v_{\text{média}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{x - 16}{t - 6}$$

Porém, sabemos que $v_{\text{média}} = 2$ cm/s, como foi visto um pouco atrás.

Então, ficaremos com:

$$\boxed{\frac{x - 16}{t - 6} = 2}$$ ou seja, $$\begin{aligned} x - 16 &= 2\,(t - 6) \\ x - 16 &= 2\,t - 12 \end{aligned}$$

então: $$\boxed{x = 2 \cdot t + 4}$$

Esta é a chamada **função horária da posição**. Ela serve para determinarmos a posição do objeto que está se movendo em linha reta com velocidade constante, em qualquer instante. Por exemplo: se fizermos t = 6 s, teremos:

$x = 2 \cdot 6 + 4 = 16$ cm, que é o valor dado na Tabela 4.

Podemos fazer o inverso, calcular em que instante o objeto passou, ou vai passar, por determinada posição. Por exemplo: saber, em que instante o objeto vai estar na posição x = 40 cm.

Assim, teremos:

$$\begin{aligned} 40 &= 2 \cdot t + 4 \\ 40 - 4 &= 2 \cdot t \\ 36 &= 2 \cdot t \\ 2 \cdot t &= 36 \\ t &= 18 \text{ s} \end{aligned}$$

Por outro lado, para o instante t = 0, teríamos x = 4 cm. Esse valor é exatamente o 4 que aparece na função horária.

De maneira geral, podemos escrever a função horária como:

$$\boxed{\mathbf{x = x_0 + v \cdot t}}$$

onde: x é a posição no instante t; v é a velocidade; x_0 é a posição no instante t = 0.

Um outro gráfico

Na Figura 6, tínhamos uma gota que descia pelo tubo com óleo numa velocidade constante de 2 cm/s. Qualquer que fosse o instante, a velocidade era a mesma: 2 cm/s. Assim, uma tabela para a velocidade em função do tempo e o gráfico correspondente seriam:

TABELA 5

t (s)	v (cm/s)
0	2
4	2
8	2
12	2
16	2
20	2

v (cm/s)

t (s)

Figura 10

v (cm/s)

t (s)

Figura 11

Aparentemente, o gráfico da Figura 10 não nos dá muitas informações. Todavia, com ele podemos saber quanto a gota se deslocou entre dois instantes. Vamos calcular qual a área do retângulo que foi desenhado no gráfico da velocidade, que está na Figura 11. A altura do retângulo vale 2 cm/s, e sua base (12 s – 4 s), ou seja, 8 s.

Como a área do retângulo é o produto da base pela altura, teremos:

$$\text{Área} = 2\ \text{cm/s} \cdot 8\ \text{s} = 16\ \text{cm}.$$

Por outro lado, consultando a Tabela 2 (Figura 8), veremos que entre os instantes 4 s e 12 s, a gota foi da posição 20 cm para a posição 36 cm e, dessa maneira, andou 16 cm, que foi o valor encontrado para a área do retângulo. Poderíamos pensar que isso foi uma coincidência. Porém, você poderá calcular a área de outros retângulos na mesma figura e verificar que a área vai ser igual ao deslocamento!

Passo a passo

TABELA 6

t (s)	x (cm)
0	56
1	48
2	40
3	32
4	24
5	16
6	8

Uma pessoa anotou as posições e os tempos para um objeto movendo–se em linha reta e obteve a Tabela 6. Construa o gráfico da posição em função do tempo e o da velocidade em função do tempo. Admitindo–se que esse objeto se mova sempre dessa maneira, determine o instante em que passa pela posição $x = 20$ cm e qual a posição nos instantes $t = 7{,}0$ s e $t = 3{,}5$ s. Usando o gráfico da velocidade, determine o deslocamento entre 2 s e 6 s.

x (cm)
6
30
16
t (s)

Figura 12

Os pontos da tabela que dão a posição, em função do tempo, quando colocados num gráfico, ficam como o que está na Figura 12.

Se escolhermos dois instantes, e suas respectivas posições, podemos calcular a velocidade média do objeto. Vamos usar, por exemplo, os valores:

$$\mathbf{t_1 = 2\ s \ \rightarrow x_1 = 40\ cm}$$
$$\mathbf{t_2 = 5\ s \ \rightarrow x_2 = 16\ cm}$$

A velocidade média será:

$$\boxed{v = v_{\text{média}} = \frac{D\,x}{D\,t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{16 - 40}{5 - 2} = \frac{-24}{3} = -8\ \text{cm/s}}$$

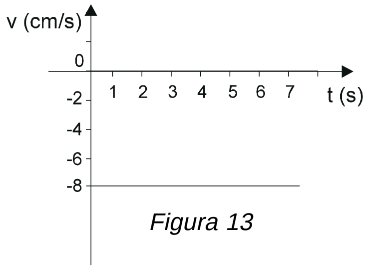


Figura 13

Como a velocidade é constante, e igual à – 8 cm/s o gráfico da velocidade é uma reta paralela ao eixo t como mostra a Figura 13.

A posição no instante t = 0 vale 56 cm, a função horária da posição vai ser portanto:

$$x = 56 - 8 \cdot t$$

Com auxílio dessa função, calculamos o instante que o objeto passa pela posição x = 20 cm:

$$\begin{aligned} 20 &= 56 - 8 \cdot t \\ 20 - 56 &= -8 \cdot t \\ -36 &= -8 \cdot t \\ t &= 4{,}5 \text{ s} \end{aligned}$$

Podemos calcular também **a posição, x** no instante t = 3,5 s

$$\begin{aligned} x &= 56 - 8 \cdot 3{,}5 \\ x &= 56 - 28 \\ x &= 28 \text{ cm} \end{aligned}$$

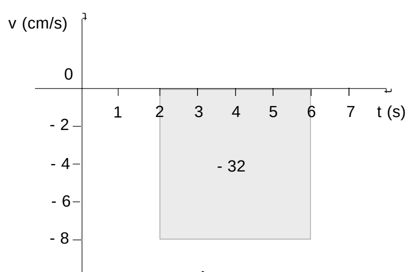


Figura 14

Calculando-se a área do retângulo no gráfico da velocidade entre os instantes t = 2 s e t = 6 s (Figura 14), vemos facilmente que esse valor é: –32 cm. Isso pode ser verificado observando que, entre esses dois instantes, o objeto foi da posição 40 cm para a posição 8 cm. Isto é, voltou 32 cm.

Passo a passo

Pedro mora em São Pedro da Aldeia que fica a 200 km de São João das Almas onde mora João. Exatamente entre as duas cidades, está Meiópolis, outra cidade da região. Um carro está a 40 km de São Pedro e vai para São João por uma estrada reta, com velocidade constante de 80 km/h. Depois de quanto tempo vai passar por Meiópolis e quando vai chegar em São João?

Em geral, os problemas sobre movimento retilíneo uniforme têm um aspecto semelhante ao descrito acima. Para resolvê–lo, necessitamos definir um **referencial**. Como dissemos anteriormente, qualquer pessoa pode definir o **seu** sistema de referência. Suponhamos que Pedro tivesse definido um e João, um outro. Veremos que as respostas às questões vão ser as mesmas.

Figura 15

Pedro pensou assim:

Vou medir as distâncias a partir de São Pedro. O carro partiu de uma posição situada a 40 km daqui, então, sua posição inicial x_0 será 40. À medida que o tempo passa, os valores da posição vão aumentando. Então sua velocidade v é positiva, e vale 80 km/h. Logo, a função horária da posição vai ser:

$$\mathbf{x}_{\mathbf{Pedro}} = 40 + 80 \cdot t$$

Com essa função, eu posso calcular em que instante o carro vai passar por Meiópolis. Basta que eu faça $\mathbf{x}_{\mathbf{Pedro}}$ = 100 km, pois Meiópolis está a 100 km daqui. Então:

$$100 = 40 + 80 \cdot t$$
$$100 - 40 = 80\,t$$
$$60 = 80\,t$$
$$t = \frac{3}{4}\ h = 45\ min$$

E vai chegar em São João quando $\mathbf{x}_{\mathbf{Pedro}}$ = 200 km

$$200 = 40 + 80 \cdot t$$
$$200 - 40 = 80\,t$$
$$160 = 80\,t$$
$$t = 2\ h$$

João pensou assim:

Vou medir as distâncias a partir de São João. O carro partiu de uma posição situada a 160 km daqui, então sua posição inicial x_0 será 160. A medida que o tempo passa, os valores da posição vão diminuindo. Então sua velocidade v é negativa, e vale 80 km/h. Logo, a função horária da posição vai ser:

$$\mathbf{x}_{\mathbf{João}} = 160 - 80 \cdot t$$

Com essa função eu posso calcular em que instante o carro vai passar por Meiópolis. Basta que eu faça $\mathbf{x}_{\mathbf{João}}$ = 100 km, pois Meiópolis está a 100 km daqui. Então:

$$100 = 160 - 80 \cdot t$$
$$100 - 160 = -\,80\,t$$
$$-\,60 = -\,80\,t$$
$$t = \frac{3}{4}\ h = 45\ min$$

E, vai chegar em São João quando $\mathbf{x}_{\mathbf{João}}$ = 0 km pois eu conto as distâncias à partir daqui. Então:

$$0 = 160 - 80 \cdot t$$
$$-\,160 = -\,80\,t$$
$$t = 2\ h$$

Como podemos ver, os resultados obtidos foram idênticos apesar das funções horárias serem diferentes. As funções horárias dependem do referencial que cada pessoa constrói. Porém, desde que o raciocínio seja coerente, os resultados para as questões vão ser os mesmos.

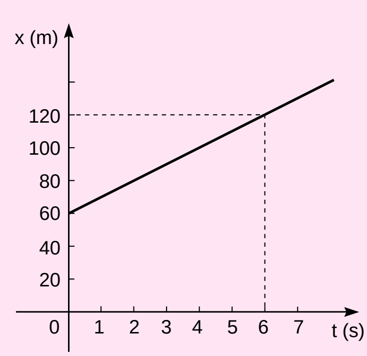
Exercício 1

Um carro anda 160 km em 2 horas. Qual sua velocidade média? Qual a distância que ele percorre em 4 horas? Se essa velocidade for mantida, quanto tempo gastará para percorrer 400 km?

Exercício 2

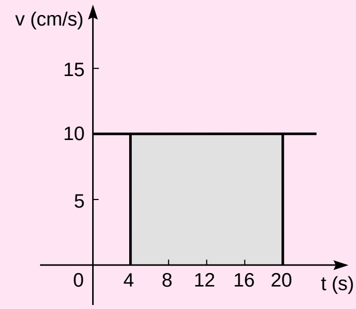
Um objeto está se movendo numa trajetória retilínea e suas posições com relação ao tempo estão dadas no gráfico da figura abaixo. Determine:

a) Sua posição no instante t = 0 ($\mathbf{x}_0$).
b) Sua velocidade média.
c) Sua função horária.
d) Sua posição no instante t = 10 s.
e) Quando passa pela posição x = 180 m.



Exercício 3

Um objeto move–se em uma trajetória retilínea. O gráfico de sua velocidade está na figura abaixo.



a) Qual o valor de sua velocidade?

b) Qual seu deslocamento entre os instantes t = 4 s e t = 20 s?

Exercício 4

Um objeto se move sobre uma trajetória retilínea. As posições ocupadas por esse objeto, com relação ao tempo, estão dadas na tabela. Determine:

TABELA 7

T (S)	X (M)
1	10
2	15
3	20
4	25
5	30

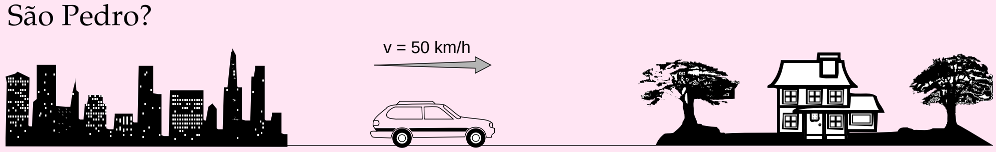
a) A função horária da posição.

b) A posição no instante t = 12 s.

c) O instante no qual a posição vale 80 m.

Exercício 5

Considere um problema semelhante ao do exemplo descrito no texto. Nesse caso, o carro está indo de São João para São Pedro, com uma velocidade de 50 km/h. Em que instante vai passar por Meiópolis e quando vai chegar em São Pedro?



PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que para localizar um ponto precisamos saber uma, duas ou três distâncias do mesmo até um ponto fixo (referencial);
- que um corpo em movimento, pode ser localizado por meio de uma relação chamada função horária;
- como obter a função horária para um corpo movendo-se com velocidade constante;
- como descrever esse movimento por meio de gráficos e tabelas.

AULA

4

Acelera Brasil!

PARA COMEÇAR

Suponhamos que tenha sido realizado um estudo que avalia dois novos veículos do mercado: o Copa e o Duna.

As pesquisas levantaram os seguintes dados:

TABELA 1

VEÍCULO	COPA	DUNA
Velocidade máxima	50 m/s (180 km/h)	50 m/s (180 km/h)
Velocidade após 10 segundos	30 m/s (108 km/h)	20 m/s (72 km/h)

Levando em conta apenas essas informações, você seria capaz de responder: **qual é o melhor**?

Para poder responder, é preciso analisar as informações fornecidas.

- Quanto à **velocidade máxima atingida** os dois podem andar no máximo a 180 km/h: houve empate e não podemos responder à pergunta.
- Quanto à **velocidade do veículo após 10 segundos** são diferentes nos dois casos, mas para afirmar qual é o melhor precisamos saber o que indica essa medida, isto é, entender o seu **significado**.

Fique ligado

Entendendo mais sobre a pesquisa

Veja como ela foi realizada: inicialmente os veículos estavam parados; portanto suas velocidades eram nulas (zero). Num dado momento, o juiz deu a largada e os dois partiram numa **pista reta**.

O primeiro fato importante que você deve observar é que a velocidade deixa de ser nula após a largada. Isso quer dizer que houve **variação da velocidade**.

O segundo fato importante é que no **mesmo tempo** (10 segundos) o Copa atinge 30 m/s e o Duna apenas 20 m/s.

A segunda medida relaciona duas grandezas: **a variação da velocidade** e **o tempo gasto para ocorrer essa variação**. Observe a Tabela 2.

TABELA 2

VEÍCULO	COPA	DUNA
Velocidade inicial	0	0
Velocidade final	30 m/s	20 m/s
Variação da velocidade	30 m/s	20 m/s
Intervalo de tempo	10 s	10 s

Veja que a velocidade do Copa variou de **0 a 30 m/s** e a velocidade do Duna variou de **0 a 20 m/s nos mesmos 10 segundos!**

Você já sabe qual é a velocidade de cada veículo após 10 segundos, mas...

O que ocorre com a velocidade a cada instante?

TABELA 3

COPA		DUNA	
v (m/s)	t (s)	v (m/s)	t (s)
0	0	0	0
6	2	4	2
12	4	8	4
18	6	12	6
24	8	16	8
30	10	20	20

A Tabela 3 indica, para alguns instantes, o valor da **velocidade** marcada pelo velocímetro. Observe que, à medida que o tempo passa, a velocidade varia para ambos os veículos.

Observe que num mesmo instante, a velocidade do Copa é **maior** do que a do Duna. Pode-se dizer que o Copa é melhor, porque "arranca" mais rápido.

Uma nova grandeza física

Quando falamos em "arranque", na verdade estamos nos referindo à relação entre duas grandezas: **variação da velocidade** e **tempo**. Essa nova grandeza, que nos ajudou a decidir qual dos dois é o melhor é uma grandeza física e recebe o nome de **aceleração**.

Aceleração é uma medida da variação da velocidade de um corpo num certo intervalo de tempo.

Esse é o **conceito de aceleração**. Pode-se também definir aceleração com a ajuda da Matemática. Como calcular a aceleração?

Pegue, na Tabela 3, o valor da velocidade em dois instantes quaisquer e calcule inicialmente a variação da velocidade (Δv), isto é, a diferença entre as duas e o intervalo de tempo correspondente (Δt). Por exemplo, para o Copa:

$$\begin{aligned} t_1 &= 2s \quad \text{e} \quad v_1 = 6\ m/s \\ t_2 &= 8s \quad \text{e} \quad v_2 = 24\ m/s \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \Delta v &= v_2 - v_1 = 24 - 6 = 18 \\ \Delta t &= t_2 - t_1 = 8 - 2 = 6 \end{aligned}$$

Para calcular a aceleração, basta dividir essa variação pelo intervalo de tempo necessário para que ela ocorra. Definimos:

$$\boxed{\text{Aceleração} \Rightarrow a = \frac{\Delta v}{\Delta t}}$$

Assim teremos:

$$a = \frac{18}{6} = 3(?)$$

Qual a unidade usada para a grandeza **aceleração**?

Uma unidade para a aceleração

Veja que a grandeza aceleração vem da combinação de duas outras grandezas: **velocidade** e **tempo**, portanto a sua unidade é obtida a partir das unidades dessas duas grandezas. Observe que a velocidade do Duna varia "dois metros por segundo" a cada "segundo", assim teremos "metro por segundo por segundo", abreviando $m/s \cdot s$ ou m/s^2.

De forma geral, a unidade da aceleração é dada por uma unidade de comprimento dividida por uma unidade de tempo ao quadrado.

Portanto, a aceleração do Copa é 3 m/s^2. **Lembre-se**: uma grandeza física deve sempre vir acompanhada de sua unidade (Aula 2).

Nesse caso, se você calcular a aceleração para dois instantes de tempo **quaisquer** irá obter **sempre o mesmo valor**. Isso quer dizer que **a aceleração não varia**. Podemos concluir que:

Nesse movimento a aceleração é constante.

Verifique essa afirmação calculando a aceleração para quatro intervalos de tempo diferentes para o Copa e quatro para o Duna.

Outra maneira de representar um conjunto de dados

Os dados da Tabela 3 podem ser representados por um gráfico, basta marcar os valores de **v** e **t**, isto é, v_1 e t_1,v_2 e t_2,v_3 e t_3,v_4 e t_4,v_5 e t_5 e uni-los com uma reta:

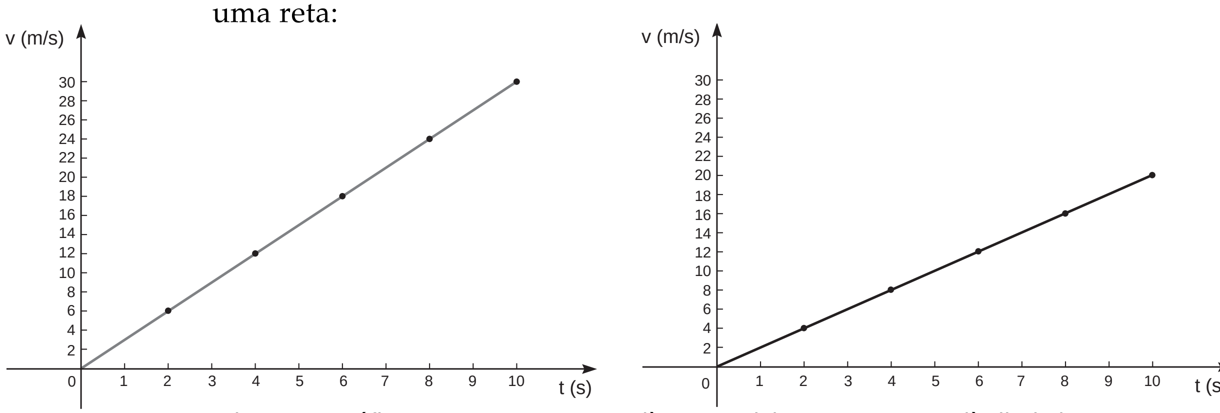


Figura 1. Gráficos v X t para o Copa (à esquerda) e para o Duna (à direita).

Você viu como calcular a aceleração a partir dos dados da Tabela 3. Viu que, com esses mesmos dados, foi construído o gráfico da Figura 1. Portanto o gráfico e a tabela **representam o mesmo conjunto de dados**. Logo, deve ser possível obter o valor da aceleração a partir do gráfico. Agora, observe o gráfico da Figura 2, que mostra a velocidade do Duna em função do tempo.

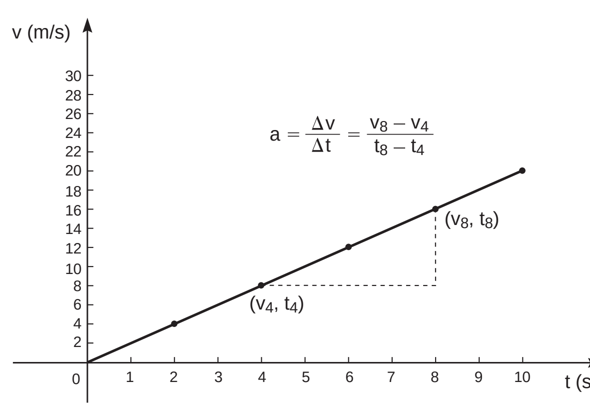


Figura 2. Gráfico v X t para o Duna.

Tome dois pontos, por exemplo os pontos (v_4 e t_4) e (v_8 e t_8).

Pela definição, a aceleração é obtida dividindo-se a variação da velocidade (representada pela linha pontilhada vertical) pelo intervalo de tempo (representado pela linha pontilhada horizontal). Assim teremos:

$$a = \frac{16 - 8}{8 - 4} = \frac{8}{4} = 2 \text{ m / s}^2$$

Observe o gráfico da Figura 3; nele estão representadas as retas que descrevem as velocidades do Copa e do Duna em função do tempo.

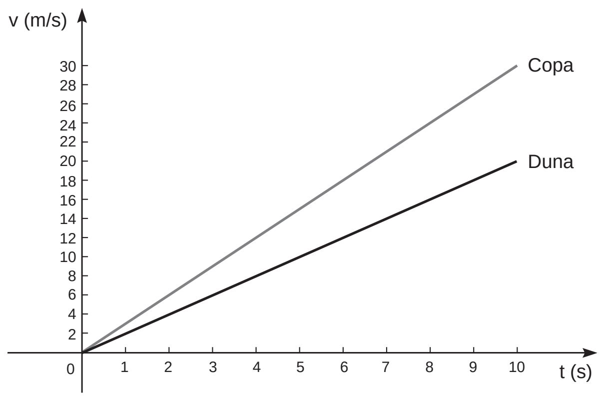


Figura 3. Gráfico de v X t do Copa e do Duna.

Observe que a reta que representa o movimento do Copa é mais inclinada, e lembre-se de que ele tem maior aceleração. Portanto, pode-se afirmar que:

Num gráfico de velocidade em função do tempo v X t (que se lê "v versus t"), quanto maior for a aceleração mais inclinada será a reta que representa o movimento.

Prevendo resultados

TABELA 4	
v (m/s)	t (s)
$v_0 = 3$	$t_0 = 0$
$v_1 = 6$	$t_1 = 1$
$v_2 = 9$	$t_2 = 2$
$v_3 = 12$	$t_3 = 3$
$v_4 = 15$	$t_4 = 4$

Será possível conhecer a velocidade dos veículos em outros instantes, por exemplo, quando t = 9 segundos?

A resposta é sim! Mas como? Veja: num certo momento, o co-piloto do Copa decidiu anotar os valores da velocidade, porém, o veículo **já estava em movimento naquele instante**. Observe na Tabela 4 os dados que ele anotou.

Você já conhece duas maneiras de representar um conjunto de dados: através de tabelas e de gráficos; mas existe outra!

Vamos calcular outra vez a aceleração do Copa, agora escolhendo o par (v_4, t_4) da tabela 4 e um par (v,t) qualquer:

$t_4 = 4\text{s}$ e $v_4 = 15 \text{ m/s}$
t e v

Podemos escrever: $a = \dfrac{v - 15}{t - 4}$

Sabemos que a aceleração do Copa é 3 m/s², assim:

$$3 = \frac{v - 15}{t - 4}$$

ou seja, $v - 15 = 3\,(t - 4)$

$v - 15 = 3 \cdot t - 12$

então: $\boxed{v = 3 + 3 \cdot t}$

Essa função matemática fornece o valor da velocidade em função do tempo. Ela é chamada de **função horária da velocidade** que descreve o movimento do copa, que recebe o nome de Movimento Retílineo Uniformemente Variado (MRUV). Retilíneo, pois o veículo anda em linha reta; variado, pois sua velocidade varia; e uniformemente vem do fato de a aceleração ter sempre o mesmo valor e, portanto, a velocidade varia sempre da mesma forma(uniforme).

Note que, para o instante t = 0s, obtém-se $v_0 = 3$ m/s; e, se você observar a Tabela 4, verá que essa é a velocidade inicial, isto é, no instante em que o co-piloto iniciou as anotações!

De uma maneira geral, podemos escrever para a velocidade **v** num instante **t** qualquer:

$$\boxed{\mathbf{v = v_0 + a \cdot t}}$$

onde $\mathbf{v_0}$ é a velocidade inicial (em t=0) e **a** é a aceleração, que é constante.

Agora é possível responder qual o valor da velocidade quando t = 9 s! É só substituir o tempo na função horária da velocidade:

$$v_9 = 3 + 3 \cdot 9 = 3 + 27 = 30 \text{ m/s}$$

Como saber onde o veículo estará num certo instante?

Na aula passada, você estudou o Movimento Retilíneo Uniforme (MRU), caso em que a velocidade não varia, ela é constante. Para descrever o MRU você estudou apenas como varia a **posição** em função do tempo.

Nesta aula você está estudando um movimento em que, além de a posição variar, varia também a velocidade.

Mas como varia a **posição no MRUV**? É claro que ela varia, pois esse fato caracteriza um estado de movimento!

Você é capaz de se lembrar como foi calculado o deslocamento do carro no MRU?

Foi pelo gráfico da velocidade em função do tempo (v X t): a área da figura formada pelo gráfico fornece o deslocamento.

Pode-se fazer de forma semelhante para o caso do MRUV. O quadro, no final da aula, indica, passo a passo, como obter a função horária da posição do MRUV:

$$\boxed{\mathbf{x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2}}$$

onde $\mathbf{x_0}$ é a posição inicial, $\mathbf{v_0}$ é a velocidade inicial, e **a** é a aceleração.

Nesse caso, como será o gráfico da posição em função do tempo? Você espera que seja uma reta como no MRU?

Note que essa função é diferente daquela obtida para a velocidade: ela contém uma terceira parcela proporcional ao quadrado do tempo (t^2). Isso faz com que o gráfico não seja mais uma reta, mas uma curva.

Para construir o gráfico de posição (x) por tempo (t) a partir da função é útil, inicialmente, fazer uma tabela que indique os valores de x e **t**. Para encontrar as posições, basta substituir o tempo na função e calcular o valor de x!

Mas é preciso também conhecer o valor de x_0 e v_0.

Tome, por exemplo, a Tabela 4. No instante inicial, isto é, quando começam a anotar os valores de **v**, a velocidade era 3 m/s; portanto, v_0 = 3 m/s. Suponha que nesse instante o carro passou pelo marco 100 m da pista. Portanto, x_0 = 100 m. Lembre-se de que a aceleração do Copa, nesse exemplo é a=3 m/s^2.

Substituindo esses valores na função horária da posição temos:

$$\boxed{x = 100 + 3 \cdot t + 1{,}5 \cdot t^2}$$

Essa função descreve o **movimento do Copa** e fornece sua posição **x** em qualquer instante de tempo **t**.

Como exemplo, vamos calcular a posição no instante t = 2 s.

$$x = 100 + 3 \cdot 2 + 1{,}5 \cdot 2^2$$
$$x = 100 + 6 + 6 = 112 \text{ m}$$

Prosseguindo dessa maneira, é possível obter os outros valores e montar a Tabela 6:

TABELA 6

v (m/s)	t (s)
x_0 = 100	t_0 = 0
x_1 = 104,5	t_1 = 1
x_2 = 112	t_2 = 2
x_3 = 122,5	t_3 = 3
x_4 = 136	t_4 = 4
x_5 = 152,5	t_5 = 5

Agora é possível construir o gráfico da posição em função do tempo:

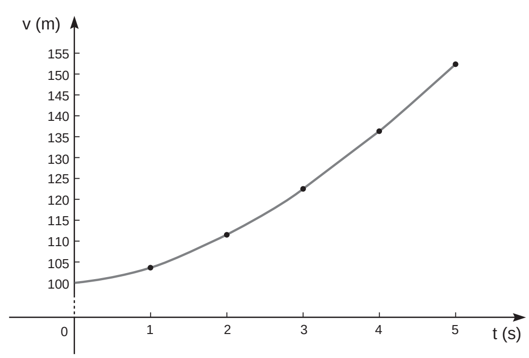


Figura 4

Observe que não se obtém mais uma reta: o gráfico é uma curva, que tem o nome de **parábola.**

É possível também representar as posições do veículo por intermédio de um eixo orientado, (lembre-se da Aula 3).

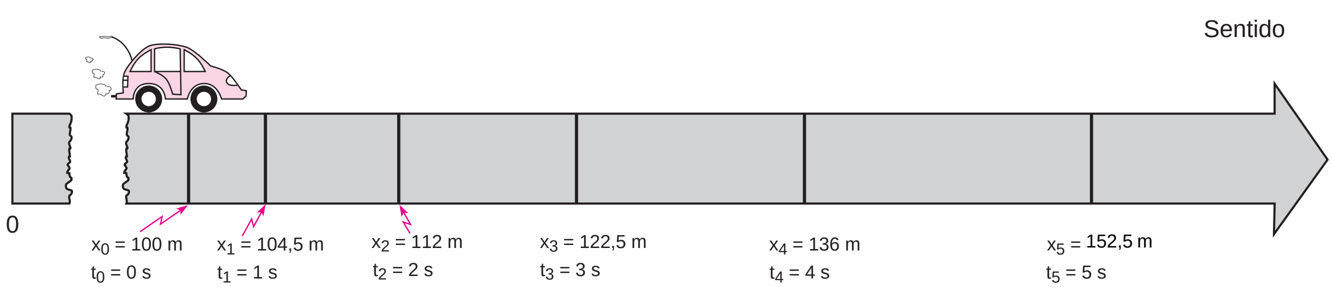


Figura 5

Observe na Figura 5 que, nesse caso, os deslocamentos aumentam com o tempo: a cada segundo o deslocamento é maior do que no instante anterior. Isso indica que a velocidade está aumentando: o movimento é variado, nesse caso dizemos que ele é **acelerado**.

Breeeeeca!

TABELA 5

v (m/s)	t (s)
$v_0 = 30$	$t_0 = 0$
$v_1 = 25$	$t_1 = 1$
$v_2 = 20$	$t_2 = 2$
$v_3 = 15$	$t_3 = 3$
$v_4 = 10$	$t_4 = 4$
$v_5 = 5$	$t_5 = 5$
$v_6 = 0$	$t_6 = 6$

No meio da pista havia um cachorro, havia um cachorro no meio do pista! De repente o piloto do Copa avistou o animal e rapidamente acionou os freios. Sem perder tempo, o seu co-piloto anotou os valores da velocidade:

Note que a velocidade agora está **diminuindo**: o veículo está freando!

Qual será agora o valor da aceleração nesse caso? Pegue, por exemplo:

$$t_1 = 1\text{ s} \text{ e } v_1 = 25\text{ m/s}$$
$$t_4 = 4\text{ s} \text{ e } v_4 = 10\text{ m/s}$$

Calculando a aceleração:

$$a = \frac{v_4 - v_1}{t_4 - t_1} = \frac{10 - 25}{4 - 1} \qquad \text{então: } a = -5\text{ m/s}^2$$

Observe que o valor da aceleração é negativo! O sinal da aceleração é oposto ao da velocidade (que é positiva). Isso indica que o movimento é **desacelerado**, isto é, o carro está freando.Observe o gráfico v X t nesse caso:

Veja que a reta tem uma inclinação diferente do caso em que o movimento é acelerado quando a velocidade cresce.

Abaixo estão representados os gráficos v X t para os três casos; quando o movimento é **acelerado** ($a > 0$); quando é **desacelerado** ($a < 0$), ambos exemplos de Movimento Retilíneo Uniformemente Variado e; no caso especial, quando a aceleração é nula ($a = 0$): nesse caso, a velocidade não varia e temos um exemplo de Movimento Retilíneo Uniforme – MRU (Aula 3).

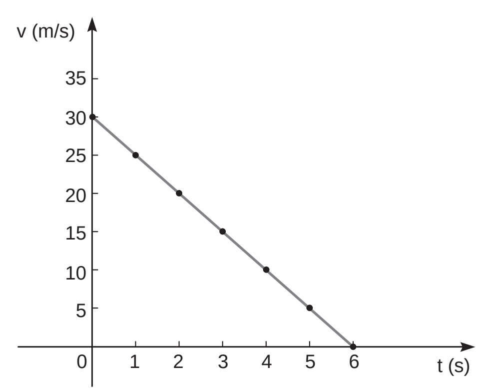
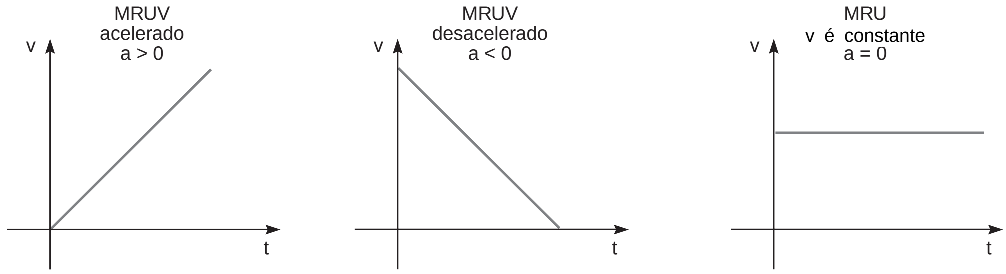


Figura 6



(a) MRUV acelerado; (b) MRUV desacelerado; (c) MRU.

Figura 7

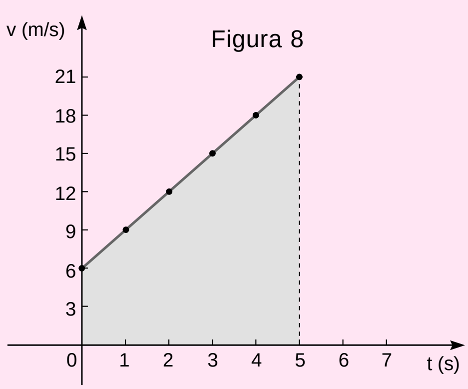
DEDUÇÃO DA FUNÇÃO HORÁRIA DA POSIÇÃO DO MRUV

Imagine que num certo instante, após a largada, o co-piloto do Copa decide anotar alguns valores da velocidade. Olha para o velocímetro e verifica que naquele instante a velocidade do veículo é 6 m/s; assim, essa é a sua "velocidade inicial". Anota os dados:

t (s)	v (m/s)
0	6
1	9
2	12
3	15
4	18
5	21

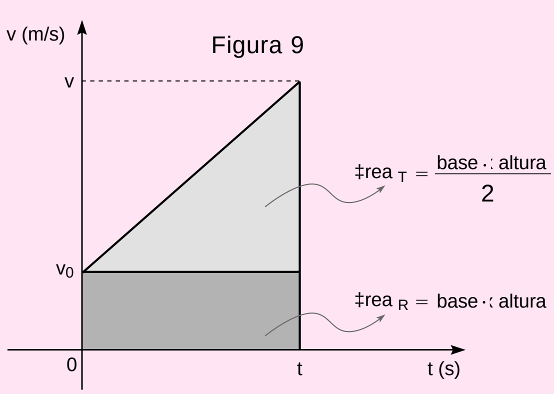
Observe que
Quando começou a anotar os valores de v o carro já estava em movimento, portanto, v_0 não é zero! Com esses dados constrói-se o gráfico (Figura 8):

Figura 8



Para se calcular a distância percorrida pelo carro, basta calcular a área da figura, que é um trapézio! Ela pode ser pensada como "um triângulo e um retângulo"! Assim fica fácil calcular a área!

Figura 9



A base do retângulo corresponde ao intervalo de tempo Δt e a altura corresponde a v_0 . Portanto, a área será:

$$\text{área}_R = \text{base} \cdot \text{altura} = \Delta t \cdot v_0$$

$$\text{área}_R = v_0 \cdot t$$

pois foi escolhido $t_0 = 0s$.

O triângulo tem base Δt e altura Δv, que é a velocidade final menos a velocidade inicial naquele trecho. Portanto, a área do triângulo será:

$$\text{área}_T = \frac{\text{base} \times \text{altura}}{2} = \frac{\Delta v \times \Delta t}{2}$$

usando a definição de aceleração

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{ou } \Delta v = a\ \Delta t$$

$$\text{área}_T = \frac{a \times \Delta t \times \Delta t}{2}$$

Lembrando que $t_0 = 0$ (portanto, $\Delta t = t$) e que $v\ (t_0) = v_0$, pode-se escrever a área do triângulo como:

$$\text{área}_T = \frac{a \times t^2}{2}$$

E a área do trapézio, que é a soma das duas será:

$$\text{área}_{total} = v_0 \cdot t + \frac{1}{2}\ a \cdot t^2$$

Como a área representa o deslocamento ($x_0 - x$), finalmente obtém-se:

$$\boxed{x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2}\ a \cdot t^2}$$

A expressão matemática que acabamos de obter permite conhecer a posição **x** num instante **t** qualquer, desde que se conheçam a posição inicial (x_0), a velocidade inicial (v_0) e a aceleração (a).

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- existe uma grandeza física, a **aceleração**, que relaciona mudança de velocidade e tempo, e que, como todas as grandezas físicas, possui uma unidade;
- além do Movimento Retilíneo Uniforme (MRU), onde a velocidade se mantém constante, existe um outro tipo de movimento, Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV), no qual a velocidade varia, porém de maneira uniforme, o que implica que a **aceleração é constante**;
- a aceleração pode ser definida matematicamente;
- existem funções matemáticas para descrever esse movimento que permitem prever posições e velocidades em qualquer instante;
- que tabelas, gráficos e funções são diferentes maneiras de se representar um conjunto de dados, como posições e velocidades em função do tempo;
- se obtém a aceleração a partir da tabela (v,t) e por meio do gráfico (vXt).

Exercício 1

Nesta aula você deve ter calculado alguns valores da aceleração e verificou que ela é constante. Como é o gráfico da aceleração em função do tempo?

Exercício 2

As posições de um trem, que percorre uma estrada reta, variam de acordo com a função: $x = 100 + 20\,t + 2\,t^2$

onde as posições são dadas em metros e o tempo em segundos, responda, sem se esquecer das unidades:

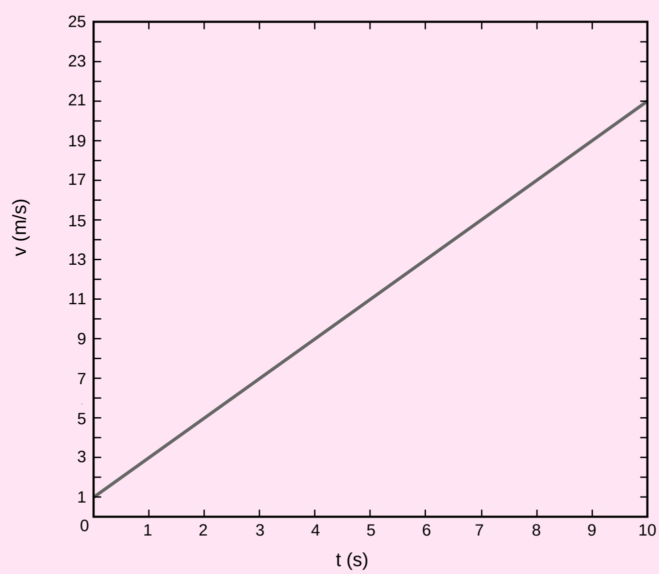
a) Qual a posição inicial do trem, isto é, onde ele se encontrava quando t = 0 s?
b) Qual é a velocidade inicial do trem?
c) Qual é o valor da sua aceleração?
d) Em que posição deverá estar no instante t = 4 s?

Exercício 3

Para o trem do Exercício 2, escreva a equação horária da velocidade e verifique qual a velocidade do trem no instante t = 5 s.

Exercício 4

É dado o gráfico da velocidade em função do tempo de um ciclista que se move em linha reta.



Responda:

a) A velocidade do ciclista é constante? Qual o tipo de movimento que ele realiza?
b) Qual a velocidade inicial do ciclista?
c) Qual o valor da sua aceleração?
d) Escreva a função horária da velocidade que representa este movimento.

Exercício 5

Suponha que o ciclista do exercício 4 se encontre inicialmente (t = 0) no marco 100 m de uma pista. Pede-se:

a) A função horária da posição.
b) Qual a posição do ciclista no instante t = 5 s?

AULA

5

Tudo que sobe, desce

PARA COMEÇAR

Rio de Janeiro, temperatura altíssima, tumulto na praia, começa o corre-corre! Dizem que é um arrastão! A polícia chega e a correria se torna desordenada, quando alguém dá um tiro para cima...

Essa é uma cena que, infelizmente, temos visto ocorrer diversas vezes, não só no Rio de Janeiro como em várias metrópoles do mundo. Algumas vezes alguém sai ferido com uma bala perdida, que, normalmente, ninguém sabe de onde veio, nem se foi intencional.

Uma das causas mais conhecidas dessas “balas perdidas” são os tais “tiros pra cima”, quando alguém pega seu revólver, aponta para cima e dá um tiro. Mas, como diz o ditado:

Tudo que sobe, desce!

Não podemos saber a origem de todas as balas perdidas, mas podemos nos perguntar, em alguns casos especiais, qual pode ter sido sua origem.

Podemos nos perguntar como os objetos jogados para cima, perto da superfície da Terra, retornam ao solo. Essa pergunta vem sendo feita há muito tempo, desde a Grécia antiga até os dias de hoje!

Uma resposta satisfatória começou a ser dada por um físico chamado Galileu Galilei. Como vimos, na Aula 1, Galileu criou condições, ou seja, criou uma experiência em que se pudesse verificar se um corpo mais “pesado” caía mais rápido do que um mais “leve”.

Galileu chegou à conclusão de que, quando a resistência do ar influi pouco:

Corpos diferentes soltos da mesma altura caem juntos e atingem o chão ao mesmo tempo.

Isso a princípio, pode parecer um absurdo, pois como se diz por aí “os corpos mais pesados caem mais rápido do que os mais leves”. E mais ainda: na nossa experiência diária não vemos essa afirmativa de Galileu acontecer.

Aqui está um dos triunfos do **método experimental!** Nem sempre podemos ver certos fenômenos em nossa experiência diária, pois eles só ocorrem em situações muito especiais. **Criar uma experiência é na verdade criar condições para que um fenômeno ocorra!** Fenômeno esse que nem sempre é fácil de observar. Lembre-se do Passo-a-passo da Aula 1.

Caindo! – A queda livre

Fique ligado

Vamos começar a estudar de modo mais sistemático o movimento de queda de corpos perto da superfície da Terra.

Um dos problemas encontrados ao se fazer esse tipo de estudo é a atmosfera. Como vimos em nossas experiências na seção **com a mão na massa** (Aula 1), a atmosfera influencia o movimento dos corpos em queda, alterando seu movimento. Para controlar esse problema com mais eficiência, elimina-se a atmosfera, ou pelo menos torna-se desprezível seu efeito sobre o movimento dos corpos. Para isso,usa-se uma **bomba de sucção**, que retira quase todos os gases presentes num recipiente, chegando, então, ao que chamamos de **vácuo**.

Ao compararmos a queda de dois corpos, de massas diferentes, gostaríamos de fazer algumas medidas, como, por exemplo, as distâncias percorridas em cada intervalo de tempo. Para isso, fotografamos a queda de dois corpos com uma lâmpada especial, chamada **estroboscópica,** que "pisca" em intervalos de tempo bem definidos (1/30 s), permitindo obter seqüências de fotos como as da Figura 2.

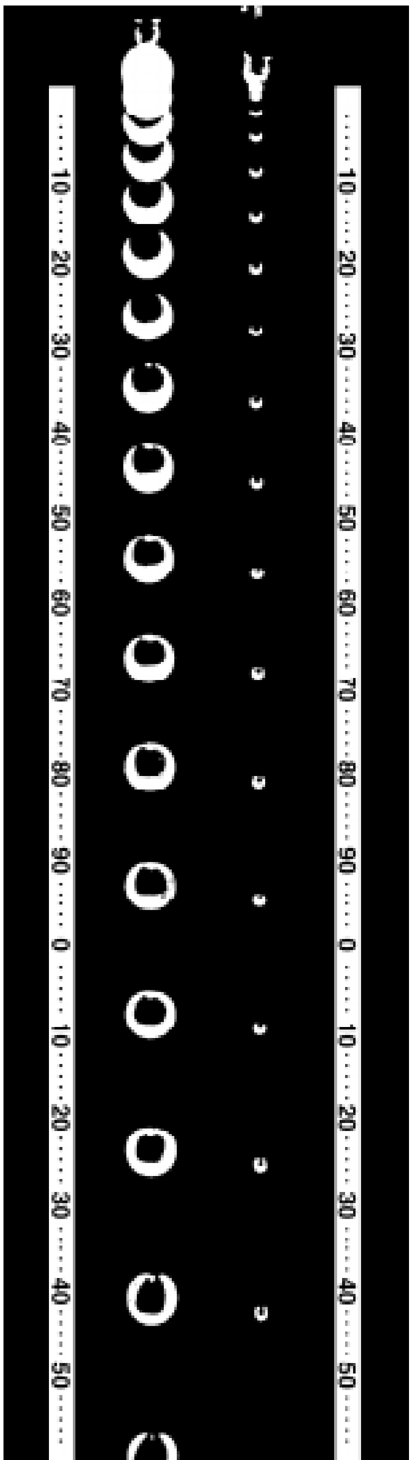


Figura 2

Podemos ver nas fotos que as duas bolas caem simultaneamente, tal como afirmou Galileu. E, uma vez que caem juntas, podemos medir a distância por elas percorrida em cada intervalo de tempo, e verificamos que essa distância é a mesma. Mas é preciso notar que a distância entre duas posições sucessivas vai aumentando. E, se elas percorrem, a cada intervalo de tempo, distâncias cada vez maiores, significa que a **velocidade está aumentando!**

Mas sabemos que, se a velocidade varia no tempo significa que existe uma **aceleração**.

Uma forma de se medir a aceleração desses corpos é pela **velocidade média em cada intervalo de tempo**. Com uma régua, medimos a distância entre duas posições consecutivas de uma das bolas.

Podemos então construir uma tabela com os dados obtidos:

TABELA 1

NÚMERO DO INTERVALO	DESLOCAMENTO	VELOCIDADE MÉDIA	VARIAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA	ACELERAÇÃO
	$\Delta x\,(cm)$	$\frac{\Delta x}{\Delta t} = (cm/s)$	$\Delta v\,(cm/s)$	$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a\,(m/s^2)$
1	7,70	231		
2	8,75	263	32	9,6
3	9,80	294	31	9,3
4	10,85	326	32	9,6
5	11,99	360	34	10,3
6	13,09	393	33	9,9
7	14,18	425	32	9,6
8	15,22	457	32	9,6
9	16,31	489	32	9,6
10	17,45	524	35	10,5
11	18,52	556	32	9,6
			ACELERAÇÃO MÉDIA	9,8

Na quarta coluna está calculada a **variação da velocidade em cada intervalo de tempo** e algo surpreendente acontece: essa variação tem quase o mesmo valor, podemos dizer que a variação da velocidade em cada intervalo de tempo é constante**,** logo, como vemos na quinta coluna a aceleração é praticamente constante.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{v_3 - v_2}{\Delta t} = \frac{v_4 - v_3}{\Delta t} = \ldots = g \Rightarrow \text{CONSTANTE}$$

Se medirmos essa aceleração com bastante cuidado, e por várias vezes, teremos o valor aproximado de **9,8 m/s²**. Isto significa que, independente da massa e desprezando a interferência da atmosfera, a velocidade dos corpos em queda, perto da superfície da Terra, aumenta de 9,8 m/s a cada segundo. Chamaremos de agora em diante essa aceleração especial de

Aceleração da gravidade $\Rightarrow$ g

A aceleração da gravidade é uma das formas de se verificar que a Terra exerce, sobre os corpos, uma atração chamada “atração gravitacional” (trataremos desse assunto algumas aulas mais adiante).

Como para os problemas que vamos abordar, não precisamos de medidas muito precisas, podemos aproximar a aceleração da gravidade para $\mathbf{g = 10\ m/s^2}$.

Descendo – cinemática da queda livre

Chamaremos, a partir de agora, todo **movimento retilíneo** de descida, que ocorre nas proximidades da superfície da Terra, de **queda livre**.

Com as informações que já temos sobre o movimento de queda livre, podemos concluir que é um **Movimento Retilíneo Uniformemente Variado**, pois sua velocidade varia sempre da mesma forma no tempo, ou seja, a **aceleração é constante**.

Tudo que aprendemos na aula passada serve para analisarmos o movimento de um corpo em queda livre. A **função horária da posição** será:

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

Onde, em vez de usarmos a letra **x,** para a posição, usamos a letra **y** para representar a altura, já que estamos trabalhando com o movimento de subida e descida (vertical).

É necessário dizer que **não importa a letra usada na expressão matemática.** O fundamental é saber que grandeza física a letra está representando.

E, neste caso, **y** representa uma **posição** no espaço!

A **função horária da velocidade** é: $v = v_0 + g t$

Com as equações horárias do movimento podemos saber a posição e a velocidade do objeto, em qualquer instante. E, com elas, somos capazes de prever alguns fenômenos.

Passo-a-passo

Um acidente comum na construção civil é o da **queda livre** de objetos (tijolos, ferramentas) do alto de edifícios em construção. Sabemos que, por exemplo, um tijolo tem uma aceleração $g = 10\ m/s^2$. Vamos supor que ele caiu do segundo andar do prédio e, que cada andar tem aproximadamente 2,5 metros de altura. Vamos agora descobrir com que velocidade ele chega no solo.

Como em todo problema de cinemática, precisamos, antes de qualquer coisa, definir o **referencial** utilizado para descrever o movimento. Uma das melhores maneiras para uma boa escolha de referencial é fazer um **esboço** da situação, colocando os **eixos de coordenadas**. Definine-se assim o sentido do que está caindo ou do que está subindo. Por exemplo:

Vamos medir a altura **y** a partir da posição inicial $\mathbf{y_0}$ no segundo andar. **y** cresce à medida que o tijolo cai, isto é, o eixo **y** tem o sentido "positivo", para baixo. Ou seja, **definimos** a origem (0) do sistema de coordenadas, a posição inicial $y_0 = 0$ (2° andar) e a posição final ao chegar no solo $y_{final} = 5$ m.

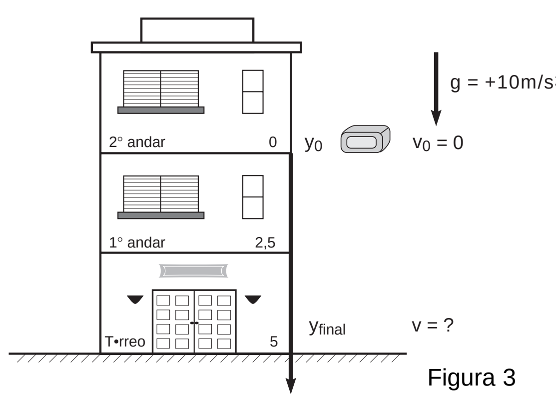


Figura 3

É possível definir o sentido positivo ou negativo, tanto para cima quanto para baixo. Escolhemos o sentido dos eixos, em cada situação diferente, de modo que nos facilite a compreensão do que está ocorrendo.

Sabemos, também, que inicialmente a velocidade do tijolo era zero ($v_0 = 0$).

Como vimos, nos movimentos retilíneos, o sinal da velocidade pode ser positivo ou negativo; isso significa que o corpo está se movimentando para um lado ou para o outro em relação à origem do sistema de coordenadas.

Com esses dados, podemos montar a **função horária da posição** do tijolo que caiu:

$$y = y_0 + v_0t^2 + \frac{1}{2}gt = 0 + 0t + \frac{1}{2}10t^2$$

$$\boxed{y = 5t^2}$$

Essa função relaciona a altura do tijolo em cada instante de tempo. Com as informações que temos, podemos saber quanto tempo demora para que o tijolo chegue ao chão. Usando a função horária da posição e substituindo y por 5, temos:

$$5 = 5t^2$$
$$t^2 = 1$$
$$\boxed{t = 1\ s}$$

O tijolo demora 1 segundo para atingir o solo. Esse tempo é, aproximadamente, o mesmo de reação de uma pessoa; ou seja, não daria tempo de avisar ninguém que estivesse embaixo!

Qual será a velocidade do tijolo ao chegar ao solo?

Podemos usar a **sua função horária da velocidade**. Sabemos qual é sua velocidade inicial e sua aceleração, portanto, podemos escrever:

$$v = v_0 + gt = 0 + 10t$$

$$\boxed{v = 10t}$$

Sabemos também que o tijolo demorou 1 segundo para chegar ao solo, dessa forma, a velocidade no instante em que chega ao solo será

$$\boxed{v = 10 \cdot 1 = 10\ m/s}$$

Tudo que sobe, desce – O tiro para cima

Com a experiência adquirida no Passo-a-passo da página anterior, vamos tentar resolver o problema do "tiro para cima". Vamos prever qual será o movimento da bala, sua posição e sua velocidade a cada instante. Temos de lembrar que estamos fazendo **um modelo, e que, estamos desprezando a interferência da atmosfera sobre o movimento.**

O que encontramos de diferente nesse caso é o fato de o objeto não estar sendo largado de uma certa altura; ao contrário, está sendo **lançado para cima** com uma **velocidade inicial diferente de zero!** Esse movimento é um MRUV, pois a aceleração, independentemente de o objeto estar subindo ou descendo, é **constante** e igual a **g**.

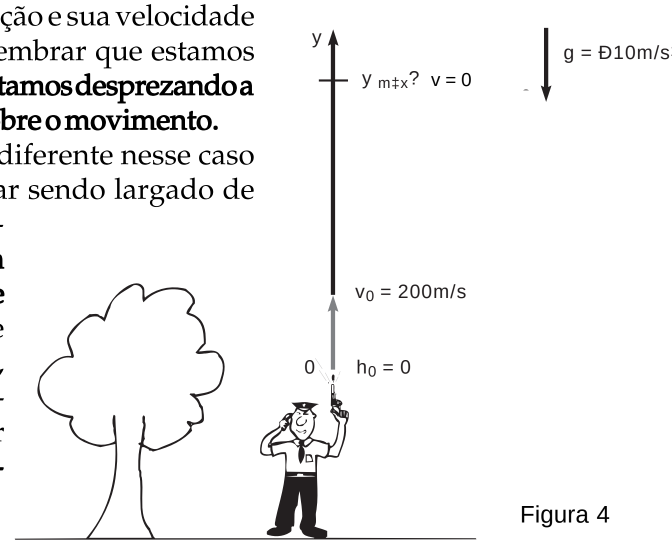


Figura 4

Vamos primeiro fazer um **esboço** da situação, e definir o **referencial** e o **sistema de coordenadas**. Neste caso fica mais fácil adotar como positivo o sentido que vai de baixo para cima.

Ao ser lançada, uma bala de revólver tem **velocidade inicial** de aproximadamente 200 m/s. Podemos definir que a **posição inicial** da bala é $y_0 = 0$, exatamente na boca do cano do revólver. Assim, a **função horária da posição** é:

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 = 0 + 200\,t + \frac{1}{2}(-10)\,t^2$$

$$\boxed{y = 200\,t - 5\,t^2}$$

O que significa o sinal negativo da aceleração $g = -10\ m/s^2$?

Lembre-se de que, o eixo de coordenadas foi orientado **positivamente para cima** e a aceleração da gravidade **sempre está dirigida para baixo** independente da escolha do referencial. E o mais fundamental é saber que, tendo a velocidade e a aceleração sinais contrários, a velocidade da bala diminui. Nesse caso a velocidade diminui de 10 m/s a cada segundo, **enquanto está subindo.**

A atração gravitacional age nos corpos sempre de cima para baixo, não importando o sentido escolhido para os eixos de coordenadas!

Podemos saber quanto tempo demora para que a bala desça novamente até sua posição inicial. Sabemos que a posição da bala, quando volta, é igual à posição inicial, ou seja:

$$y_{inicial} = y_{final} = 0$$

Assim, substituindo este valor na função horária da posição, obtemos:

$$0 = 200\,t - 5t^2$$
$$5t^2 - 200\,t = 0$$
$$\boxed{t = 40\ s}$$

que é o tempo que a bala leva para subir e descer.

Podemos saber, também, qual é a velocidade com que a bala volta ao solo, usando a função horária da velocidade:

$$v = v_0 + gt$$

$$\boxed{v = 200 - 10\,t}$$

Já sabemos que a bala volta ao solo após 40 segundos. A velocidade com que a bala chega ao solo calculada nesse instante será:

$$v = 200 - 10 \cdot 40 = 200 - 400$$
$$\boxed{\mathbf{v = -200\ m/s}}$$

Isso significa que a bala volta com a **mesma velocidade** com que partiu, mas no **sentido contrário**, ou seja, para baixo. Esse é o significado do sinal negativo da velocidade.

Podemos, ainda, saber qual é a altura máxima que a bala atinge. Sabemos que, antes que a bala volte, ela atinge uma altura máxima e, nesse instante, **ela pára de subir e começa a descer**. Isso significa que a velocidade **muda de sinal**, de positivo para negativo e, necessariamente, ela **passa pelo valor zero**.

Mas isso é óbvio. Todo corpo que jogamos para cima, sobe, **pára** no ponto mais alto, e desce.

Sabendo disso, voltamos à função horária da velocidade e descobrimos quanto tempo demora para que a bala chegue no ponto mais alto, pois sabemos que a velocidade da bala naquele momento é zero.

$$v = 0 \quad \Rightarrow \quad 0 = 200 - 10\, t_{y_{max}}$$
$$t_{y_{max}} = 20 \text{ s}$$

Verificamos que a bala leva exatamente a metade do tempo total para subir (20 s) e a outra metade para descer (20 s) totalizando os 40 s de subida e descida, calculado no início do problema.

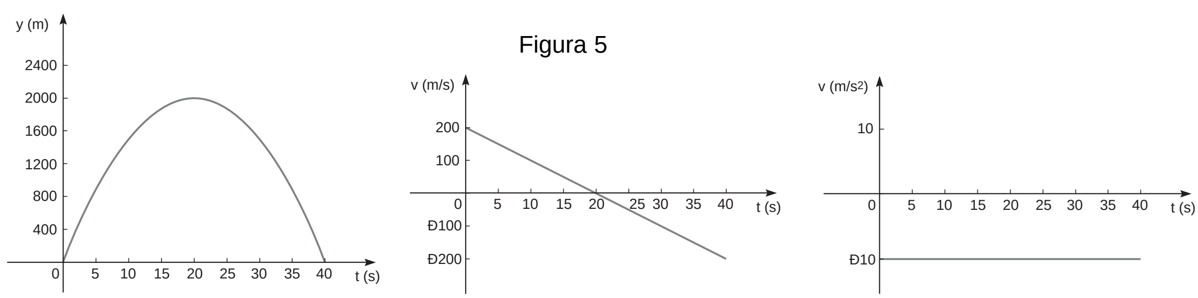
Tendo o instante em que a bala chega no ponto mais alto, podemos, com a função horária da posição, saber quanto vale essa **altura máxima**

$$y = 200\, t - 5\, t^2$$
$$y_{max} = 200 \cdot 20 - 5(20)^2$$
$$y_{max} = 2000 \text{ m}$$

Isto significa que a bala sobe 2 quilômetros antes de começar a cair.

Com os cálculos feitos, podemos construir os gráficos da **posição X tempo**, velocidade X tempo e aceleração X tempo para compreender melhor a situação:

Figura 5



(a) Posição X tempo (b) velocidade X tempo (c) aceleração X tempo

PARA TERMINAR

- Tudo o que sobe, desce, e do jeito que subiu! Portanto, muito cuidado, pode ser sobre a sua cabeça! É preciso se lembrar de que existe atmosfera e ela "amortece" o movimento da bala, diminuindo sua velocidade, mas ainda assim pode ferir;
- os corpos na superfície da Terra caem com aceleração constante de valor $g = 10 \text{ m/s}^2$, independente de sua massa e considerando desprezível a resistência da atmosfera;
- esse movimento é chamado de queda livre;
- é necessário fazer inicialmente um esboço dos problemas, definindo o seu referencial e a posição do sistema de coordenadas;
- é necessário deixar bastante claro qual é o sentido "positivo" e o sentido "negativo" do movimento, para não se "atrapalhar" com os sinais da velocidade e da aceleração;
- é preciso construir as equações horárias da posição e velocidade do movimento de queda livre;
- é possível calcular tempo de subida e descida de um projétil e sua velocidade de retorno;
- é possível calcular a altura máxima alcançada por um projétil, sabendo que sua velocidade nesse ponto é zero.

Resumo de Cinemática

Nas Aulas 3, 4 e 5 estudamos a Cinemática. Você deve ter aprendido os conceitos de referencial, sistema de coordenadas, posição, deslocamento, velocidade e acelereção.

Vimos até agora dois tipos de movimento em linha reta:

Movimento Retilíneo Uniforme (MRU)

1. A **posição** varia **em função do tempo,** mantendo uma **razão constante**; por isso o movimento é chamado de **uniforme** ou seja, sua velocidade é **constante** e o gráfico que representa a posição em função do tempo é uma **reta**.

2. Existe uma **grandeza**: a **velocidade** que relaciona a variação da posição com o tempo

3. A grandeza velocidade é definida matematicamente como:

$$v = \frac{\text{variação da posição em um intervalo de tempo}}{\text{intervalo de tempo}} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{D x}{D t}$$

4. No MRU**,** a velocidade não varia, ela é **constante**.

5. Por meio da função horária, é possível fazer previsões:

FUNÇÃO HORÁRIA DA	FORMA MATEMÁTICA	PODEM-SE PREVER
posição	$x = x_0 + vt$	posições

Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV)

1. No MRUV, **variam** a posição e a velocidade.

2. A **velocidade** varia sempre **na mesma razão**; por isso o movimento é chamado de **uniformemente variado** e o gráfico que representa a velocidade em função do tempo, é uma **reta**.

3. Existe uma grandeza: a **aceleração**, que relaciona a variação da velocidade com o tempo.

4. A grandeza **aceleração** se define matematicamente como:

$$a = \frac{\text{variação da velocidade em um intervalo de tempo}}{\text{intervalo de tempo}} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{D v}{D t}$$

5. No MRUV, a aceleração não varia, ela é **constante**.

6. Pelas funções horárias, é possível fazer previsões da posição e da velocidade em cada instante:

FUNÇÃO HORÁRIA DA	FORMA MATEMÁTICA	PODE-SE PREVER
POSIÇÃO	$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$	Posições
VELOCIDADE	$v = v_0 + at$	Velocidades

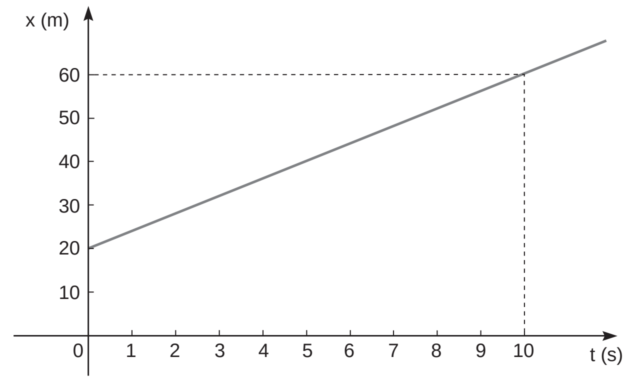
Podemos representar o conjunto de informações sobre os movimentos, usando **tabelas**, **gráficos** e **funções** como formas equivalentes de representar um mesmo conjunto de dados. Por exemplo, no MRU:

t (s)	x (m)
0	20
1	24
2	28
3	32
4	36
5	40
6	44
7	48
8	52
9	56
10	60

1 Tabela

$x = x_0 + vt \longrightarrow \boxed{x = 20 + 4t}$

2 Função



3 Gráfico

Figura 6. Formas equivalentes de se representar um MRU.

Passo-a-passo

Usando a tabela acima, obtenha a função horária da posição.

É possível verificar que, em cada intervalo de tempo, a distância **x** aumenta sempre com o mesmo valor, ou seja:

$$x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = x_4 - x_3 = ... = 4 \text{ m}$$

ou seja, a velocidade é constante:

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} = \frac{x_4 - x_3}{t_4 - t_3} = ... = 4 \text{ m/s} = \text{constante}$$

essa é a característica do Movimento Retilíneo Uniforme. Sua função horária é:

$$x = x_0 + vt$$

$$\boxed{x = 20 + 4t}$$

Onde x_0 é a posição no instante t=0! Com essa equação você pode construir novamente a tabela e fazer o gráfico x X t.

Sempre que necessário use $g = 10\ m/s^2$.

Exercício 1.

Na construção de um edifício, Nestor está levantando uma parede de tijolos no primeiro andar. Nélson, que está no térreo, joga os tijolos um a um para Nestor. Quanto tempo demora para que um tijolo jogado por Nélson chegue às mãos de Nestor com velocidade zero? Considere que Nélson lança cada tijolo com uma velocidade inicial de aproximadamente 7,75 m/s e que cada andar tem aproximadamente 3 metros.

Exercício 2.

Silvio, um menino levado que mora no 100° andar de um edificio, faz uma brincadeira de mau-gosto. Ele deixa cair um ovo pela janela tentando atingir uma pessoa na calçada. Qual será a velocidade com que o ovo chega ao solo? (Tal como no exercício, anterior considere que cada andar tem aproximadamente 3 metros de altura.)

Exercício 3.

Um homem joga cara ou coroa com uma moeda, atirando-a para cima com uma velocidade aproximada de 10 m/s. A que altura ela chega e quanto tempo demora pra voltar à sua mão?

Exercício 4.

Sílvio, um criador de frangos, leu vários livros sobre a queda dos corpos perto da superfície da Terra. Mas não ficou muito satisfeito e resolveu verificar se as afirmações dos livros eram verdadeiras. Foi até o galinheiro, pegou uma galinha e um ovo, subiu até o telhado de sua casa e soltou o ovo e a galinha. Quem cairá primeiro, o ovo ou a galinha?

AULA

6

Empurra e puxa

Domingo, Gaspar reúne a família para "uma voltinha de carro". Ele senta ao volante e dá a partida. Nada. Tenta outra vez e nada consegue. Diz então para todos: "O carro não quer pegar. Vamos dar uma **força**!"

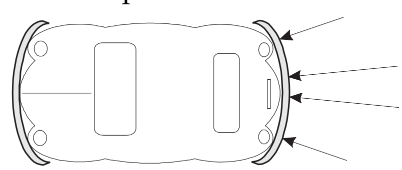


Figura 1

Essa é uma situação na qual o conceito de força empregado em situações do dia-a-dia coincide com o **conceito físico de força**. O que Gaspar queria dos outros membros da família era que empurrassem o carro. Quando empurramos ou puxamos um objeto dizemos que estamos exercendo **uma força** sobre ele. A família estava **exercendo uma força** sobre o carro.

Existem situações em que podemos exercer uma força sobre um objeto sem tocá-lo diretamente. Por exemplo, quando aproximamos um ímã de outro (Figura 2), este segundo vai ser atraído ou repelido pelo primeiro. Então, um ímã está exercendo uma força sobre o outro sem a necessidade de tocá-lo.

A força gravitacional é uma força desse tipo. Ela atua à distância. É ela que mantém a Terra girando em torno do Sol, ou a Lua girando em torno da Terra. Existem outras forças que atuam à distância. O movimento dos elétrons em torno do núcleo dos átomos é conseguido graças à força elétrica de atração que existe entre os elétrons e os prótons localizados no núcleo atômico.

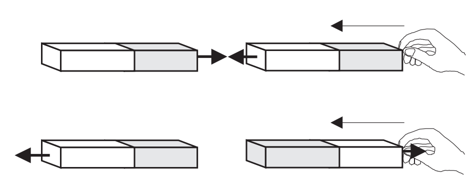


Figura 2

A força é um vetor

Vamos voltar ao caso do carro. Cada uma das pessoas estava exercendo uma força. Essa força poderia ser maior ou menor dependendo da pessoa que estava exercendo a força. Mas a força é uma grandeza; para conhecê-la completamente, não basta dizer quanto ela vale.

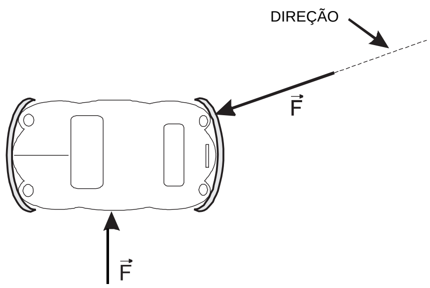


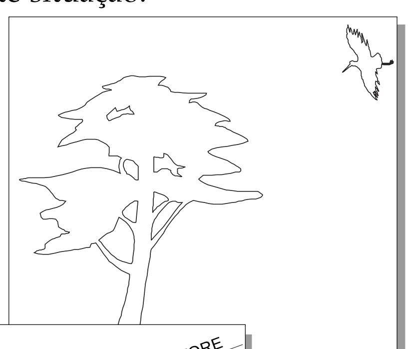
Figura 3

Uma força de mesma intensidade poderia causar um efeito muito diferente se estivesse sendo aplicada numa outra direção. Por exemplo, se alguém empurrasse o carro, pela porta, ou por sua parte traseira, os resultados seriam diferentes. Mesmo que indicássemos o valor da força e qual sua direção, a força não estaria ainda bem definida. Na Figura 1, aparece a direção de uma das forças aplicadas no carro. Está indicado, também, que a força está atuando no sentido de empurrar o carro. Todavia, poderíamos ter uma força que estivesse atuando na mesma direção, mas puxando o carro. Toda grandeza que necessite que digamos qual é seu **valor** (também chamado **módulo**), qual sua **direção** e qual seu **sentido,** para que fique bem definida, é chamada **grandeza vetorial**. Assim, a força é uma grandeza vetorial. Em geral representamos uma grandeza vetorial colocando-se uma pequena seta sobre a letra que indica esse vetor, por exemplo, quando tratamos de força podemos escrever $\vec{F}$ e ler **"vetor força".** Se quisermos falar apenas do valor (do módulo), usaremos apenas a letra F.

Já estudamos algumas grandezas que também são vetoriais como por exemplo, deslocamento, velocidade e aceleração.

Porém, nos casos estudados, a direção e o sentido eram conhecidos. Então, não era necessário fazer um estudo vetorial dos movimentos. Porém, considere a seguinte situação:

Figura 5



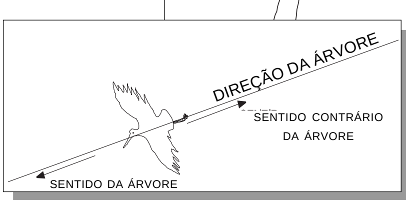


Figura 4

Um pássaro está a 300 m de uma árvore, voando com velocidade de 15 m/sSe o pássaro voar em linha reta, depois de quanto tempo vai chegar à árvore? Ora, isso não vai depender apenas do valor da velocidade. É necessário que o pássaro esteja voando na **direção da árvore**. Caso contrário, ele não vai chegar nunca! Mesmo voando na direção da árvore, ele poderia estar voando no sentido contrário e também nunca chegar.

Medindo forças

Como medir forças? Uma força, como vimos, pode ser associada a um empurrão ou a um puxão. Vimos também que para medirmos uma grandeza precisamos de um padrão. O que seria um "puxão-padrão"? Lembre-se de que os padrões devem ser bem definidos para que outras pessoas possam reproduzir outros iguais. Vamos ver como podemos estabelecer esse "puxão-padrão". A Terra atrai os objetos de maneira distinta. Quanto maior a massa do objeto, maior é a força de atração. Foi pensando nisso que inicialmente se adotou o **quilograma-força**, que é a força com que a Terra atrai um objeto cuja massa é 1 quilograma. Se você estiver segurando um objeto de 1 quilo, você estará fazendo uma força de 1 quilograma-força.

Uma vez definido o padrão, precisamos de um instrumento que seja capaz de comparar o padrão com outras forças. Esse instrumento é chamado **dinamômetro**. Os dinamômetros são, na verdade, molas. Se pendurarmos um objeto qualquer numa mola presa num suporte, a mola vai sofrer uma deformação (ela vai distender). Baseados nesse princípio, podemos medir forças comparando-as com um padrão – o **quilograma-força**. O quilograma-força não é uma unidade do Sistema Internacional. A unidade de força do Sistema Internacional de Unidades é o **newton** (N), que definiremos em um capítulo pouco mais adiante.

A lei de Hooke

Uma massa de 1 kg está presa a uma mola suspensa num suporte. Enquanto a massa é mantida pela mão, a mola não apresenta deformação.

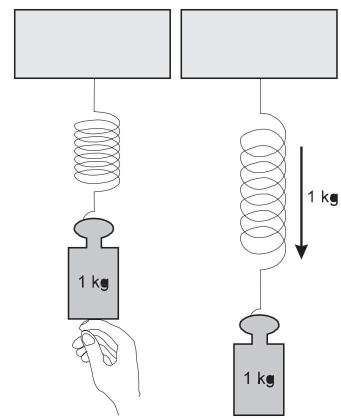


Figura 6. O dinamômetro

Porém, quando a massa é solta, a mola vai "espichar". Sabendo qual foi o alongamento da mola, podemos estabelecer uma relação entre a força de 1 kgf e a força que desejamos medir.

Cada mola se comporta de uma maneira. Umas esticam muito, outras menos. Foi Robert Hooke quem descobriu a lei (que leva seu nome) que afirma que, dentro de certos limites, **existe uma proporcionalidade direta entre a força aplicada numa mola e sua deformação**. Ou seja, quanto mais coisas pendurarmos na mola, mais ela se alongará.

Você pode verificar a lei de Hooke de uma maneira simples. Para isso, vai precisar de uma espiral de plástico, dessas que são usadas para encadernação de folhas de xerox. Uma espiral de caderno também serve. Pendure a espiral num suporte e um saco plástico vazio na outra extremidade da espiral, como mostra a Figura 7. A espiral do caderno vai atuar como uma mola e, com ela, vamos verificar a lei de Hooke.

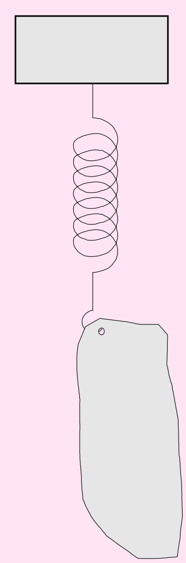


Figura 7

A idéia é ir introduzindo água dentro do saco plástico e medir a deformação da mola cada vez que uma certa quantidade de água é introduzida. Para isso, precisamos saber que quantidade de água estamos colocando dentro do saco plástico. Um litro de água tem uma massa de 1 kg. Assim, se colocarmos 200 cm^3 de água dentro do saco, estaremos colocando 0,2 kg, que, por sua vez, puxará a mola com uma força de 0,2 kgf. Essa força vai provocar um alongamento da mola.

Em geral, chamamos esse alongamento de **Δx**. Assim, a extremidade da mola vai deslocar-se **Δx**. Quando colocamos 0,2 kg de água dentro do saco de plástico, a força exercida é de 0,2 kgf. Introduzindo-se várias vezes essa mesma quantidade de água, e anotando-se as distensões, você poderá obter uma tabela semelhante à Tabela 1 e construir o gráfico correspondente.

F (kgf)

Δ x (m)

Figura 8

TABELA 1

Δ	F (kgf)
0,1	0,2
0,2	0,4
0,3	0,6
0,4	0,8
0,5	1,0
0,6	1,2
0,7	1,4

Analisando-se os dados, verifica-se que existe uma proporcionalidade entre a força exercida na mola e a distensão dessa mola. Podemos escrever:

$$F = k \cdot \Delta x$$

O valor de **k** depende do material com que é feita a mola. O valor de **k** é:

$$k = \frac{F}{Dx}$$ e sua unidade será kgf/m.

No nosso caso, k = 2 kgf/m. Isso significa que, se pendurarmos 2 kg na mola, ela vai sofrer uma distensão de 1 m.

Esse valor **k** é denominado **constante elástica da mola**. Molas com valores de **k** muito grandes são muito resistentes, portanto muito duras.

É dessa maneira que podemos comparar forças e medi-las. Em primeiro lugar, calibramos uma mola, isto é, verificamos quanto ela se alonga quando penduramos nela objetos de massa conhecida. Depois, podemos pendurar um objeto na mola e saber quantos quilogramas ele tem. Esse é o processo usado para fabricar uma balança de peixeiro (Figura 9).

À esquerda, vemos a mola existente no interior da balança. À direita podem ser vistos o índice e a escala, que marcam quantos quilogramas foram pendurados no gancho.

A mola que analisamos não serviria para uma balança de peixeiro normal, pois, se pendurássemos um peixe de 2 kg, a mola, como vimos, iria se alongar 1 m.

Figura 9
Balança de peixeiro

Somando forças

Dois grupos de garotos estão brincando de cabo de guerra (Figura 10). Se cada um dos lados estiver fazendo a mesma força sobre a corda, o jogo está empatado. Nenhum dos grupos, nem a corda, vai sair do lugar.

Figura 10

Se chamarmos as forças de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, poderemos representar a soma dessas duas forças da seguinte maneira:

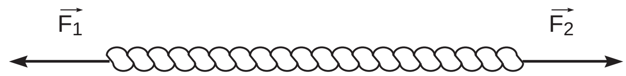


Figura 11

Vamos supor que de cada lado estivesse sendo feita uma força de 50 kgf. Nesse caso, a soma das forças será zero. Se quiséssemos representar somente as forças, deixando de lado a corda, ficaríamos com:

Figura 12

Porém, o que aconteceria se de um dos lados estivesse sendo feita uma força maior? Se, por exemplo, F_1 = 50 kgf e F_2 = 60 kgf. Nesse caso, o esquema que representa a soma das forças seria o da Figura 13.

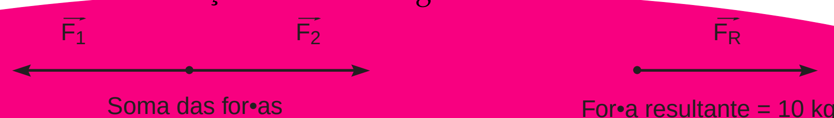


Figura 13

Note que o vetor que representa a força $\vec{F}_2$ tem comprimento maior do aquele de $\vec{F}_1$. As duas forças têm a mesma direção mas seus sentidos são contrários. No caso, a força que representa a soma de $\vec{F}_1$ com $\vec{F}_2$, também chamada **força resultante** $\vec{F}_R$, terá valor de 10 kgf e apontará para a direita. Isso porque o lado 1 puxa a corda com 50 kgf e o lado 2 puxa com 60 kgf.

Representamos essa força tal como está na Figura 13. A direção de $\vec{F}_R$ é a mesma de $\vec{F}_1$ ou de $\vec{F}_2$, mas seu sentido é o de $\vec{F}_2$, pois $\vec{F}_2$ é a força maior entre as duas.

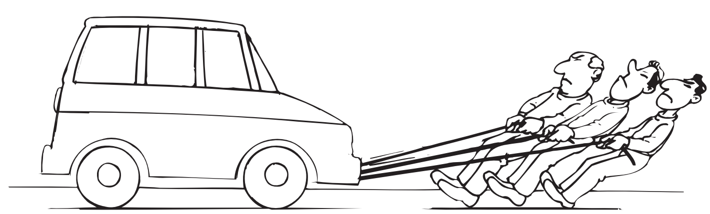


Figura 14

Vamos supor que três pessoas estejam puxando um carro na mesma direção e no mesmo sentido e que essas forças tenham valores F_1 = 30 kgf, F_2 = 40 kgf e F_3 = 45 kgf.

O valor da força resultante F_R será: 30 kgf + 40 kgf + 45 kgf = 115 kgf. A direção e sentido de $\vec{F}_R$ serão os mesmos de $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$.

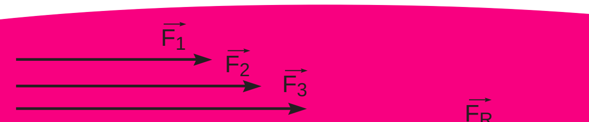


Figura 15

Finalmente, vamos considerar o caso em que as forças não tenham a mesma direção. Foi Newton quem introduziu a noção de adicionar vetores nesse caso. Voltando ao exemplo do início, suponhamos que duas pessoas estejam puxando um carro com duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, ao mesmo tempo. As direções de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ formam um ângulo de 90º e vamos supor que seus valores sejam 40 kgf e 30 kgf. Para se obter o valor da força resultante $\vec{F}_R$, procedemos da seguinte maneira: traçamos, na extremidade de $\vec{F}_1$ uma paralela à $\vec{F}_2$, e uma paralela à $\vec{F}_2$, na extremidade de $\vec{F}_1$. Dessa maneira formamos um paralelogramo. Nesse caso, o paralelogramo é um retângulo. A diagonal desse retângulo representa o vetor $\vec{F}_R$ que procuramos. Para calcular o valor da força resultante $\vec{F}_R$, que queremos encontrar, basta determinar a diagonal do retângulo, usando a relação de Pitágoras:

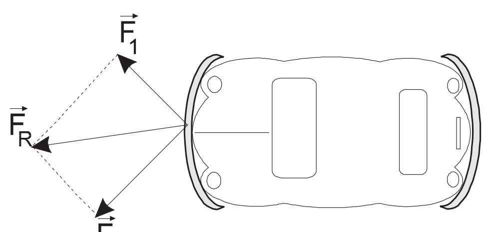


Figura 16

$$F_R^2 = F_1^2 + F_2^2$$

No exemplo, ficamos com:

$$F_R^2 = 40^2 + 30^2$$

$$F_R^2 = 1.600 + 900 = 2.500$$

$$F_R = 50 \text{ kgf}$$

Ainda um pouco mais

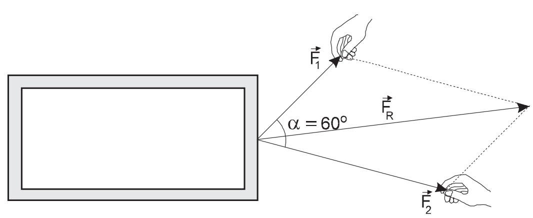


Figura 17

Suponha que uma caixa esteja sendo arrastada por duas forças que formam entre si um ângulo a de 60º. e cujos valores sejam: F_1 = 3 kgf e F_2 = 5 kgf. Qual será o valor da força resultante $\vec{F}_R$? O procedimento para obter a direção e o sentido da força resultante é o mesmo. Traçamos dois segmentos paralelos a $\vec{F}_1$ e a $\vec{F}_2$, e obtemos um paralelogramo. A diagonal desse paralelogramo dá a direção e sentido da resultante, e o valor pode ser obtido matematicamente, da seguinte maneira:

$$F_R^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos a$$

onde α é o ângulo entre as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$

No nosso exemplo, teremos:

$$F_R^2 = 3^2 + 5^2 + 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \cos 60^o$$
$$F_R^2 = 9 + 25 + 30 \cdot \tfrac{1}{2}$$
$$F_R^2 = 9 + 25 + 15$$
$$F_R^2 = 49$$
$$F_R = 7 \text{ kgf}$$

Se uma força de 7 kgf fosse aplicada na caixa, na direção indicada na Figura 17, teria o mesmo efeito que as duas forças, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. Se, por acaso, existissem mais forças, poderíamos ir somando, duas a duas, até obter uma resultante final. Porém, podemos atuar de uma outra maneira.

Decompondo forças

Um objeto está sendo puxado por uma força $\vec{F}$, que forma um ângulo α com a horizontal. É claro que, se essa força tivesse o mesmo valor e estivesse na horizontal, conseguiríamos arrastar o bloco mais facilmente.

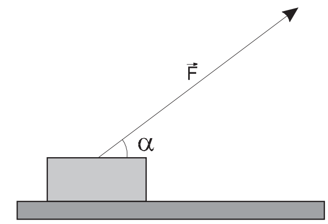


Figura 18

Decompondo essa força podemos entender melhoro porquê disso. Vamos colocar um sistema de eixos cartesianos de maneira tal que a força esteja na sua origem. Se, da extremidade da força $\vec{F}$, traçarmos perpendiculares aos eixos, como está mostrado na Figura 19, podemos construir os vetores $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$ que são chamados componentes do vetor $\vec{F}$. O nome componente vem do fato de que, se somarmos os vetores $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$, obteremos o vetor $\vec{F}$, ou seja, $\vec{F}$ atua da mesma maneira que $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$ somados. O que ocorre é que uma parte do vetor $\vec{F}$, $\vec{F}_x$ tende a arrastar o bloco, enquanto que a outra $\vec{F}_y$ tende a levantar o bloco.

Figura 19

Para calcular os valores de $\vec{F}_x$ e $\vec{F}_y$, utilizamos o triângulo ABC e as relações trigonométricas. Temos:

$$F_x = F \cdot \cos\alpha$$
$$F_y = F \cdot \operatorname{sen}\alpha$$

Lembre-se de que, como estamos tratando apenas dos **valores**, não colocamos a seta sobre as letras que indicam as forças.

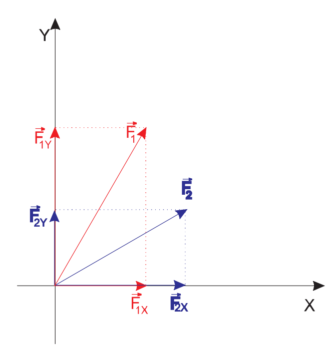


Figura 20

Vamos usar o método da decomposição de forças para somar as forças representadas na Figura 20. Temos duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ cujos valores são 6 kgf e 5 kgf. As direções de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ formam ângulos de 60 e 30 graus com o eixo x.

As componentes de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ podem ser calculadas facilmente:

No final desta aula, você encontrará uma tabela com os valores do seno e do co-seno dos principais ângulos.

$$F_{1X} = 6 \cdot \cos 60^{\circ} = 3{,}00 \text{ kgf}$$

$$F_{2X} = 5 \cdot \cos 30^{\circ} = 4{,}33 \text{ kgf}$$

$$F_{1Y} = 6 \cdot \operatorname{sen} 60^{\circ} = 5{,}20 \text{ kgf}$$

$$F_{2Y} = 5 \cdot \operatorname{sen} 30^{\circ} = 2{,}50 \text{ kgf}$$

Se chamarmos de F_X e F_Y as componentes da força resultante $\vec{F}_R$, podemos escrever:

$$F_X = F_{1X} + F_{2X} = 3{,}00 + 4{,}33 = 7{,}33 \text{ kgf}$$

$$F_Y = F_{1Y} + F_{2Y} = 5{,}20 + 2{,}50 = 7{,}70 \text{ kgf}$$

Agora podemos calcular a resultante propriamente dita:

$$F_R^2 = F_X^2 + F_Y^2$$

$$F_R^2 = (7{,}33)^2 + (7{,}70)^2$$

$$F_R^2 = 113{,}02$$

$$F_R^2 = 10{,}63 \text{ kgf}$$

Podemos calcular diretamente o valor de $\vec{F}_R$, usando a relação:

$$F_R^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos\alpha$$

Figura 21

para provar que os resultados vão ser os mesmos. Teremos:

$$F_R^2 = 6^2 + 5^2 + 2 \cdot 6 \cdot 5 \cdot \cos 30^\circ$$

$$F_R^2 = 36 + 25 + 60 \cdot (0{,}87)$$

$$F_R^2 = 112{,}96$$

$$F_R = 10{,}63 \text{ kgf}$$

Parece que o método de usar as componentes é muito mais difícil e trabalhoso do que o "método do paralelogramo". Porém, veremos na próxima aula que os componentes de um vetor vão nos auxiliar bastante em cálculos que envolvem forças.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que a **força** é um vetor;
- que, para caracterizar um vetor, necessitamos de:
  um valor (módulo);
  uma direção;
  um sentido;
- a medir uma força usando um dinamômetro;
- que, para somar vetores, usamos a regra de paralelogramo;
- a decompor uma força nos seus componentes **x** e **y**.

TABELA SENO E CO-SENO (PRINCIPAIS ÂNGULOS)					
α	0º	30º	45º	60º	90º
sen α	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
cos α	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0

$$\frac{1}{2} = 0{,}5 \qquad \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0{,}71 \qquad \frac{\sqrt{3}}{2} \cong 0{,}87$$

Exercício 1

Se pendurarmos um ovo de galinha numa mola, ele exercerá, aproximadamente, uma força de 0,5 N sobre a mola. Pendurando vários ovos, podemos montar a Tabela 2.

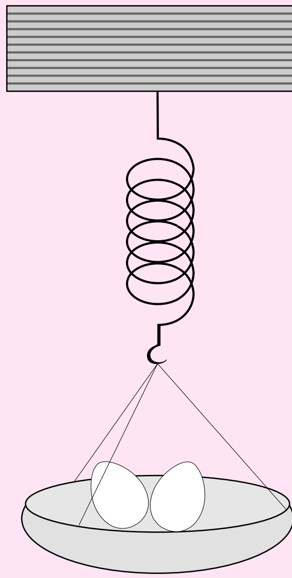


TABELA 2	
NÚMERO DE OVOS	DISTENSÃO DA MOLA
2	2 cm
4	4 cm
6	6 cm
8	8 cm
10	10 cm

Agora, responda:

a) Qual o valor da constante elástica da mola em N/cm?

b) Qual a distensão da mola, quando colocamos duas dúzias de ovos na cesta?

c) Qual seria a força exercida na mola pelas duas dúzias de ovos?

Exercício 2

Temos duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ com valores de 8 kgf e 6 kgf. Qual o valor da resultante dessas duas forças nos seguintes casos:

a) $\vec{F}_1$ tem direção norte-sul e sentido "para o norte".
$\vec{F}_2$ tem direção norte-sul e sentido "para o norte".

b) $\vec{F}_1$ tem direção norte-sul e sentido "para o sul".
$\vec{F}_2$ tem direção norte-sul e sentido "para o norte".

c) $\vec{F}_1$ tem direção norte-sul e sentido "para o norte".
$\vec{F}_2$ tem direção leste-oeste e sentido "para o leste".

Exercício 3

Duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ têm módulos 10 kgf e 20 kgf. Elas formam entre si um ângulo de 45º. Determine o valor da força resultante.

Exercício 4.

Decomponha uma força de 50 kgf, que forma um ângulo de 45º com o eixo dos **x**.

Exercício 5.

Duas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ têm módulos de 30 kgf e 50 kgf. Elas formam entre si um ângulo de 60º. Calcule o valor da resultante, diretamente e, em seguida, utilizando os componentes dessas forças.

AULA

7

Um momento, por favor

PARA COMEÇAR

Outro domingo! Novo passeio de carro. Dessa vez foi o pneu que furou. O pai se esforça, tentando, sem sucesso, girar o parafuso da roda. Um dos filhos então diz: "Um momento, por favor!" Vai até o porta-malas, pega um cano longo, coloca-o na extremidade da chave, e fala para o pai: "Tente agora!" E o pai, surpreso, consegue retirar os parafusos, fazendo até menos esforço do que anteriormente.

Figura 1

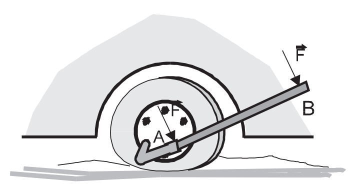


Figura 2

Como pode ter acontecido isso? Bem, em Física, existe uma grandeza que está associada à capacidade de uma força girar um objeto. Essa grandeza é chamada de **momento da força** ou, ainda, **torque**.

Mas, o que vem a ser momento (ou torque) de uma força? De que grandezas ele depende? No dia-a-dia, temos inúmeros exemplos nos quais essa noção está envolvida: alavancas, ferramentas, máquinas, automóveis. Veja a Figura 3. Quando tentamos girar a porca com uma chave, utilizando uma força de mesmo valor, será mais fácil conseguirmos se a força estiver aplicada no ponto A do que se estiver aplicada no ponto B. A porca vai girar em torno de seu centro. Quanto maior for a **distância** desse ponto ao ponto onde a força é aplicada, maior vai ser a facilidade de girarmos a porca com a chave.

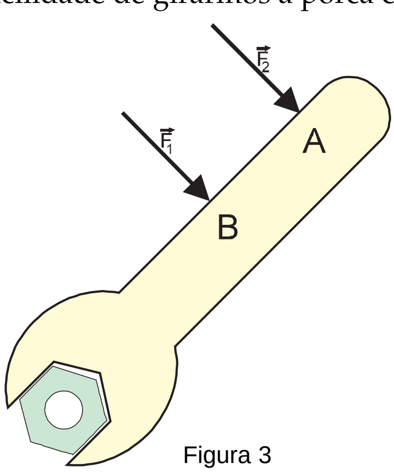


Figura 3

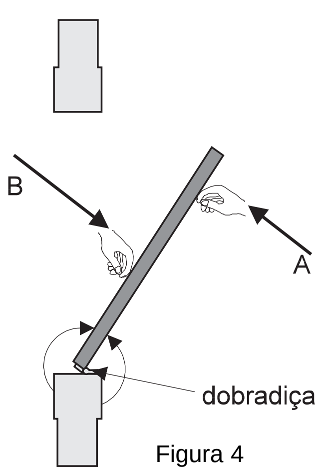


Figura 4

Analise bem a Figura 4. Ela representa uma porta vista de cima. Duas pessoas empurram a porta, uma tentando fechá-la e a outra tentando abri-la. A pessoa B tenta fazer com que a porta gire, em torno da dobradiça, da mesma maneira como fazem os ponteiros de um relógio (sentido horário), enquanto que a pessoa A procura fazer com que a porta gire no sentido contrário ao que fazem os ponteiros de um relógio (sentido anti-horário). Não vai ser, necessariamente, a pessoa que faz mais força que vai vencer a parada. As **distâncias** entre os pontos onde são aplicadas as forças e a dobradiça da porta também entram no jogo.

Fique ligado

Então, quando quisermos analisar a capacidade de uma força girar um corpo, devemos considerar, ao mesmo tempo, duas grandezas: o valor da força e a distância entre a força e o ponto em torno do qual o corpo gira. A grandeza que representa essa capacidade de uma força girar um corpo como já dissemos, é o momento da força ou torque. Se chamarmos de **M** o momento, podemos definir, inicialmente, o valor dessa grandeza como:

$$\boxed{M = F \cdot d}$$

onde M representa o valor do momento da força, F representa o valor da força e d representa o valor da distância da força ao centro de giro.

B

B

Figura 5

Observe a situação da Figura 5, em que dois garotos estão sentados numa gangorra. O menino mais gordo tem massa de 60 kg, e o mais magro de 40 kg Assim, eles exercerão respectivamente, sobre a gangorra, forças de 60 kgf e 40 kgf. Essas forças poderão fazer com que a gangorra gire, em torno do apoio, no sentido horário, no sentido anti-horário, ou ainda não gire (se os momentos das forças forem iguais). Vamos calcular os momentos dessas forças com relação ao ponto **O**.

$$M_A = 60 \text{ kgf} \cdot 1 \text{ m} = 60 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$
$$M_B = 40 \text{ kgf} \cdot 1{,}5 \text{ m} = 60 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Então, os momentos das duas forças são iguais e a gangorra não vai girar. Podemos dizer que a distância maior do garoto mais magro compensa, em termos de girar a gangorra, o maior peso do menino mais gordo.

Vamos, finalmente, considerar uma última grandeza que está associada ao momento de uma força. Observe a Figura 6.

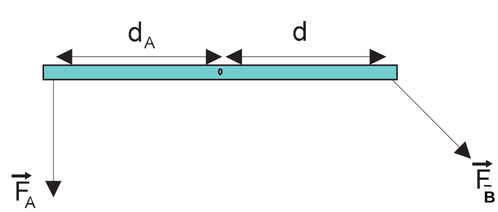


Figura 6

Temos duas forças de valores $F_A = F_B$, que estão à mesma distância do ponto O, $d_A = d_B$, contudo, essas duas forças não têm a mesma capacidade de girar a barra. Isso porque a força $\vec{F}_A$ tem direção perpendicular à barra, enquanto que $\vec{F}_B$ não. Se usarmos as componentes de $\vec{F}_B$, poderemos entender melhor a situação.

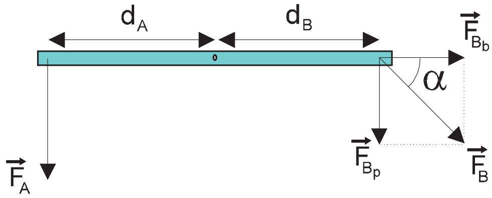


Figura 7

A Figura 7 mostra as duas componentes da força $\vec{F}_B$. Uma delas tem a direção da barra e a outra é perpendicular à barra.

Quem pode produzir uma rotação na barra é a força perpendicular à barra. A outra componente, apenas puxa a barra. Nesse caso, então, a força $\vec{F}_A$ tem maior capacidade de girar a barra do que a força $\vec{F}_B$. Assim, a força que tem o maior momento é aquela que atua perpendicular à barra. Chegamos, por fim à uma definição final do valor do torque ou momento de uma força (Figura 8):

$$\boxed{\mathbf{M = F \cdot d \cdot sen\ \alpha}}$$

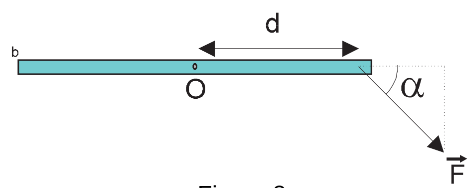


Figura 8

Veja que, quando o ângulo α é 90º, o valor do momento é máximo pois sen α = 1. Nessa situação, a força e a barra são perpendiculares.

Vejamos mais um exemplo do uso do conceito de momento.

Uma pessoa tenta deslocar uma pedra com auxílio de uma alavanca de 1 m. Para isso, ela apóia a alavanca sobre uma pedra menor, a 20 cm da pedra grande (veja a Figura 9). Se a pessoa exercer uma força de 40 kgf perpendicularmente sobre a alavanca, qual a força que vai agir sobre a pedra maior?

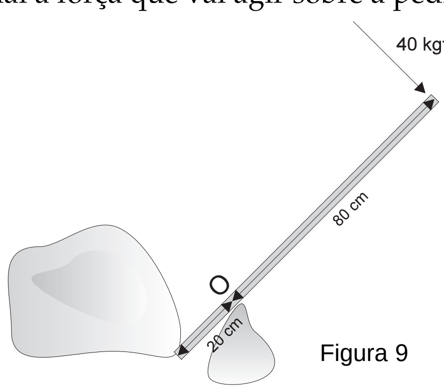


Figura 9

A alavanca vai girar em torno do ponto **O**, que serve de apoio para ela. O momento da força aplicada pela pessoa deve ser igual ao que a outra extremidade da barra vai exercer sobre a pedra. Então teremos:

$$F \cdot 0{,}2\ m = 40\ kgf \cdot 0{,}8\ m$$

$$F = \frac{40kgf \cdot 0{,}8m}{0{,}2m} = 160\ kgf$$

Então a alavanca vai exercer, sobre a pedra, uma força quatro vezes maior do que a que está sendo aplicada. Assim, com alavancas muito grandes, podemos levantar pesos também muito grandes, exercendo pouca força.

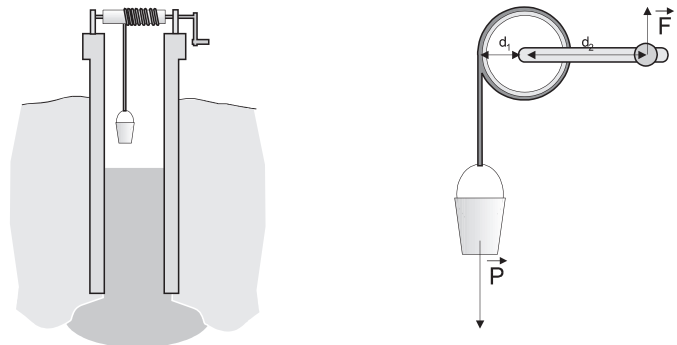


Figura 10

Observe a Figura 10, respectivamente um poço no qual existe uma manivela com um cilindro de madeira e um detalhe dessa manivela. No cilindro de madeira, está enrolada uma corda que tem, em sua extremidade, o balde para retirar água do poço. O balde, por intermédio da corda, vai exercer uma força no cilindro. Essa força, por sua vez, vai ter um momento com relação ao eixo do cilindro.

Quando alguém exerce uma força na manivela, surge também um momento dessa força com relação ao mesmo eixo. Ora, o tamanho da manivela é maior que o raio do cilindro onde está apoiada a corda; então, para girar a manivela, a pessoa vai precisar de uma força menor do que o peso do balde cheio de água. Essa é uma outra aplicação do conceito de momento na qual se mostra que às vezes pode-se elevar um peso se utilizando uma força menor que esse peso.

Finalmente em equilíbrio

Duas pessoas puxam uma caixa como mostra a Figura 11. As cordas, pelas quais a caixa está sendo puxada, estão nos centros das laterais da caixa. As forças têm o mesmo valor, mesma direção e sentidos contrários. A caixa não vai se mover. Mas será que é sempre assim? Sempre que as forças forem iguais, de mesma direção e de sentido contrário a caixa fica paradinha?

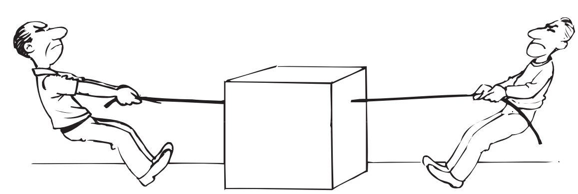


Figura 11

Vamos supor que as cordas estivessem amarradas nas pontas da caixa, como aparece na Figura 12.

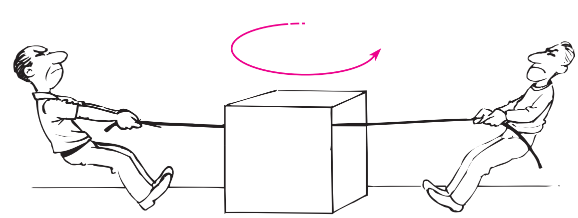


Figura 12

Mais uma vez, vamos considerar que as forças são iguais, de mesma direção e sentidos contrários. Porém, nessa situação, a caixa nem sempre vai ficar paradinha. **Ela poderá girar!** São os momentos das forças que farão a caixa girar.

Mas, se a soma das forças for zero e a soma dos momentos **também**, a caixa estará em equilíbrio. Ela não vai girar nem se deslocar.

Condições de equilíbrio de um corpo

Para que um corpo sujeito a forças permaneça em equilíbrio, é necessário:

1. que a soma de todas as **forças** que agem sobre o corpo seja nula;
2. que a soma dos **momentos** dessas forças com relação a um ponto seja nula.

Vamos estudar alguns casos que envolvem o equilíbrio de corpos.

Passo-a-passo

Penduram-se numa barra muito leve (de peso desprezível, como em geral se diz em Física), três bolas iguais que têm, cada uma, um peso de 1 newton (1 N). Elas são presas em pregos que estão a uma distância de 10 cm uns dos outros, como mostra a Figura 13. A barra está presa no teto. Pergunta-se:

a) Onde deveremos colocar uma quarta bola, igual às primeiras, para que a barra fique em equilíbrio?
b) Qual a força exercida sobre o fio que prende a barra ao teto?

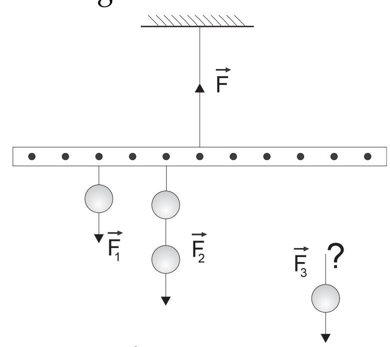


Figura 13

Para que o conjunto fique em equilíbrio, a soma de todas as forças aplicadas na barra deve ser igual a zero. Na Figura 13, estão representadas quatro forças: $\vec{F}$, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$. Vamos supor que as forças dirigidas para cima sejam positivas e as dirigidas para baixo sejam negativas. Então, com relação aos valores das forças, teremos:

$$F - F_1 - F_2 - F_3 = 0$$
$$F - 1\,N - 2\,N - 1\,N = 0$$
$$F = 4\,N$$

Então, sobre o fio que suporta a barra, teremos uma força de 4 N. Isso já era esperado pois, se cada bola pesa 1 N e o fio é quem mantém as quatro bolas, ele deverá estar agüentando uma força de 4 N. O peso da barra não entra, pois supusemos que é desprezível.

Agora, para que a barra não gire, a soma dos momentos das forcas deve ser também igual a zero. Vamos chamar de M, M_1, M_2 e M_3 os valores dos momentos das forças e escolher que o sentido de rotação horário é positivo. Quem faz a barra girar no sentido horário é a força F_3. A força F não faz a barra girar, pois está aplicada no ponto de suspensão e as outras duas tendem a fazer a barra girar no sentido anti-horário. Então teremos:

$$F_3 \cdot d_3 - F_2 \cdot d_2 - F_1 \cdot d_1 = 0$$
$$1\,N \cdot d_3 - 2\,N \cdot 0{,}1\,m - 1\,N \cdot 0{,}3\,m = 0$$
$$d_3 = 0{,}5\,m$$

Dessa maneira, a bola deverá ser colocada a uma distância de 50 cm do ponto de suspensão da barra.

Passo-a-passo

Observe a Figura 14: um sarrafo com peso de 16 N, apoiado em dois blocos A e B. Quais são os valores das forças que os apoios exercem sobre a barra?

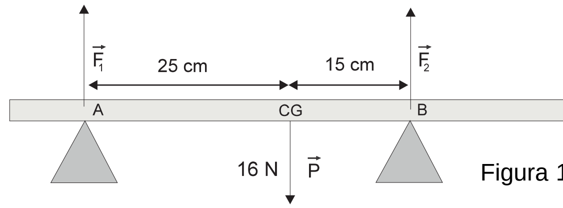


Figura 14

Para a resolução desse problema, vamos usar um conceito importante – **o centro de gravidade**.

O **centro de gravidade** de um corpo é o ponto de aplicação da força peso, ou seja, como se todo peso do corpo estivesse concentrado naquele ponto. Se o corpo for homogêneo, como o caso da barra do problema, o centro de gravidade é o centro geométrico da barra. As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram a posição aproximada de alguns centros de gravidade.

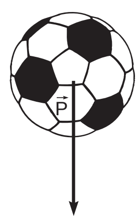


Figura 15

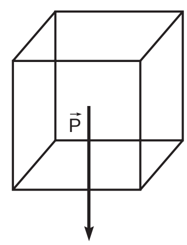


Figura 16

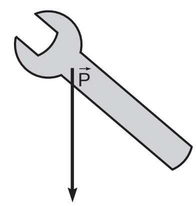


Figura 17

Figura 18

Numa esfera, como num cubo, ele está no centro da esfera. Na chave, ele fica mais perto da parte que gira a porca. Num homem, ele se situa aproximadamente na altura do umbigo, mas na parte interna de seu corpo.

Vamos aos cálculos. Suponhamos que as forças representadas na Figura 14 que estiverem para cima são positivas e as que estiverem para baixo, negativas. Então, vamos ter:

$$F_1 + F_2 - 16 = 0$$

Vamos calcular os momentos das forças com relação ao ponto A. Poderíamos calcular também com relação ao centro de gravidade ou, ainda, com relação ao ponto B, que os resultados seriam os mesmos. Vamos considerar que o sentido horário é o sentido positivo.

O momento da força $\vec{F}_1$ com relação ao ponto A é zero, pois a distância da força $\vec{F}_1$ ao ponto A é zero. O momento de $\vec{F}_2$ é negativo, pois faria com que a barra girasse no sentido anti-horário. O momento de $\vec{P}$ é positivo, pois faria com que a barra girasse no sentido horário. As distâncias do peso e da força $\vec{F}_1$ ao ponto A são, respectivamente, 25 cm (0,25 m) e 40 cm (0,4 m), então, a soma dos momentos dessas forças com relação ao ponto A vai ficar:

$$16\text{ N} \cdot 0{,}25\text{ m} - F_2 \cdot 0{,}40\text{ m} = 0 \quad \text{então,}$$

$$F_2 = \frac{4\text{ N} \times \text{m}}{0{,}40\text{ m}} = 10\text{N}$$

Sabendo-se o valor de $\vec{F}_2$, podemos calcular $\vec{F}_1$

$$F_1 + 10 - 16 = 0$$
$$F_1 = 6\text{ N}$$

Passo-a-passo

Uma balança tem um peso próprio de 2 kgf. A distância entre o prato da balança e o suporte é 20 cm. Coloca-se um peixe no prato. O peixe é equilibrado por um peso de 0,5 kgf colocado a 40 cm do suporte. Qual é o peso do peixe? Qual a força exercida pelo peixeiro para segurar a balança? (Figuras 19 e 20.)

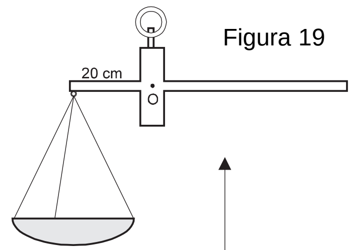


Figura 19

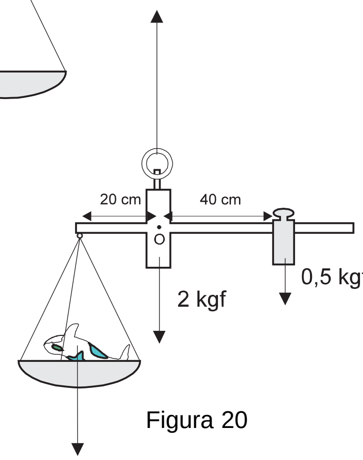


Figura 20

Inicialmente, o momento do prato da balança é compensado pelo momento do travessão da balança, pois a balança vazia está em equilíbrio (Figura 19). Quando o peixe e o contrapeso são colocados, para que haja equilíbrio, o momento do peso de um deve compensar o do outro (Figura 20). Então:

$$\boxed{M_p = M_c}$$

Chamando-se de P_p o peso do peixe, de P_c o do contrapeso, de d_p a distância do prato (onde está o peixe) e de d_c a distância do contrapeso, teremos:

$$P_p \cdot d_p = P_c \cdot d_c$$

$$P_p \cdot 0{,}2 \text{ m} = 0{,}5 \text{ kgf} \cdot 0{,}4 \text{ m}$$

$$P_p = \frac{0{,}5 \text{ kgf} \times 0{,}4 \text{ m}}{0{,}2 \text{ m}} = 1 \text{ kgf}$$

As forças que agem são: o peso do peixe $\vec{P}_p$, o peso da balança $\vec{P}_B$, e o peso do contrapeso $\vec{P}_C$ atuando para baixo. Quem equilibra essas forças é o peixeiro, segurando na argola. Então ele vai exercer uma força de:

2 kgf (da balança) + 1 kgf (do peixe) + 0,5 kgf (do contrapeso) = 3,5 kgf

Passo-a-passo

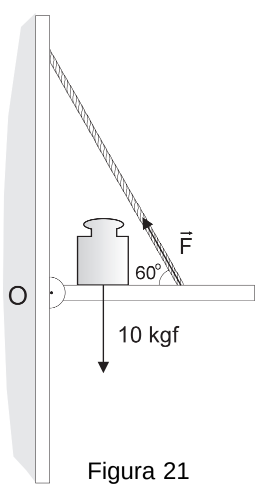


Figura 21

Uma prateleira de 2 kg, que pode girar em torno de um ponto O fixo na parede, tem a outra extremidade também presa à parede por uma corda que forma, com a mesma, um ângulo de 60º. A corda está fixa a 40 cm do ponto O (Figura 21). Um bloco de 10 kg está apoiado nessa prateleira a uma distância de 10 cm da parede. Qual a força que o conjunto vai exercer sobre a corda? Vamos supor que os momentos das forças que fariam a prateleira girar em torno do ponto O, no sentido horário, fossem positivos. Tais forças seriam o peso da prateleira e o peso do bloco, que valem, respectivamente, 2 kgf e 10 kgf. O momento da força que age sobre a corda faria a prateleira girar no sentido anti-horário, e seria, então, negativo. Chamando-se de M_p, M_B e M_c esses momentos, teríamos:

$$M_p + M_B + M_c = 0$$

Então, $2 \text{ kgf} \cdot 0{,}1 \text{ m} + 10 \text{ kgf} \cdot 0{,}1 \text{ m} - F \cdot 0{,}4 \text{ m} \cdot \text{sen } 60° = 0$

$$F = \frac{2 \text{ kgf} \times 0{,}1 \text{ m} + 10 \text{ kgf} \times 0{,}1 \text{ m}}{0{,}4 \text{ m} \times 0{,}866} \cong 4 \text{ kgf}$$

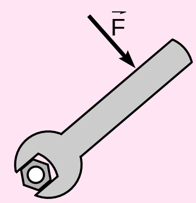
PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que se chama **momento** a grandeza associada à capacidade de uma força girar um corpo;
- que, para um corpo estar em equilíbrio, a **soma de todas as forças** nele aplicadas deve ser nula e a **soma dos momentos das forças** com relação a um ponto também.

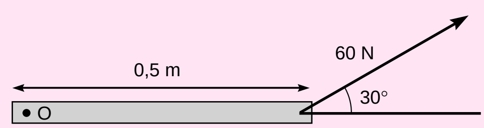
Mãos à obra

Exercício 1



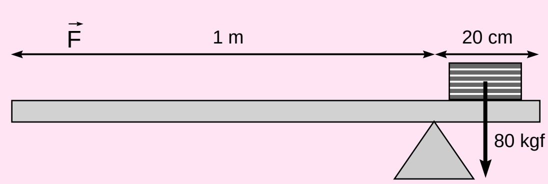
Calcule os momentos da força $\vec{F}$ de 100 N, com relação ao centro da porca que a chave tenta girar, quando essa força é aplicada em pontos situados respectivamente a 15 cm e 45 cm, do centro da porca.

Exercício 2



Uma barra pode girar em torno de um ponto O. Aplica-se, na mesma uma força de 60 N como está representado na figura abaixo. Qual vai ser o momento dessa força com relação ao ponto O ?

Exercício 3



Uma caixa com massa de 8 kg está apoiada sobre uma barra de peso desprezível e comprimento 1,20 m, que, por sua vez, está sobre um suporte, como mostra a figura acima. Qual a força $\vec{F}$, que devemos fazer, do outro lado da barra, para equilibrar a caixa?

AULA

8

Eu tenho a força! Será?

PARA COMEÇAR

Várias vezes vemos na televisão alguém gritando "Eu tenho a força" e, então, começa uma verdadeira pancadaria! Logo o super-herói sai do meio da confusão tirando pó do ombro, como se nada tivesse acontecido. De vez em quando, vemos também quedas-de-braço entre duas pessoas que ficam com os rostos vermelhos de tanto esforço, até que um deles vence a peleja!

Muitos são os exemplos nos quais vemos o conceito de força sendo utilizada. Vimos nas Aulas 6 e 7, vários exemplos que discutiam o conceito de **força** na Física, como podemos medir e operar com os vetores que representam as forças, por exemplo, a soma, a subtração e a decomposição de forças para compreender várias experiências do nosso dia-a-dia.

Vamos estudar aqui as leis de Newton, que são as leis que explicam os movimentos, ou seja, qual é a razão para que um objeto se movimente ou não.

O cientista inglês Isaac Newton (1642-1727) dedicou-se ao ensino universitário e ao estudo da Física, da Matemática, da Alquimia, da Teologia e, na fase final de sua vida, à Política.

O criador do conceito de força, **Isaac Newton**, estava preocupado em compreender as causas do movimento – ele se perguntava qual era o motivo para um corpo se movimentar.

Por exemplo, ele respondeu uma pergunta que raramente nos fazemos:

Quando jogamos uma pedra para longe, ela começa a se movimentar devido ao impulso dado pela mão. Mas, por que continua a se movimentar depois de estar solta, fora da mão?

Na Grécia antiga, essa pergunta foi respondida da seguinte forma: a natureza não gosta do vácuo. Então, quando a pedra sai de nossas mãos, deixa vazio o lugar onde estava, o ar que estava na frente da pedra vai para trás dela, ocupa o lugar vazio e ao mesmo tempo, vai empurrando a pedra para frente.

Essa solução foi dada numa época em que não se acreditava que podia existir o vácuo, ou seja, a ausência de ar. Hoje sabemos que existe e é possível fazer vácuo. Um exemplo é a embalagem do café a vácuo, vendida no supermercado.

Na Lua, os astronautas arremessaram pedras, e nenhuma delas teve problema para continuar seu trajeto, apesar de não haver atmosfera no nosso satélite!

Newton enunciou três leis. Elas explicam o movimento da pedra e por que os objetos se movimentam.

Fique ligado

Primeira lei de Newton: lei da inércia

Um carro está parado. Se não houver motivo para que ele se movimente, ele vai se movimentar? É óbvio que não!

Se um carro está se movimentando e não há motivo para que ele pare, ele vai parar? É óbvio que não!

Essa é a primeira lei de Newton. De alguma forma já sabíamos essas respostas, mas foi Newton quem enunciou essas situações em forma de lei da natureza.

Se entendermos "motivo" como uma força, enunciamos formalmente a lei como:

Lei da Inércia

Se a *soma das forças* que agem sobre um corpo for *nula*, ele manterá seu estado de *movimento*: se o corpo estiver em *repouso*, permanecerá em *repouso*; se estiver em *movimento*, sua velocidade será *constante*, ou seja, manterá um *movimento retilíneo uniforme*.

Inércia é uma **propriedade** dos corpos. Todo corpo que não tem motivo para alterar seu estado de movimento, não vai alterá-lo.

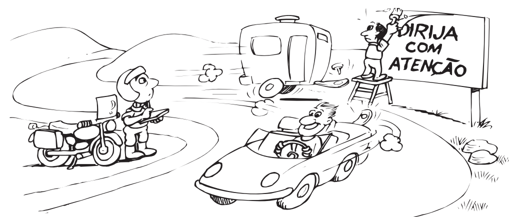


Figura 1

Passo-a-passo

Muitas pessoas viajam na carroceria de um caminhão. Se no meio da viagem o caminhão precisa frear bruscamente, as pessoas que estão na carroceria do veículo continuam seu movimento sendo jogadas para frente, pois não havia motivo para que parassem. E terão o mesmo problema quando o caminhão que estava parado sair em disparada: todos serão jogados para trás (Fig. 2), pois não têm motivo para se mover – o caminhão sai e as pessoas ficam.

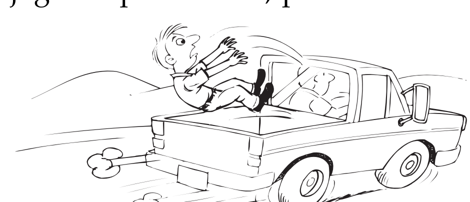


Figura 2

Muitos cavaleiros, ao saltar obstáculos com seu cavalo, podem encontrar dificuldades, quando o cavalo vem em disparada e refuga na hora do salto: o cavaleiro vai para o outro lado da cerca, mas sem o cavalo!

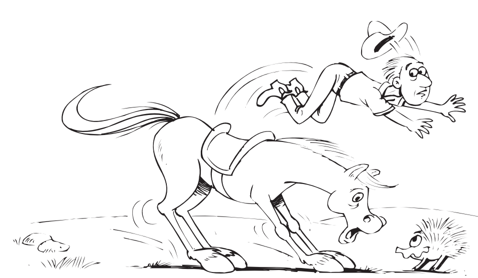


Figura 3

Gaspar saiu com seu Fusquinha para fazer um passeio. Como estava apressado, saiu sem verificar os pneus do carro, que estavam "carecas". No meio do passeio, começou a chover. Ele ligou o limpador de pára-brisa, acendeu os faróis, por precaução e, nesse momento, viu uma barreira de terra caída no meio da estrada. Rapidamente pisou no freio, mas, com a chuva, a lama e os pneus lisos não houve motivo, ou seja, não houve nenhuma **força** contrária ao movimento que fizesse o carro parar. O Fusca foi derrapando em Movimento Retilíneo Uniforme até bater num monte de areia, que exerceu uma **força** contrária ao movimento, e ele parou.

Sabemos que os corpos mais pesados têm maior inércia do que os mais leves. Assim, é mais difícil movimentar um corpo pesado do que um corpo leve, porque o mais pesado exige muito mais força.

Uma pergunta: é possível medir a inércia de um corpo?

Segunda lei de Newton: lei da força

É muito mais fácil empurrar um Fusquinha do que um caminhão. Assim como é muito mais fácil parar o Fusca do que o caminhão, se ambos tiverem a mesma velocidade. Isso é óbvio!

É sobre isso que a segunda lei de Newton trata: qual é a relação entre o movimento dos objetos e a **força** aplicada sobre eles.

Newton desenvolveu uma expressão matemática para descrever essa relação. Essa expressão matemática pode nos fazer compreender melhor as coisas que acontecem no nosso dia-a-dia. Por exemplo: um carrinho de mão vazio é muito mais fácil de carregar do que um carrinho de mão cheio de terra. Ou, ainda, o ônibus com poucos passageiros sobe com muito mais facilidade uma ladeira do que quando está lotado. Em compensação, quando o motor do ônibus pifa, é melhor que a lotação esteja completa, pois será mais fácil empurrar um ônibus com a ajuda de muitas pessoas do que com a de pouca gente!

Figura 4

Passo-a-passo

Vamos retomar a situação em que Gaspar bateu no monte de areia. Quando tentou pôr de novo em funcionamento o motor de seu Fusquinha, não conseguiu. Gaspar desceu do carro e foi pedir ajuda num bar próximo. Lá encontrou sua amiga Maristela, que se dispôs imediatamente a ajudá-lo.

Gaspar entrou no Fusca e Maristela começou a empurrá-lo. Mas o Fusca mal saiu do lugar. Maristela, então, foi chamando um a um dos seus amigos para ajudar a empurrar o Fusca. Gaspar que estava dentro do Fusca começou a observar o seguinte:

- Com uma pessoa, o Fusca que estava parado alcançou uma velocidade de 4 km/h, num tempo de 10 s (segundos).
- Com duas pessoas, o Fusca, de 0 km/h alcançou 8 km/h, em 10 s.
- Com quatro pessoas, a velocidade variou de 0 km/h até 16 km/h, em 10 s.
- Com oito pessoas, a velocidade variou de 0 km/h até 32 km/h, em 10 s.

TABELA 1			
NÚMERO DE PESSOAS	VELOCIDADE INICIAL (km/h)	VELOCIDADE FINAL (km/h)	TEMPO (s)
1	0	4	10
2	0	8	10
4	0	16	10
8	0	32	10

Recordando

Lembrete: como já vimos, para calcular a aceleração em $\mathbf{m/s^2}$ precisamos que a velocidade seja em **m/s** e não em **km/h.** Para isso, fazemos a seguinte transformação:

$$1\frac{\text{Km}}{\text{h}} = \frac{1.000\ \text{m}}{60\ \text{min}} = \frac{1.000\ \text{m}}{60 \cdot 60\ \text{s}} = \frac{1.000\ \text{m}}{3.600\ \text{s}} = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ou seja, para transformar qualquer velocidade de km/h para m/s devemos fazer a seguinte conta, por exemplo:

$$v_{1_{final}} = 4\frac{\text{Km}}{\text{h}} = 4 \cdot 1\frac{\text{Km}}{\text{h}} = 4 \cdot \frac{1}{3,6} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calcularmos a aceleração do Fusca, teremos:

com um homem: $a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t} = \frac{1,1 - 0}{10 - 0} = 0,11\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

com dois homens: $a_2 = \frac{\Delta v_2}{\Delta t} = \frac{2,2 - 0}{10 - 0} = 0,22\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

com quatro homens: $a_3 = \frac{\Delta v_3}{\Delta t} = \frac{4,4 - 0}{10 - 0} = 0,44\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

com oito homens: $a_8 = \frac{\Delta v_8}{\Delta t} = \frac{8,8 - 0}{10 - 0} = 0,88\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Vamos supor que cada homem faça 100 unidades de força (newtons), podemos ver que:

$$\mathbf{F_{1\,homem} = F_1 = 100\ N}$$
$$\mathbf{F_{2\,homens} = F_1 + F_1 = 2F_1 = F_2 = 200\ N}$$
$$\mathbf{F_{4\,homens} = F_2 + F_2 = 4F_1 = F_4 = 400\ N}$$
$$\mathbf{F_{8\,homens} = F_4 + F_4 = 8F_1 = F_8 = 800\ N}$$

onde, em cada situação, olhamos para a **soma das forças** que estão agindo sobre o veículo.

Assim, dividindo a força realizada pelos homens pela aceleração produzida no Fusquinha, teremos:

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{100}{0,11} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{200}{0,22} = \frac{F_4}{a_4} = \frac{400}{0,44} = \frac{F_8}{a_8} = \frac{800}{0,88} = 909,9 \frac{N}{m/s^2} \text{ Þ } \textbf{constante}$$

Podemos ver que a **força é diretamente proporcional à aceleração**, isto é, quanto maior for a força, maior será a aceleração. Podemos então escrever de modo geral:

$$\boxed{\vec{F}_{resultante} = m \cdot \vec{a}}$$

onde m é uma constante. Mas o que será esse **m**, essa curiosa constante?

Vamos imaginar que Gaspar estivesse num pequeno caminhão em vez de num Fusquinha. Quando fossem empurrar o caminhão, Gaspar observaria o seguinte:

Com uma pessoa, o caminhão, que estava parado alcançou uma velocidade de 1 km/h, num tempo de 10 s (segundos).
Com duas pessoas, o caminhão, de 0 km/h alcançou 2 km/h, em 10 s
Com quatro pessoas, a velocidade variou de 0 km/h até 4 km/h, em 10 s
Com oito pessoas, a velocidade variou e 0 km/h até 8 km/h, em 10 s

TABELA 2

NÚMERO DE PESSOAS	VELOCIDADE INICIAL (KM/H)	VELOCIDADE FINAL (KM/H)	TEMPO (S)
1	0	1	10
2	0	2	10
4	0	4	10
8	0	8	10

Se calcularmos a aceleração do caminhão, teremos:

com uma pessoa, $a_1 = \frac{Dv_1}{Dt} = \frac{0,28 - 0}{10 - 0} = 0,028 \frac{m}{s^2}$

com duas pessoas, $a_2 = \frac{Dv_2}{Dt} = \frac{0,56 - 0}{10 - 0} = 0,056 \frac{m}{s^2}$

com quatro pessoas, $a_3 = \frac{Dv_3}{Dt} = \frac{1,1 - 0}{10 - 0} = 0,11 \frac{m}{s^2}$

com oito pessoas, $a_8 = \frac{Dv_8}{Dt} = \frac{2,2 - 0}{10 - 0} = 0,22 \frac{m}{s^2}$

Como cada pessoa faz 100 unidades de força (newton), podemos ver que a razão

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{100}{0,028} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{200}{0,056} = \frac{F_4}{a_4} = \frac{400}{0,11} = \frac{F_8}{a_8} = \frac{800}{0,22} = 3571 \frac{N}{m/s^2} \text{ Þ } \textbf{constante}$$

o que, mais uma vez, é surpreendente.

Podemos ver que essa constante é bem maior no caso do caminhão do que no caso do Fusca. Essa constante tem um nome: nós a chamamos de **massa**.

Massa de um corpo é a medida de sua inércia!

Mas como assim? Vimos que com o mesmo número de pessoas é muito mais fácil acelerar o Fusca do que o caminhão, ou seja, o caminhão tem muito mais inércia do que o Fusquinha, ou ainda, a **massa** do caminhão é muito maior do que a do Fusca. Então, as massas são:

$$m_{\text{Fusca}} = 909{,}9 \frac{N}{m/s^2} = 909{,}9 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Caminhão}} = 3.571 \frac{N}{m/s^2} = 3.571 \text{ kg}$$

O símbolo **kg** é a representação de **quilograma**, a unidade de massa. Uma unidade bastante conhecida, usada para medir o tão popular "peso das coisas", na feira, que na realidade é a **massa** dos produtos. Agora poderemos prever qual é a força que age sobre um corpo se soubermos sua massa e a sua aceleração. Veja o exemplo a seguir.

Passo-a-passo

Um automóvel com massa de 1.200 kg está acelerando a uma razão de 10 m/s, a cada segundo, ou seja, tem uma aceleração de 10 m/s^2. Qual é a intensidade da força resultante que age sobre o automóvel? (Isto é, a força do motor menos a força de resistência que o ar e o solo fazem sobre o carro – força de atrito.)

Basta usarmos a segunda lei de Newton:

$$F_{\text{resultante}} = F_{\text{motor}} - F_{\text{atrito}} = ma \Rightarrow \quad F = 1.200 \text{ kg} \cdot 10 \frac{m}{s^2} = 12.000 \text{ N}$$

Ou seja, o carro está sob a ação de uma força de 12.000 newtons.

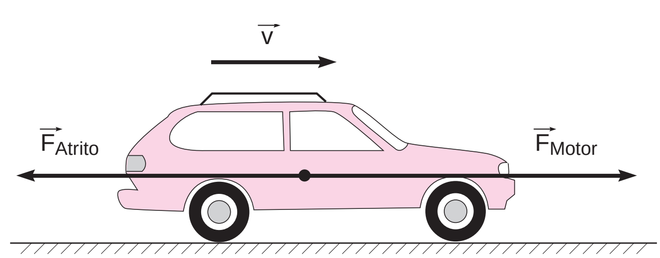


Figura 5

Terceira lei de Newton: ação e reação

Ou: quem empurra quem?

Podemos tocar numa parede sem que ela toque na gente? É óbvio que não!

Podemos empurrar um móvel (ou qualquer outra coisa), sem que ele nos empurre? É óbvio que não!

Essa pergunta pode ser feita também da seguinte forma: podemos fazer força sobre um objeto sem que esse faça força sobre nós? A resposta é **não**. Quando fazemos força sobre alguma coisa, essa coisa também faz força sobre nós.

Observação

Não é necessário que um corpo toque em outro para realizar uma força sobre aquele. Por exemplo, um ímã não precisa tocar em outro para atraí-lo, assim como a Terra nos atrai, mesmo quando não tocamos no chão; basta que pulemos para experimentar esse fato. Chamamos esse fenômeno de "interação à distância", enquanto que as forças que necessitam de contato para serem transmitidas, chamamos de "forças de interação por contato".

Passo-a-passo

Voltemos ao caso de Gaspar. Vamos imaginar que ele tivesse verificado os pneus antes da viagem e que tivesse colocado pneus novos. No momento que ele visse a barreira caída, pisaria no freio e o carro, com pneus novos, daria uma pequena derrapada, mas, logo em seguida, ia desacelerar até parar.

Podemos compreender essa situação em termos das leis de Newton. Ou seja, para que o carro pare é necessário um motivo, uma força, e a única coisa que estava em contato com o carro, no momento da freada, era o asfalto da estrada. O pneu parou de rodar e começou a raspar no asfalto, fazendo força sobre ele. O asfalto por sua vez, exerceu uma força de mesma intensidade e de sentido contrário sobre o pneu, fazendo com que o carro parasse.

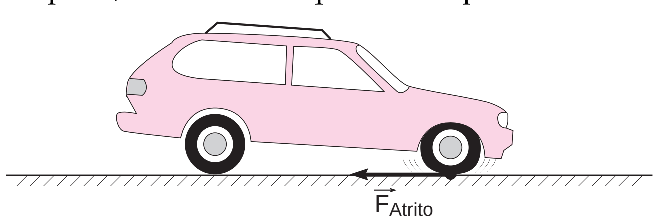


Figura 6

Será isso verdade?

Podemos verificar: na realidade, Gaspar não checou seus pneus e sofreu o acidente. Na freada, os pneus completamente lisos, não tocam no asfalto, pois, entre o pneu e o asfalto, a água forma uma camada fina que impede o contato entre os dois; com isso, o carro perde contato com o solo, não tendo assim motivo, ou uma força que o faça parar. Desliza até bater em algum "motivo" que o detenha, mas esse motivo pode ser, infelizmente, o caminhão da frente ou mesmo uma parede.

Há vários exemplos nos quais podemos verificar a terceira lei de Newton, como as situações apresentadas na Figura 7.

Figura 7

Podemos então escrever a terceira lei de Newton de uma forma mais precisa:

Se um corpo A faz uma força sobre o corpo B, o corpo B faz ao mesmo tempo uma força de mesma intensidade e de sentido contrário sobre o corpo A.

Podemos expressar essa lei na forma matemática:

$$\boxed{\vec{F}_{A \rightarrow B} = \vec{F}_{B \rightarrow A}}$$

Essa lei nos revela que ninguém **tem a força**, uma **força** não aparece sozinha, ela sempre aparece quando, no mínimo, dois corpos interagem um com o outro.

Isso é óbvio! Para que alguém faça uma força, é preciso ter um outro objeto para exercer essa força, caso contrário não haverá força. E, quando houver esse objeto, ele também fará força sobre quem o estiver empurrando, uma **força de mesmo valor e no sentido oposto**.

Mas há um detalhe muito importante: as **forças de ação e reação** estão sempre em corpos diferentes, ou seja, se empurramos uma parede, a força que se faz sobre a parede, está na parede, a força que a parede faz, isto é, a reação da parede, estará em quem a empurrou.

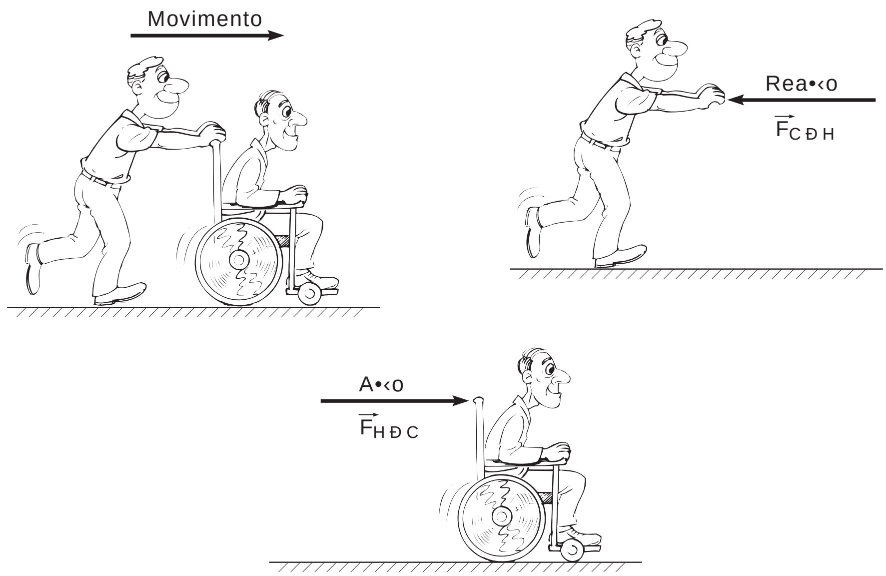


Figura 8

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- nunca devemos usar as três leis de Newton separadas, pois na verdade são necessárias todas juntas para que possamos compreender os fenômenos da Mecânica;
- um corpo só altera seu estado de movimento quando a soma das forças que agem sobre ele é diferente de zero;
- a soma de forças (resultante) é igual à massa do corpo vezes sua aceleração;
- todo corpo que exerce uma força sobre outro corpo, recebe uma força de reação de mesma intensidade emesma direção, mas de sentido contrário.

Mãos à obra

Exercício 1
Explique, usando as três leis de Newton, por que quando estamos em um ônibus e ele freia repentinamente, temos a impressão de que somos lançados para frente.

Exercício 2
Ao estudar Cinemática, descobrimos que os corpos caem, quando não há interferência da atmosfera, com uma aceleração de 10 m/s^2. Podemos, então, calcular a força com que a Terra nos atrai para o solo. Uma menina tem 45 quilogramas de massa. Qual é a força de atração com que a Terra atrai essa menina?

Exercício 3
Para pensar: se, quando empurramos um carro, este faz uma força de mesma intensidade no sentido contrário, por que então conseguimos empurrá-lo?

Exercício 4
Calcule a força motora de um caminhão que tem uma aceleração de 5 m/s^2, quando está com uma carga de 5 toneladas (5.000 kg).

AULA

9

Como erguer um piano sem fazer força

PARA COMEÇAR

Como vimos na aula sobre as leis de Newton, podemos olhar o movimento das coisas sob o ponto de vista da Dinâmica, ou melhor, olhando os "motivos" que levam um objeto a se mover. O que vamos fazer nesta aula é aplicar essas leis em diversas situações.

Temos sempre problemas para levantar objetos muito pesados. Muitas vezes são tão pesados que não conseguimos tirá-los do chão. Outras vezes estamos com problemas nas costas, que não nos permitem nem levantar um pequeno peso.

Esse problema de levantar pesos é antigo. Os egípcios já enfrentavam esse problema, quando tinham que levantar pedras imensas na construção das pirâmides. Mesmo de brincadeira, vemos a necessidade de levantar pesos. Nos filmes do Tarzan, o "rei da selvas" recrutava sempre um elefante para erguê-lo até sua casa na árvore. Nos portos, quando os navios trazem cargas enormes, é necessário sugerir soluções que facilitem e agilizem a descarga do material.

Vamos usar nossos conhecimentos das leis de Newton para resolver e propor soluções para alguns problemas, que à primeira vista parecem simples, mas que são uma chave para problemas maiores, como por exemplo a descarga de material em um porto.

Fique ligado

Vamos resolver esses problemas em alguns passos, para compreender melhor o que está acontecendo em cada situação.

Normalmente teremos três passos, conforme descrito a seguir:

a) isolamento dos corpos (diagrama de forças);
b) construção das equações dinâmicas;
c) solução das equações dinâmicas.

Vamos analisar um exemplo bem simples para treinar o uso desses passos:

Passo-a-passo

Vamos supor que Gaspar queira colocar um pacote de feno no sótão do celeiro de sua pequena fazenda. Esse pacote tem uma massa de 100 kg. Gaspar, que estava gordo nessa época, com uma massa de 80 kg, teve recomendação médica para não carregar muito peso e ficou preocupado com o peso do pacote.

Maristela sugeriu que Gaspar comprasse uma roldana, para facilitar o serviço. Disse que em sua viagem até o litoral tinha ido ao porto e visto muitas roldanas por lá e achava que, com elas, seria muito fácil carregar grandes pesos.

Antes de comprar a roldana, Gaspar resolveu fazer um **esboço da situação** e calcular qual seria a força que teria de fazer para elevar o feno com uma roldana; e mais, queria saber qual seria a força que o teto teria que fazer para agüentar todo o sistema. Podemos ver na Figura 1 o esboço feito por Gaspar:

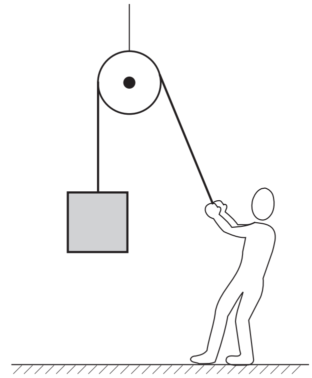


Figura 1

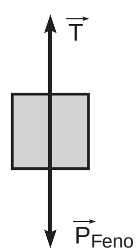
Gaspar seguiu então os três passos para a utilização das leis de Newton. Vejamos ao primeiro passo :

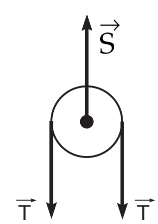
1º passo – Isolamento dos corpos (diagrama de forças)

"Isolar" o corpo é **separá-lo do ambiente que o cerca**, ou seja, Gaspar está interessado em estudar quais são as forças que estão agindo sobre o feno e a roldana, quais são os motivos que levam o feno a ficar suspenso e a roldana parada.

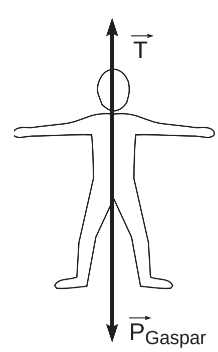
Gaspar sabe que, quando o pacote está suspenso, está sob a ação de duas forças.

> A força **peso** ($\vec{P}_{Feno}$), que é a **força de atração** que a Terra faz sobre todos corpos na superfície do planeta e a força **($\vec{T}$),** que a corda faz sobre o pacote.





A roldana está sob ação da força de sustentação ($\vec{S}$), que o teto faz sobre ela, e sob a ação da força que a corda faz ($\vec{T}$). Como sua massa é muito pequena, não consideramos o seu peso.



E sobre ele próprio estão agindo a força da gravidade ($\vec{P}_{Gaspar}$) e a força que a corda faz nele ($\vec{T}$).

Como podemos ver nas ilustrações do pacote, da roldana e de Gaspar, todos estão isolados e as forças que agem sobre eles estão indicadas (diagrama de forças).

Gaspar começou então o segundo passo:

2º passo – Construção das equações dinâmicas

Aqui, usamos a segunda lei de Newton, ou seja, queremos saber sobre a **resultante** das forças ($\vec{R}$), que age em cada corpo. Sabemos que a força resultante sobre um corpo é a soma de todas as forças que estão agindo sobre ele. Fazendo a soma das forças, Gaspar pode verificar as condições necessárias para que o feno fique, **no mínimo**, suspenso.

Aplicamos então a segunda lei de Newton para estudarmos o que ocorre com o pacote de feno. Como podemos ver na figura do isolamento, o pacote de feno está sob a ação de duas forças que agem em sentidos opostos. Devemos então definir um referencial, por exemplo, podemos dizer que "tudo que aponta para cima é positivo", com isso podemos escrever a equação dinâmica para o pacote de feno:

$$F_{resultante} = R_{feno} = T - P_{feno} = m \cdot a_{feno} = 0$$

A força resultante é igual a zero, pois Gaspar está interessado na situação em que ele está **apenas sustentando** o pacote sem que ele se mova; isso significa que a aceleração do pacote de feno é zero. O valor da força peso é positivo devido ao vetor peso estar "apontando" para baixo, enquanto o vetor T está "apontando" para cima, por isso o valor do vetor T é negativo. Obtemos, então, a equação dinâmica do pacote de feno.

$$\boxed{T - P_{feno} = 0}$$

A roldana, como podemos ver na figura do isolamento, está sob a ação da força de sustentação ($\vec{S}$), que o teto do celeiro exerce sobre ele e, sob a ação da corda que a puxa por duas vezes.

Nesse caso Gaspar está fazendo duas considerações:

- Que o peso da roldana e da corda é desprezível perto do peso do pacote de feno.
- E que a corda é ideal, ou seja, ela não se distende e transmite totalmente a força que é feita numa ponta para todos os seus pontos.

Assim, a equação dinâmica para a roldana é, considerando o mesmo referencial que foi adotado para o feno:

$$F_{resultante} = R_{roldana} = m_{moldana} \cdot a = 0 = S - T - T$$

$$\boxed{S - 2T = 0}$$

E, finalmente, a equação dinâmica do próprio Gaspar. Neste caso, precisamos observar que se o feno sobe, Gaspar vai descer. Então se o sentido "positivo" para o feno é o de subida, para Gaspar o sentido "positivo" será o de descida! Assim teremos a seguinte equação dinâmica:

$$F_{resultante} = R_{Gaspar} = m_{Gaspar} \cdot a = 0 = P_{Gaspar} - T$$

$$\boxed{P_{Gaspar} - T = 0}$$

Apesar de termos três equações simples, vamos realizar o terceiro passo.

3º passo – Solução das equações dinâmicas

Usando a equação do pacote de feno, temos

$$T = P_{feno}$$

$$T = m_{feno} \cdot g = 100 \text{ kg} \cdot 10 \ \frac{m}{s^2} = 1.000 \text{ N}$$

Com a equação da roldana:

$$S = 2\,T$$

$$S = 2 \cdot 1.000 \text{ N} = 2\,000 \text{ N}$$

E com a equação para Gaspar:

$$T = P_{Gaspar}$$

Com isso, Gaspar pode prever que a força que o teto faria para sustentar o sistema é igual ao dobro do peso do feno ($S = 2T$).

Mas houve um problema: a força que Gaspar teria que fazer é, no mínimo, igual ao peso do feno.

Que vantagem houve em usar uma roldana ($T = P_{feno}$)?

Houve uma vantagem: agora basta que Gaspar se pendure na corda para que a feno fique suspenso, pois seu próprio peso pode servir como uma força para sustentar o feno ($T = P_{Gaspar}$).

Mais uma vez aparece um problema, pois a última equação nos diz que, no mínimo, Gaspar precisa ter o mesmo peso que o pacote de feno:

$$P_{feno} = T = P_{Gaspar}$$

Mas Gaspar tem uma massa de apenas 80 kg, o que significa um peso de 800 N.

Ou seja, Gaspar não conseguiu resolver seu problema. Mas ele não desistiu, logo começou a pensar num jeito de não ter que fazer tanto esforço.

Finalmente surgiu uma idéia!

Passo-a-passo

Gaspar resolve colocar mais uma roldana em jogo, e faz o seguinte desenho.

Gaspar fica muito animado com sua idéia e rapidamente começa a trabalhar na previsão da força que ele terá de fazer.

Assim, começa o primeiro passo:

1º passo – Isolamento dos corpos (diagrama de forças)

Pelo desenho de Gaspar, é possível ver que o pacote de feno permanece na mesma situação. O que temos de novo é a segunda roldana e mais um pedaço de corda, que prende a segunda roldana no teto do celeiro.

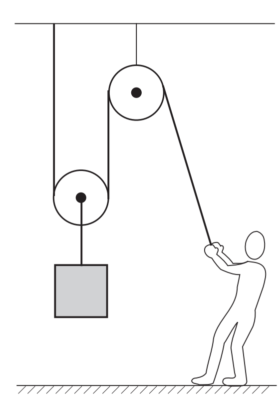


Figura 3

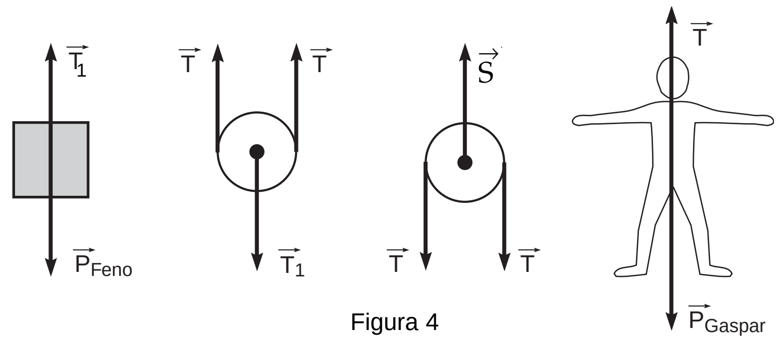


Figura 4

Feito o desenho, ele rapidamente passa ao segundo passo.

2º passo – Construção das equações dinâmicas

Gaspar, então, montou as equações dinâmicas, usando a segunda lei de Newton:

$$R_{feno} = m_{feno} \cdot a = T_1 - P_{feno} = 0$$

$$R_{roldana\ 1} = m_{roldana\ 1} \cdot a = T + T - T_1 = 0$$

$$R_{roldana\ 2} = m_{roldana\ 2} \cdot a = S - T - T = 0$$

$$R_{Gaspar} = m_{Gaspar} \cdot a = P_{Gaspar} - T = 0$$

3º passo – Solução das equações dinâmicas

Temos, então, que

$$T_1 = P_{feno}$$

$$T_1 = m_{feno} \cdot g = 100\ \text{kg} \cdot 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1.000\ \text{N}$$

$$\boxed{T_1 = 1.000\text{N}}$$

$$2\,T = T_1$$

$$T = \frac{T_1}{2} = \frac{1000}{2}$$

$$\boxed{T = 500\ \text{N}}$$

$$S = 2\,T$$

$$S = 2.500$$

$$\boxed{S = 1000\ \text{N}}$$

Gaspar, agora, começa a estudar seus resultados. O primeiro resultado é que a força que Gaspar terá que fazer na corda (T) é igual a 500 newtons, ou seja, é a metade da força no caso anterior.

A parede terá que resistir, na primeira roldana, a uma força de 500 newtons e, na segunda roldana, a uma força de 1.000 newtons.

Certamente, com seu peso de 80 kg, Gaspar poderá levantar o pacote de feno, basta que ele se pendure na corda, será o suficiente para que o pacote suba!

Gaspar pôde, usando as leis de Newton, prever que força ele teria que fazer usando um sistema de roldanas. Certamente o valor encontrado não será exatamente o que ele vai encontrar quando for construir o sistema real, pois **foram feitas algumas aproximações**, como considerar a massa da corda e da roldana iguais a zero, e desprezar o atrito da roldana com seu eixo de rotação, mas com todas essas aproximações, Gaspar ainda fará uma força menor do que o peso do pacote de feno.

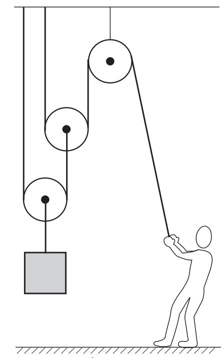


Figura 5

Que força Gaspar teria de fazer se tivesse montado o sistema com mais uma roldana (Figura 5)?

Observação

Na primeira situação, Gaspar não conseguiria levantar o feno, pois, mesmo que ele se pendurasse na corda, seu peso era menor que o do pacote de feno.
Na segunda situação, com o auxílio de mais uma roldana, a força necessária para levantar o pacote era menor que o peso de Gaspar; com isso, se ele se pendurasse na corda, o feno iria se levantar.
Quando há um excesso de peso em um dos lados da corda, chamamos isso de **contrapeso**. Em várias situações em que temos uma só roldana, o contrapeso servirá como um grande auxiliar no levantamento de grandes pesos. Por exemplo, nos elevadores:

Normalmente podemos ver como funciona um elevador de um edifício em construção, pois sua estrutura está à mostra. Observe a Figura 6: o elevador é sustentado por um cabo que vai até uma grande polia e volta, passando por um bloco de cimento; e vai direto a um motor de sustentação, que se encontra no solo. Esse tipo de elevador carrega tanto material como pessoal de serviço e isso, de forma geral, exige muito do motor.

Nesse tipo de situação, evita-se o uso de muitas roldanas, pois o espaço para colocá-las nem sempre está disponível.

Para não exigir muito do motor, colocam-se os contrapesos, assim como está indicado na Figura 6.

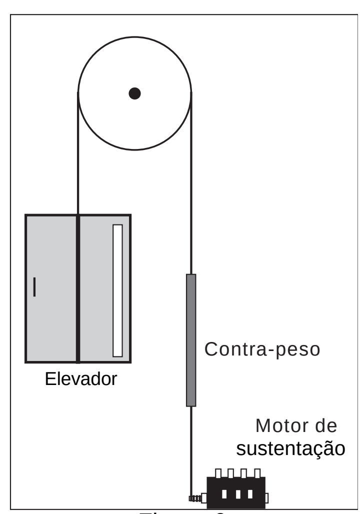


Figura 6

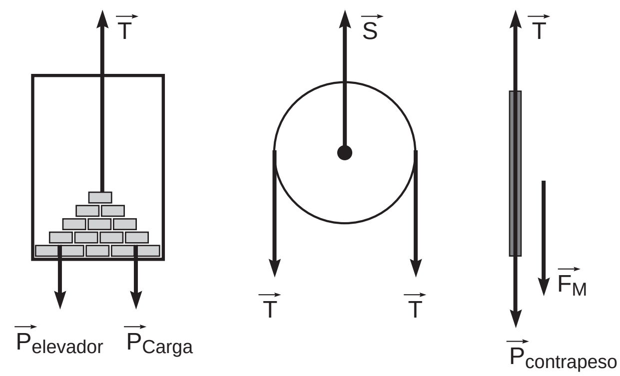
Passo-a-passo

Algumas vezes durante o período de construção de parede, período no qual as paredes nos andares superiores são levantadas, os elevadores têm que subir carregados de tijolos. Essa é a etapa de construção em que os elevadores são mais exigidos.

Vamos calcular qual a força que um motor de sustentação de um elevador de construção tem que fazer para suspender uma carga de 500 kg de tijolos, de modo que essa carga suba com uma aceleração de 1 m/s^2.

Temos que levar em consideração a massa da cabina do elevador que é da ordem de 250 kg e a massa do contrapeso que é igual a 250 kg. Novamente estamos desprezando a massa do cabo e da roldana.

1º passo – Isolamento (diagrama de forças)



Como podemos ver na Figura 7, o conjunto da cabina de carga e de tijolos está sob a ação da força da gravidade ($\vec{P}_e + \vec{P}_c$) e o cabo de sustentação ($\vec{T}$).

A roldana está sob a ação do cabo de sustentação ($\vec{T}$) e o teto do elevador ($\vec{S}$).

O contra-peso esta sob a ação do cabo de sustentação ($\vec{T}$), o seu próprio peso ($\vec{P}_{cp}$) e a força que o motor faz sobre ele ($\vec{F}_m$).

Podemos então passar ao segundo passo:

2º passo – Construção das equações dinâmicas

Pela figura, podemos escrever que:

$$R_{elevador} = (m_{elevador} + m_{carga}) \cdot a = T - P_{elevador} - P_{carga}$$

$$R_{contrapeso} = m_{contrapeso} \cdot a = F_{motor} + P_{contrapeso} - T$$

$$R_{roldana} = m_{roldana} \cdot a = S - T - T = 0$$

E essas são as três equações dinâmicas do sistema.

3º passo – Solução do sistema dinâmico

Antes de mais nada, precisamos calcular o peso dos objetos que estão envolvidos no processo:

$$P_{elevador} = m_{elevador} \cdot g = 250\ kg \cdot 10\ \frac{m}{s^2} = 2.500\ N$$

$$P_{carga} = m_{carga} \cdot g = 500\ kg \cdot 10\ \frac{m}{s^2} = 5.000\ N$$

$$P_{contrapeso} = m_{contrapeso} \cdot g = 250\ kg \cdot 10\ \frac{m}{s^2} = 2.500\ N$$

Com isso, podemos calcular as equações dinâmicas. Temos, então, para a cabina e a carga, a 1ª equação dinâmica:

$$T - 2.500 - 5.000 = (250 + 500) \cdot 1$$
$$T = 7.500 + 750$$
$$\boxed{T = 8.250\ \text{N}}$$

Para o contrapeso:

$$F_{motor} + 2.500 - 8.250 = 250 \cdot 1$$
$$F_{motor} = 250 + 5.750$$
$$\boxed{F_{motor} = 6.000\ \text{N}}$$

Isso mostra que o motor faz uma força **menor** do que o peso do elevador e da carga **juntos** ($P_{elevador} + P_{carga} = 7.500$N). Para a roldana temos:

$$S = 2T = 2 \cdot 8.250 = 16.500\ \text{N}$$
$$\boxed{S = 16.500\ \text{N}}$$

Ou seja, o teto do elevador sustenta todo o sistema: elevador, carga, contrapeso e mais a força que o motor faz na corda. Por isso, ele deve ser planejado e construído para suportar grandes cargas.

Para terminar

Nesta aula, vimos como usar as leis de Newton para **planejar** e **prever** o comportamento dinâmico de alguns sistemas, usando três passos básicos:

- isolamento (diagrama e forças);
- equações dinâmicas;
- solução das equações dinâmicas.

Vimos também como usar polias para diminuir o esforço no levantamento de grandes pesos.

Também vimos como usar contrapesos para diminuir a exigência sobre um motor de sustentação num elevador.

Mãos à obra

Exercício 1

Nos elevadores de prédios comerciais, recomenda-se que a aceleração máxima a que os passageiros podem ser submetidos é de 1 m/s^2. Suponhamos que 10 passageiros, de 70 kg cada, entrem na cabina do elevador, que tem massa igual a 200 kg, e esta esteja sendo puxada pelo cabo com uma força de 9.100 N. Qual será a aceleração a que os passageiros estarão submetidos?

Exercício 2

Vimos que, quando aumentamos o número de roldanas, a força necessária para levantar um objeto diminui. Podemos ver que para cada roldana colocada a força necessária é dividida por dois. Mas as roldanas não são mágicas, isto é, existe um custo para que a força diminua. Qual é esse custo? (Lembre-se de qual é o outro material necessário, além das novas roldanas, para que o sistema funcione!)

Exercício 3

Imagine que Gaspar queira descer uma caixa cheia de pratos de louça, no seu sistema com uma roldana. O peso da caixa é de 1.200 newtons (o que equivale ao peso de uma massa de 120 kg). Sabendo que Gaspar pesa 80 kg, o que ocorrerá com a caixa de pratos? Calcule a aceleração que a caixa terá.

AULA

10

Ou vai ou racha!

PARA COMEÇAR

Sempre que se empurra algum móvel pesado em casa, passa-se por um grande problema: além de termos que arrastar o móvel, o chão fica todo arranhado.

Quando se tem um móvel com muitas coisas dentro, a primeira coisa que se faz é esvaziar o móvel, deixando-o totalmente vazio. Todos os copos, pratos e panelas são retirados. Mas nem sempre adianta, pois ele pode ser muito pesado, mesmo estando vazio.

Figura 1

O enorme móvel tem que ser deslocado da cozinha para a sala, mas com seu peso, a tarefa se torna quase impossível!

São chamados então os familiares, se ainda assim não for possível, são chamados, também, os amigos e mais os vizinhos, se necessário!

Com essa multidão, o móvel mal saiu do lugar. Quando todos se cansaram, o tumulto logo virou uma grande festa. Os copos, que foram tirados do armário, rapidamente ficaram cheios de cerveja, num mar de piadas e brincadeiras com os amigos e vizinhos que há muito não conversavam.

Esse problema foi resolvido com uma grande festa.

Fique ligado

Haveria outra maneira de resolver esse problema sem que fosse necessário dar uma festa?

Em nossa vida diária, encontramos alguma forma de resistência sempre que queremos empurrar alguma coisa: um carro quebrado, ou, por exemplo, quando estamos num restaurante e uma pessoa não levanta a cadeira para sentar, mas a arrasta fazendo um barulho terrível; quando vemos uma criança brincando com o vento, colocando a mão para o lado de fora do carro em movimento; quando vamos à beira-mar e não conseguimos correr dentro da água com facilidade; ou, ainda, quando esquecemos de colocar óleo no automóvel e o motor trava.

Podemos ver que existe, em quase todo movimento no nosso dia-a-dia, uma força contrária, que chamamos de **força de atrito**!

Essa força está presente quando tentamos colocar um parafuso na parede e não conseguimos girá-lo mais. Pode ser encontrada quando um carro está na estrada e o vento que sentimos na janela é o mesmo ar que se choca contra o pára-brisa, exercendo uma força de resistência ao movimento do carro.

Podemos ver, também, algumas formas de se tentar driblar o atrito; um exemplo, está na maior aerodinâmica dos carros de Fórmula 1. Temos outro nos nadadores que raspam a cabeça e pernas para que os pêlos do corpo não atrapalhem seu movimento na água; ou, ainda, na criança que põe a mãozinha para fora da janela do carro e fica mexendo-a até encontrar a posição de menor resistência. São inúmeros os exemplos de nossa vida onde surgem as forças de resistência ao movimento.

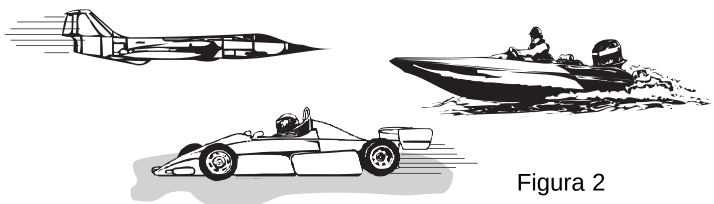


Figura 2

Mas vamos compreender o que ocorreu com o armário, usando as leis de Newton. Como vimos, o armário não se moveu; ou seja, na linguagem da Física, a **soma das forças** que estavam agindo sobre o armário era **igual a zero.**

Podemos usar novamente os três passos que aprendemos nas aulas anteriores e, assim, **estudar** e **propor alguma solução** para o problema do armário.

1º passo – Isolamento

No diagrama de forças que está na Figura 3, podemos ver quatro forças aplicadas ao armário:

- a força de atração que a Terra exerce sobre todos os corpos que estão perto da sua superfície, o **peso** ($\vec{P}_A$);
- a força ($\vec{F}$) que **as pessoas estão fazendo** sobre armário;
- a força que o chão faz para sustentar o armário ($\vec{N}$), que chamamos de **força normal**, por ser uma força que está sempre perpendicular em relação à superfície de contato entre o corpo e o solo;
- a força que o chão faz para impedir que o armário vá para frente ($\vec{f}_{at}$), que chamamos de **força de atrito.**

Vamos entender melhor a força de atrito:

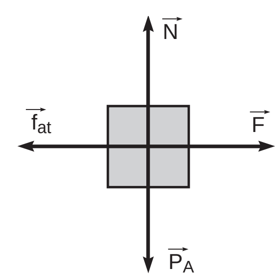


Figura 3

Força de atrito

A força normal e a força de atrito representam a resistência que o chão faz para impedir o movimento do armário.

Existe uma correspondência entre essas duas forças. A força de resistência exercida pelo chão é uma força só, como podemos ver no diagrama ao lado:

As forças que chamamos de **normal** e de **atrito** são, na verdade, os componentes da força de resistência (Figura 4). A força normal é a parte da força de resistência que impede que o **armário desça,** enquanto a força de atrito é a parte da força de resistência que impede que o corpo **se desloque na direção da força F.**

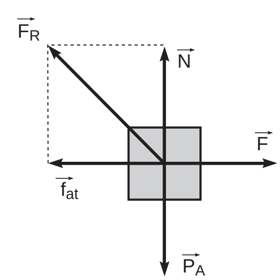


Figura 4

Por isso, existe uma relação entre essas duas forças, ou seja, é possível mostrar que seus **módulos** são **diretamente proporcionais:**

$$\boxed{\mathbf{f_{at} = m\mu . N}}$$

ou seja, se N aumenta, f_{at} também aumenta.

A constante **μ** nos informa se o solo exerce muito ou pouco atrito sobre o corpo que está em contato com ele. Ou seja, se **μ** é grande, temos um solo muito áspero, com muito atrito, enquanto se **μ** é pequeno, o solo é mais liso, com pouco atrito.

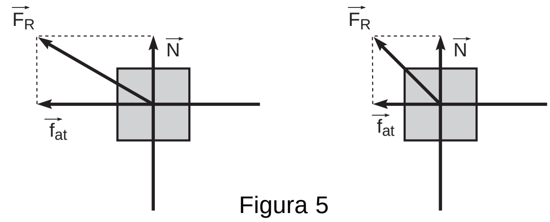


Figura 5

μ grande –> f_{at} grande e **μ** pequeno –> f_{at} pequeno. N é constante nos dois casos!

Mas o que ocorre com a força de atrito quando o corpo está parado?

Atrito estático e atrito dinâmico

Se não há alguém puxando ou empurrando o armário, não haverá motivo para que o solo impeça seu movimento (Figura 6); mas, se começamos a empurrar o armário com uma força pequena, que não é suficiente ainda para que ele se mova, (por exemplo, o armário sendo empurrado por uma pessoa), podemos ver que aparece uma força de atrito para impedir que o armário ande, e, à medida que mais pessoas vão empurrando, a força de atrito vai aumentando, até que, finalmente, um número suficiente de pessoas consiga empurrar o armário. Isso significa que a força de atrito parou de crescer.

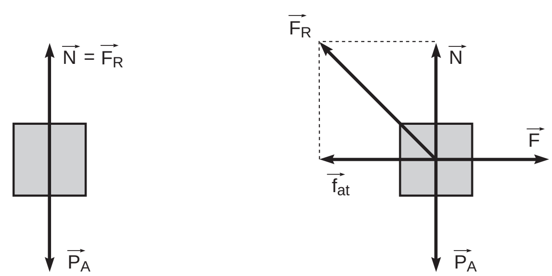


Figura 6

Podemos fazer um gráfico do comportamento da força de atrito em relação à força que está sendo aplicada no armário (Figura 7)

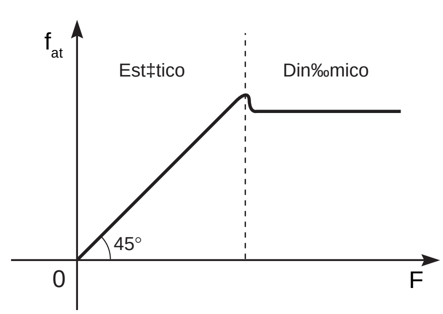


Figura 7. Gráfico f_{at} X F

Enquanto a força de atrito está aumentando, o armário não se move. Chamamos, nessa situação, o atrito de: **atrito estático**.

Quando a força que está sendo feita sobre o armário aumenta o suficiente para movimentá-lo, a força de atrito passa a ter seu valor constante, chamamos então, nessa situação, o atrito de **atrito dinâmico.**

Um exemplo muito comum disso acontece quando empurramos um carro: inicialmente começamos a fazer uma certa força e vamos aumentando essa força até que o carro comece a andar; nesse momento, a força que fazemos para empurrar o carro é menor do que no instante anterior em que o carro ainda estava parado.

É preciso observar que, em cada uma dessas situações, o coeficiente de atrito é diferente apesar de estarmos olhando para o mesmo corpo, ou seja, estando ele parado ou em movimento.

Por isso, haverá o coeficiente de atrito estático **(μ_e)** e o coeficiente de atrito cinético (μ_c), que serão usados, dependendo se o objeto que está sob a ação da força de atrito estiver parado ou se movendo.

Aspectos positivos da força de atrito

Nem sempre a força de atrito nos atrapalha nas tarefas que temos que cumprir. Ao contrário, muitas vezes ela nos ajuda.

Por exemplo, quando andamos, estamos "empurrando" o chão para trás e este nos empurra para frente, permitindo que andemos. Imagine se caminhássemos sobre uma superfície de gelo, ou mesmo por um chão cheio de cera, teríamos problemas para nos deslocar, pois não haveria atrito.

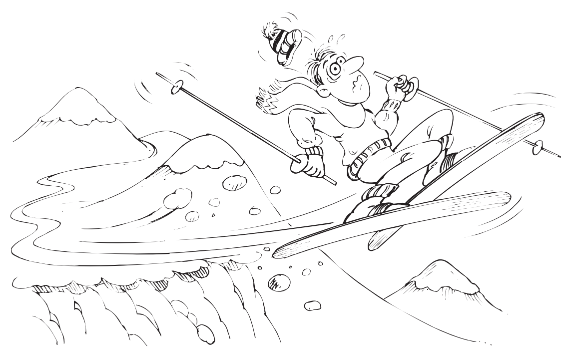


Figura 8

Um automóvel anda para a frente quando seus pneus "empurram" o chão para trás e este os empurra para frente. Quando o carro faz uma curva, isso ocorre porque existe o atrito entre o pneu e o chão; se não houvesse esse atrito o carro sairia reto nas curvas.

Em várias indústrias, existem esteiras para transporte de material, desde grãos de trigo a limalha de ferro (esta última para ser jogada em fornos). Essas esteiras transportam o material porque existe um atrito entre elas e o material. Se não houvesse, o material ficaria escorregando na esteira sem conseguir sair do lugar.

Vários são os exemplos em que o atrito nos ajuda em nosso dia-a-dia.

Mas, voltemos ao problema do armário. Como já fizemos o **isolamento**, agora vamos ao segundo passo: **construir as equações dinâmicas**, usando a segunda lei de Newton.

2º passo – equações dinâmicas

Qual será a força mínima que deve ser feita para que o armário se mova, supondo que o armário tenha um peso de 200 kg e que o coeficiente de atrito estático entre o solo e o armário μ_e seja igual 0,5?

Sabendo que ele não vai se mover no sentido vertical, por isso, podemos escrever que a soma das forças na vertical é igual a zero:

$$P - N = 0 \rightarrow N = P$$

Supondo a força máxima que podemos fazer para que o armário esteja prestes a se mover, mas que ainda não tenha se movido:

$$F - f_{at} = 0 \Rightarrow F = f_{at}$$

Obteremos, então, duas equações dinâmicas:

$$\boxed{N = P} \quad e \quad \boxed{F = f_{at}}$$

Podemos, assim, passar para o terceiro passo que resolve esse sistema de duas equações e duas incógnitas (F e N):

Solução das equações dinâmicas

Na primeira equação temos que:

$$N = P = mg = 200\ kg \cdot 10\ m/s = 2.000\ N \qquad \boxed{N = 2.000\ N}$$

Na segunda equação, precisamos lembrar da relação entre a força de atrito e a força normal:

$$F = F_{at} = m\mu \cdot N = 0{,}5 \cdot 2.000 = 1.000\ N \qquad \boxed{F = 1.000\ N}$$

E essa é a força máxima que podemos fazer antes que o armário se mova. Essa força é equivalente a levantar um peso de 100 kg.

Com isso, pudemos prever a força mínima que devemos fazer para que o armário esteja prestes a se mover. Mas precisamos de alguma forma diminuir a força de atrito para empurrar com mais facilidade o armário. Uma solução já havia sido dada, que é simplesmente diminuir o peso do armário, com isso diminuímos a força normal e, conseqüentemente, a força de atrito.

Mas às vezes isso não é suficiente. Precisamos controlar a força de atrito de outra forma: a única forma que nos resta, fora controlar o peso do armário, é controlar a força de atrito pelo coeficiente de atrito (**μ**). No coeficiente de atrito, está a informação se o atrito entre duas superfícies é grande ou não.

Se o atrito entre o chão e o armário é grande, temos que colocar algum material entre o armário e o chão que diminua o coeficiente de atrito.

Vamos supor que o chão é de madeira. Uma forma de diminuir o atrito seria colocar um pano entre o armário e o chão. Alguns móveis poderiam ser rapidamente movimentados com essa solução, principalmente os de fundo muito áspero.

Uma outra forma seria colocar cera no chão. Assim como a água provoca a derrapagem de um carro, por se transformar numa pequena camada entre o pneu e o asfalto, fazendo com que o carro perca o contato com o asfalto, a cera faria o mesmo papel, seria uma pequena camada entre o móvel e o chão de modo que este deslizaria pela madeira. Andar num chão encerado, é uma experiência muito comum e pode provocar grandes quedas e escorregões!

Essas são soluções que podem ser aplicadas em várias situações, por exemplo quando queremos pendurar um quadro ou prender uma estante na parede; fazemos um furo e colocamos uma bucha, mas quando posicionamos o parafuso, temos dificuldade para girá-lo até o fim da bucha. Isso pode ser solucionado colocando-se um pouco de óleo de cozinha, ou mesmo um lubrificante dentro da bucha, que tem a função de diminuir o atrito entre o parafuso e a bucha.

Vimos nesta aula:

- O conceito de **força de atrito** ($\vec{f}_{at}$);
- sua relação com a força normal ($\vec{N}$);

que pode ser representada pela equação:

$$F_{at} = \mu N$$

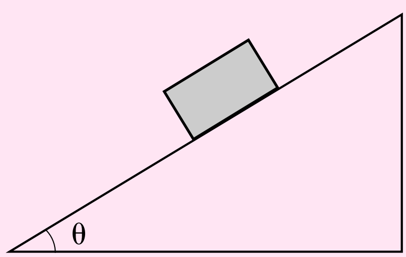
- vimos também como resolver situações em que o atrito atrapalha nosso serviço, ou seja, podemos planejar para antecipar as conseqüências do movimento de um corpo em situações onde haja atrito;
- e outras situações em que o atrito nos ajuda a realizar movimentos ou tarefas.

Exercício 1

Para pensar: nas fábricas de automóvel, são pintados carros de várias cores. O que aconteceria se a lataria do carro fosse muito lisa? A tinta se "prenderia" na lataria?

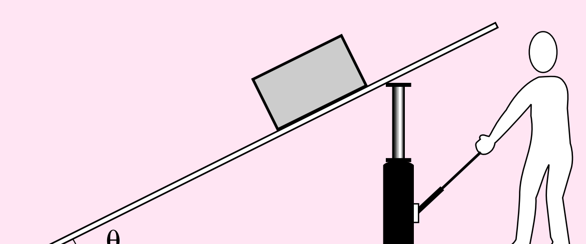
Exercício 2

Na figura abaixo, vemos um plano, que tem uma inclinação segundo o ângulo θ com a horizontal. Qual será a inclinação máxima que o plano pode ter sem que a caixa escorregue ladeira abaixo? Suponha que a massa m da caixa seja igual a 100 kg e que o coeficiente de atrito estático μ seja igual a 0,5.



Exercício 3

Um operário deseja empurrar uma caixa de 100 kg, sobre uma superfície de madeira, mas não sabe quanta força no mínimo terá que fazer para conseguir seu intento. Para descobrir, ele precisa obter o coeficiente de atrito estático entre o fundo da caixa e a superfície. Portanto, realiza a seguinte experiência: coloca a caixa sobre um pedaço de madeira e, com seu macaco hidráulico, vai inclinando o conjunto como vemos na figura abaixo. Finalmente, ele mede o ângulo em que a caixa começa a deslizar. Faz isso várias vezes e descobre um valor médio de $26,5^0$, para o ângulo. Dadas essas informações, qual é o coeficiente de atrito entre a caixa e a madeira?



AULA

11

Vamos dar uma voltinha?

PARA COMEÇAR

A patinadora desliza sobre o gelo, braços estendidos, movimentos leves, música suave. De repente encolhe os braços junto ao corpo, gira velozmente como um pião, volta a estender os braços e pára por alguns instantes. O público, encantado, aplaude.

Cristiana, comovida, assiste à cena pela televisão. Então, uma pergunta lhe ocorre. Por que sempre que giram desse jeito os patinadores encolhem os braços e, quando querem parar, voltam a estendê-los? Será que isso tem alguma coisa a ver com a Física?

É claro que sim. Tudo tem a ver com a Física. Se ela fizer essa pergunta a um físico, ele provavelmente lhe dirá que a patinadora encolhe os braços para girar mais depressa, devido ao **princípio da conservação do momento angular**. É uma forma complicada de explicar uma idéia razoavelmente simples. Suponha que um corpo está girando e não há nenhuma ação externa atuando sobre ele. Quanto mais concentrada a massa desse corpo estiver no seu eixo de rotação, mais rapidamente ele pode girar, ou vice-versa. Se a **distribuição** da massa se afastar do eixo de rotação, ele vai girar mais lentamente.

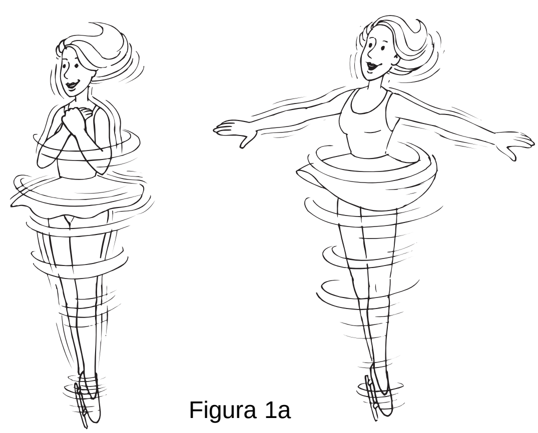


Figura 1a

Observe a Figura 1a. Com os braços encolhidos, a massa da patinadora está mais concentrada junto ao seu eixo de rotação, por isso ela gira mais rapidamente do que com os braços abertos. Abrindo os braços, ela distribui sua massa de forma a afastá-la ao máximo do seu eixo de rotação. Assim, o seu movimento fica mais lento e mais fácil de parar.

Uma demonstração experimental muito interessante pode ilustrar essa afirmação.

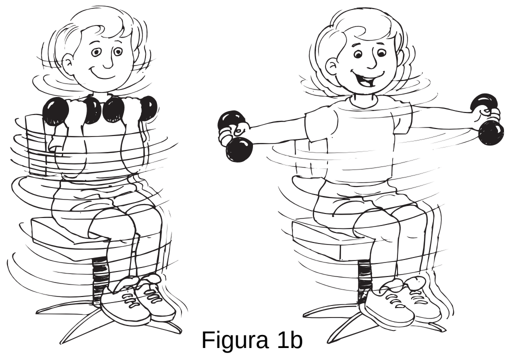


Figura 1b

Observe a Figura 1b. Uma pessoa sentada numa cadeira giratória, segurando dois halteres com os braços estendidos, é posta a girar. Se ela encolher os braços, trazendo os halteres para junto do seu corpo, a rapidez do seu movimento de rotação aumenta. Se ela voltar a estendê-los, a rapidez diminui, sem que para isso tenha sido feita qualquer ação externa. Essa compensação entre rapidez de rotação e distribuição de massa é explicada pelo tal **princípio da conservação do momento angular**.

Mas essas não são as únicas características interessantes do movimento de rotação. Um pião, por exemplo, só pode permanecer em equilíbrio enquanto gira; as bicicletas só podem se manter em equilíbrio devido ao movimento de rotação de suas rodas.

Figura 2

Veja na Figura 2 que, graças à rotação, o pião se mantém em pé sozinho, em equilíbrio, apoiado apenas numa extremidade do seu eixo. A própria Terra mantém constante a inclinação do seu eixo graças ao seu movimento de rotação.

O movimento de rotação está sempre presente em nosso dia-a-dia. Todos os veículos têm rodas, quase todas as máquinas têm eixos e polias que giram ligadas por correias e engrenagens. Infelizmente, nem todos os aspectos da rotação poderão ser estudados neste curso. Muitos exigem uma formulação matemática muito complicada, mas algumas noções básicas necessárias à sua compreensão serão vistas aqui.

Rotação: um movimento periódico

Fique ligado

Imagine uma roda de bicicleta ou a polia de um motor girando. Durante esse movimento, cada ponto da roda ou da polia descreve circunferências, continuamente. Em outras palavras, durante o movimento, cada ponto passa repetidas vezes pela mesma posição. Por isso, o movimento de rotação é considerado um **movimento periódico**.

O número de circunferências, ou **ciclos**, descritos numa unidade de tempo é a **freqüência** desse movimento. Assim, se cada ponto da polia de um motor descreve 600 ciclos em 1 minuto, dizemos que essa polia gira com uma freqüência de 600 ciclos por minuto. Nesse caso, ao invés de ciclos, costuma-se dizer **rotações.** Logo, a freqüência é de 600 rpm (rotações por minuto). Se adotarmos o SI, a unidade de tempo deve ser o **segundo**. Portanto, como essa polia descreve 600 ciclos em 60 segundos (1 minuto), a sua freqüência será:

$$\boxed{\frac{600 \text{ ciclos}}{60 \text{ segundos}} = 10 \text{ ciclos / s}}$$

A unidade **ciclos/s** é denominada **hertz**, cujo símbolo é Hz. Portanto, a freqüência dessa polia, no SI, é de 10 Hz. É fácil ver que **1 Hz = 60 rpm**.

Se um ponto passa várias vezes pela mesma posição, há um intervalo de tempo mínimo para que ele passe por duas vezes por essa posição. É o intervalo de tempo que ele gasta para descrever apenas uma volta ou **um ciclo**. Esse intervalo de tempo é denominado **período do movimento**.

Qual será o período do movimento de rotação da polia do nosso exemplo?

Para responder essa pergunta, vamos, inicialmente, adotar o minuto como unidade de tempo. Se a polia descreve 600 ciclos em 1 minuto, para determinar o seu período, é preciso calcular o tempo que ela gasta para descrever **1 ciclo**. Uma regra de três simples resolve o problema:

$$\boxed{\begin{array}{lcl} 600 \text{ ciclos} & \rightarrow & 1 \text{ minuto} \\ 1 \text{ ciclo} & \rightarrow & x \text{ minutos} \end{array}}$$

Logo, teremos:

$$\boxed{x = \frac{1}{600} \text{ min}}$$

que é o período do movimento da polia, em minutos.

Se fizermos o mesmo cálculo utilizando o segundo, como unidade de tempo, vamos obter:

$$\boxed{x = \frac{1}{10} \text{ s,}}$$

que é o período do movimento da polia, em segundos.

Observe que quando a freqüência era 600 rpm, o período era 1/600 min, quando a freqüência era 10 Hz, o valor do período era 1/10 s. É fácil ver que o valor do período é sempre o inverso do valor da freqüência. Simbolizando a freqüência com **f** e o período com **T** podemos representar essa relação pela expressão:

$$\boxed{f = \frac{1}{T}} \qquad \text{ou ainda:} \qquad \boxed{T = \frac{1}{f}}$$

Sempre que o período estiver **em segundos** a freqüência correspondente será dada em **hertz**.

Passo-a-passo

Qual a freqüência e período do movimento dos ponteiros de um relógio?

Um relógio geralmente tem três ponteiros: (a) um, que marca os segundos, (b) um, que marca os minutos e (c) um, que marca as horas. Cada um deles, tem freqüência e período diferentes.

a) O ponteiro dos segundos dá uma volta a cada 60 segundos. Portanto, o seu período é:

$$T = 60 \text{ s}$$

Como a freqüência é o inverso do período, temos:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{60} \text{ Hz}$$

b) O ponteiro dos minutos dá uma volta por hora, ou 60 minutos, ou 3.600 segundos. Logo, o seu período em segundos, é:

$$T = 3.600 \text{ s}$$

A freqüência é:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3.600} \text{ Hz}$$

c) Com raciocínio semelhante, você pode obter para o ponteiro das horas:

$$T = 43.200 \text{ s e } f = \frac{1}{43.200} \text{ Hz}$$

Passo-a-passo

Um satélite de telecomunicações fica parado em relação à Terra. Qual o período e a freqüência desse satélite?

Para que o satélite fique parado em relação à Terra, é preciso que ele acompanhe o movimento de rotação do planeta. Isso significa que, quando a Terra der uma volta em torno do seu eixo, o satélite também deverá fazer o mesmo (veja a Figura 3). Logo, o período do satélite é igual ao período da Terra. Portanto: T = 1 dia, ou T = 24 h, ou T = 86.400 s

A freqüência é: f = 1 rotação/dia, ou $f = \frac{1}{24}$ rotações/hora, ou $f = \frac{1}{86.400}$ Hz

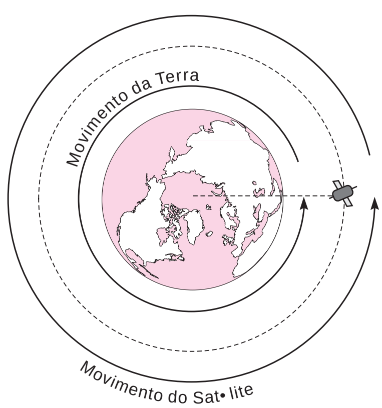


Figura 3

Velocidade angular

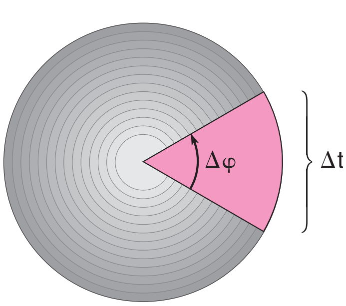


Figura 4

Suponha que um disco está girando. Num intervalo de tempo Δt seus raios descrevem ou **varrem** um determinado ângulo Δφ (veja a Figura 4).

A relação entre esse ângulo e o tempo gasto para descrevê-lo é a **velocidade angular** do disco. Matematicamente:

$$\boxed{w = \frac{D j}{D t}}$$

Como no SI os ângulos são medidos em radianos, a unidade de velocidade angular é **rad/s.** Assim, se um disco gira descrevendo um ângulo de 60º, que é igual a $\pi/3$ rad, num intervalo de tempo de 2 segundos, sua velocidade angular será:

$$\omega = \frac{\frac{\pi}{3}}{2} = \frac{\pi}{6}\ \text{rad/s}$$

A rigor, essa é a **velocidade angular média** nesse intervalo de tempo. Entretanto, como vamos estudar apenas movimentos de rotação em que a velocidade angular é constante, não haverá, aqui, distinção entre velocidade angular média e velocidade angular instantânea. Ambas serão chamadas simplesmente de **velocidade angular**.

Veja como se faz para transformar graus em radianos:

Relações entre graus e radianos

Sabe-se que π rad = 180º, logo $1^\circ = \frac{\pi}{180}$ rad.

Então, para transformar um ângulo em graus para radianos basta multiplicar o seu valor por $\frac{\pi}{180}$.

Exemplo: $60^\circ = 60 \cdot \frac{\pi}{180}\ \text{rad} = \frac{\pi}{3}\ \text{rad}$

Para transformar radianos em graus, é só inverter o procedimento multiplicando por $\frac{180}{\pi}$

Exemplo: $\frac{\pi}{3}\ \text{rad} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{180}{\pi} = 60^\circ$

Se a velocidade angular de um disco for constante, ele descreve ângulos iguais em tempos iguais. Isso significa que o tempo gasto para dar uma volta completa, que corresponde a um ângulo de 360º ou 2π rad, será sempre igual. Portanto, o **período** e a **freqüência** do disco serão, também, constantes. Além disso é possível, nessas condições, relacionar essas três grandezas.

Ao descrever uma volta completa, o disco **varre** um ângulo $\Delta\varphi$ igual a 2π rad. Como o intervalo de tempo Δt para dar uma volta completa é igual ao período, T, a velocidade angular desse disco será:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Mas $f = \frac{1}{T}$, portanto, podemos escrever:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{1}{T} \Rightarrow \omega = 2\pi f$$

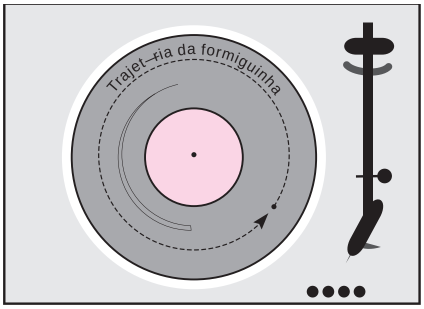


Figura 5

Suponha que um disco gire com velocidade angular constante. Como vimos, a freqüência e o período também serão constantes. Nesse caso, cada ponto desse disco descreve um **Movimento Circular Uniforme (MCU)**. Se você vir uma formiguinha apavorada agarrada a um disco girando no seu toca-discos, você estará vendo a coitadinha descrever um movimento circular uniforme. Isso vale também, por exemplo, para qualquer ponto de uma polia ligada a um motor que gira com freqüência de rotação constante.

Como se pode **equacionar** o movimento circular uniforme? Que variáveis devemos escolher para equacionar o movimento circular uniforme, lembrando que equacionar um movimento é estabelecer uma relação matemática entre duas de suas variáveis (posição · tempo, velocidade · tempo etc.). As mesmas variáveis do MRU ou do MRUV?

A resposta é **não**. Em vez de uma equação da posição em função do tempo, por exemplo, será mais útil uma equação do ângulo descrito em função do tempo, uma **equação angular**. Isso porque a posição não é uma variável muito conveniente, pois um móvel com MCU passa seguidamente pelo mesmo ponto. Isso não acontece com o ângulo $\Delta\varphi$ que esse móvel descreve ou **varre** enquanto se movimenta. Os seus valores nunca se repetem. Cada vez que o móvel passa pelo mesmo ponto, o valor do ângulo é acrescido de 360º ou 2π rad.

Assim, é possível estabelecer uma relação matemática entre esse ângulo e o instante em que ele está sendo descrito, porque não existem dois ângulos iguais para instantes diferentes. Essa equação, conhecida como **equação** ou **lei angular** do MCU, é expressa por:

$$\boxed{\varphi = \varphi_0 + \omega t}$$

Veja a dedução no quadro abaixo:

Dedução da lei angular de um MCU

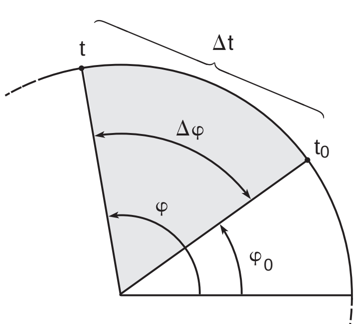


Figura 6

Lembrando a definição de velocidade angular

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad \textbf{(1)}$$

é fácil ver, na figura, que $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ (2), como $\Delta t = t - t_0$.

Fazendo $t_0 = 0$, temos $\Delta t = t$ (3), substituindo (1) e (2), em (3), obtemos:

$$\omega = \frac{\varphi - \varphi_0}{t} \Rightarrow \varphi = \varphi_0 + \omega t$$

onde φ é o ângulo, ou **fase,** no instante t e φ_0 o ângulo ou fase **inicial**, no instante $t_0 = 0$.

Sabendo-se o ângulo descrito por um móvel num certo instante e o raio da circunferência descrita, é fácil determinar a posição de um móvel em MCU.

Suponha, por exemplo, que a nossa pobre formiguinha, ainda mais apavorada, está presa a uma roda de bicicleta de 0,5 m de raio, que gira com um período constante de 2 s. Se acionarmos um cronômetro no instante em que o raio da roda em que está a formiguinha descreve um ângulo nulo, qual será a posição da coitadinha depois de 4,2 s?

Para resolver esse problema, é preciso, inicialmente, determinar o ângulo descrito por esse raio no instante t = 4,2 s. Isso significa aplicar a lei angular do seu movimento e calcular o valor de φ para t = 4,2 s. Para determinar a lei angular, $\varphi = \varphi_0 + \omega t$, basta determinar o valor de ω já que o ângulo inicial $\varphi_0 = 0$, conforme o enunciado (o cronômetro foi acionado quando o ângulo era zero). Lembrando que $\omega = 2\pi/T$ e T= 2s obtemos $\omega = \pi$ rad/s. Assim, a lei angular do movimento do ponto A é:

$$\varphi = \pi\, t$$

No instante t = 4,2 s o ângulo descrito é:

$$j = p\frac{rad}{s} \times 4,2\ s = p \times \frac{180^0}{p} \times 4,2 = 756^0$$

Onde estará então a pobre formiguinha? É fácil, basta desenhar um ângulo de 756º, isto é, 2 · 360º + 36º e aí localizá-la. Veja a Figura 7.

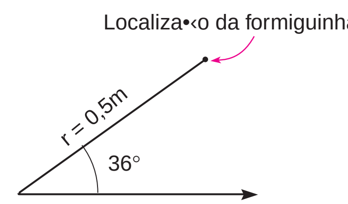


Figura 7

Velocidade de um ponto material em MCU

Até agora só falamos em velocidade angular de um ponto material. É uma velocidade meio esquisita – ela sempre nos obriga a imaginar que existe um segmento de reta ligando o ponto ao centro da circunferência. Senão, não poderíamos falar em ângulos descritos ou **varridos**. Mas é claro que, estando em movimento, o ponto vai percorrer distâncias em intervalos de tempo, isto é, ele tem também uma velocidade. Essa é a sua **velocidade (v)**, sem sobrenome, a que temos nos referido até aqui, no estudo dos outros movimentos. Muitos gostam de chamá-la de velocidade linear ou escalar para distingui-la da velocidade angular, mas isso não é necessário pois não estamos introduzindo um novo conceito.

Se calcularmos o valor da velocidade **v** de um ponto material com MCU, vamos obter sempre o mesmo resultado. Isso porque esse ponto percorre distâncias (arcos de circunferência) iguais em tempos iguais. Em cada ciclo, por exemplo, o percurso é sempre o mesmo, **o comprimento da circunferência.** O tempo gasto para percorrê-la também, pois, nesse caso, o tempo é o **período** (T), e o período no MCU é constante.

Aliás, a partir dessa observação, podemos obter uma expressão para o valor de v no MCU. Como o comprimento da circunferência é 2πr e o tempo para descrever 1 ciclo é igual ao período T, dividindo-se o comprimento do percurso, 2πr, pelo tempo gasto para descrevê-lo (T), tem-se o valor da velocidade. Logo:

$$\boxed{v = \frac{2\ pr}{T}}$$

Essa expressão pode ser escrita como $v = 2\ pr \times \frac{1}{T}$

Lembrando que $f = \frac{1}{T}$, temos

$$\boxed{v = 2\ \pi r f}$$

Lembrando ainda que, se:

$$w = \frac{2\ p}{T}$$

podemos achar uma relação entre a velocidade **v** e a velocidade angular ω desse ponto material. Basta fazer

$$v = \frac{2\ p}{T} \cdot r$$

o que nos leva a:

$$\boxed{v = \omega\ r}$$

Essas relações nos ajudam a perceber uma propriedade muito importante do movimento circular: a velocidade **v** do ponto material depende da freqüência (ou período) do movimento **e do raio da circunferência descrita,** enquanto a velocidade angular ω depende apenas da freqüência (ou período), **mas não depende do raio.** Esse, aliás, é um resultado esperado já que num MCU, a velocidade angular é constante.

Passo-a-passo

Os pneus de um carro têm 60 cm de diâmetro, com calotas de 30 cm de diâmetro. Suponha que o carro esteja com velocidade de 108 km/h. Determine:

a) a velocidade de um ponto localizado na borda de um pneu (v_p);
b) a velocidade angular (ω_p) desse ponto;
c) a velocidade angular (ω_c) de um ponto na borda de uma das calotas;
d) a velocidade (v_c) desse ponto;
e) a freqüência e o período do movimento desses pneus.

a) Se os pneus não estão derrapando, os pontos localizados nas suas bordas, em contato com o chão, têm a mesma velocidade do carro. Portanto, a velocidade de um ponto localizado na borda de um pneu é:

$$v_p = 108 \text{ km/h ou } v_p = 30 \text{ m/s}$$

b) Lembrando que $v = \omega r$, podemos escrever:

$$v_p = \omega_p \cdot r \Rightarrow \omega_p = \frac{v_p}{r}$$

Mas, como o ponto está na borda do pneu de 60 cm de diâmetro, o raio é:

$$r = \frac{60 \text{ cm}}{2} = 30 \text{ cm} = 0{,}3 \text{ m}$$

Portanto, $\omega_p = \frac{30 \text{ m / s}}{0{,}3 \text{ m}} \Rightarrow \omega_p = 100 \text{ rad/s}$

c) Como a velocidade angular é constante,

$$\omega_p = \omega_c$$

Logo, a velocidade angular de um ponto na borda da calota é:

$$\omega_c = 100 \text{ rad/s}$$

d) Lembrando, novamente, que $v = \omega r$, podemos escrever $v_c = \omega_c \cdot r_c$, onde r_c é o raio da calota.

Como $r_c = \frac{30\ cm}{2} = 15\ cm = 0{,}15\ m$, temos:

$$v_c = 100 \cdot 0{,}15 \Rightarrow v_c = 15\ m/s$$

e) Como a relação entre velocidade angular e freqüência é $\omega = 2\ \pi f$, pode-se obter f fazendo:

$$\mathbf{f} = \frac{w}{2p}$$

Portanto, a freqüência do movimento dos pneus é:

$$\mathbf{f} = \frac{100}{2p} \Rightarrow f\ @\ 16\ Hz \quad \text{(aproximadamente)}$$

Isso significa que o pneu dá 16 voltas por segundo ou 960 rotações por minuto.

Sendo: $T = \frac{1}{f}$, o período de movimento do pneu é: $T = \frac{1}{16}\ s$

Movimentos circulares acoplados

Os motores, em geral, têm uma freqüência de rotação fixa que depende da forma como eles são construídos e das suas condições de utilização. Entretanto, as máquinas acionadas por eles têm, quase sempre, sistemas girantes que exigem diferentes freqüências de rotação fornecidas, muitas vezes, por um só motor. Para isso, o eixo desse motor é acoplado a polias de diferentes diâmetros por meio de correias ou engrenagens. Suponha, por exemplo, que uma polia, fixa no eixo de um motor, tenha uma circunferência de raio r_1 e gire com uma freqüência f_1. Ela está acoplada, por intermédio de uma correia, a outra polia de raio r_2, ligada a uma máquina qualquer. Qual será a freqüência de rotação f_2, dessa polia?

Como você pode ver na Figura 8, a correia tem a mesma velocidade **v** dos pontos da periferia de ambas as polias.

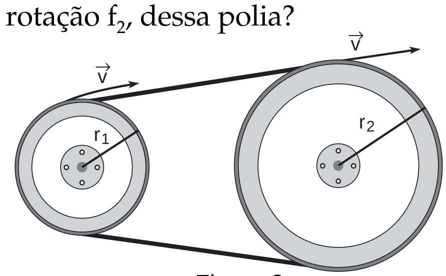


Figura 8

Lembrando que $v = 2\ \pi\ rf$, temos:

- para a polia do motor:

$$v = 2\ \pi\ r_1 f_1 \qquad (1)$$

- para a polia ligada à máquina:

$$v = 2\ \pi\ r_2 f_2 \qquad (2)$$

Comparando (1) e (2), obtemos:

$$2\ \pi\ r_1 f_1 = 2\ \pi\ r_2 f_2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{r_1 f_1 = r_2 f_2}$$

Por essa relação, pode-se obter o valor de f_2:

$$f_2 = \frac{r_1\ f_1}{r_2}$$

Observe que, se **r_1 for maior que r_2**, **f_2 será maior que f_1**, isto é, quando a polia do motor tiver um raio maior que a polia da máquina, haverá um aumento na freqüência de rotação e vice-versa.

Aceleração centrípeta

Embora o conceito não seja novo, a velocidade **v** de um ponto material que descreve um MCU apresenta características ainda não vistas neste curso. Apesar de ter sempre o mesmo valor numérico, essa velocidade **não é constante porque sua direção e sentido variam continuamente.** Observe na Figura 9 que, em A, a velocidade está orientada para a esquerda; em B, para baixo; em C, para a direita e, em D, para cima. Como a velocidade é sempre tangente à trajetória, é fácil ver que **ela tem uma direção e sentido diferentes em cada ponto**. Em resumo, no MCU, embora o valor numérico da velocidade seja sempre o mesmo, **ela não é constante** porque sua direção e sentido variam continuamente.

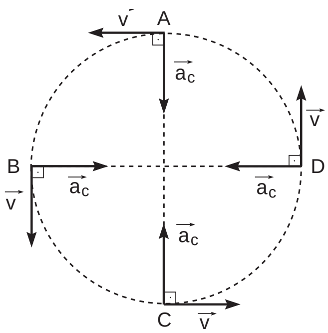


Figura 9

Mas, se a velocidade de um móvel em MCU varia, existe uma **aceleração** atuando sobre esse móvel pois aceleração é, por definição, a variação da velocidade com o tempo. Essa aceleração denomina-se **aceleração centrípeta, (a_c).** Centrípeta porque, como o próprio nome indica, ela está sempre orientada para o centro da circunferência descrita pelo móvel. O seu valor pode ser obtido pela expressão:

$$\boxed{a_c = \frac{v^2}{r}}$$

ou, como v = ωr,

$$\boxed{a_c = \omega^2 r}$$

(A dedução dessas expressões foge ao alcance deste curso.)

Assim, se um automóvel faz uma curva circular com velocidade constante, ele está acelerando, o que não aconteceria se ele estivesse em linha reta. Se essa velocidade for 20 m/s (72 km/h), por exemplo e o raio da curva for 100 m, a aceleração centrípeta será:

$$ac = \frac{20^2}{100} = 4 \text{ m/s}^2$$

É importante notar que essa aceleração só contribui para o automóvel fazer a curva, **não altera o valor numérico da velocidade.** Essa é uma idéia nova que deve ficar mais clara com o auxílio das leis de Newton, que vamos ver em seguida.

O movimento circular uniforme e as leis de Newton

Das três leis de Newton, duas têm relação direta com o MCU. A primeira afirma que, para que um corpo tenha velocidade constante **em trajetória retilínea,** a força resultante sobre ele deve ser nula. Como no MCU a trajetória **não é retilínea**, conclui-se que a força resultante **não é nula.** A segunda lei estabelece uma relação entre força resultante e aceleração: F = ma. Se a força resultante é proporcional à aceleração, existindo aceleração existe força resultante. Além disso, se a aceleração é **centrípeta,** orientada para o centro da circunferência, a força resultante também será orientada para o centro da circunferência, ou seja, a força resultante é uma **força centrípeta**. Veja a Figura 10.

Se a_c é a aceleração centrípeta podemos representar por F_c a força centrípeta. Nesse caso, para o movimento circular uniforme a segunda lei de Newton pode ser expressa assim:

$$\boxed{F_c = m \cdot a_c}$$

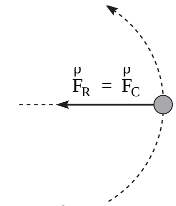


Figura 10

É muito importante entender que a força centrípeta é a resultante das forças que atuam sobre o corpo, não é uma força nova ou especial. Em outras palavras, no MCU, em cada situação, uma ou mais forças podem exercer o papel de força centrípeta. A força centrípeta pode ser o peso do corpo, a força de atrito entre o corpo e o plano, a tração num fio, a resultante de algumas dessas forças etc. Nas figuras a seguir, apresentamos alguns exemplos de movimentos circulares uniformes, identificando, em cada um, qual ou quais forças exercem o papel de força centrípeta.

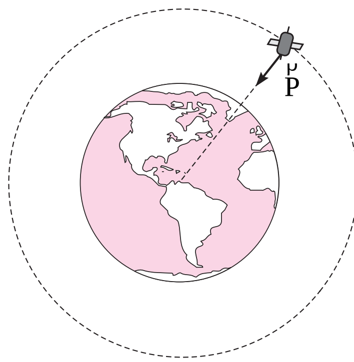


Figura 11. Um satélite de telecomunicações executa uma órbita circular em torno da Terra. A força centrípeta nesse caso é a força de atração que a Terra exerce sobre ele, ou seja, o peso P do satélite.

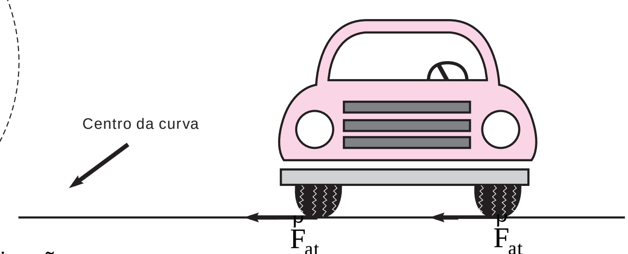


Figura 12. Um carro faz uma curva circular numa estrada plana e horizontal. A força centrípeta, nesse caso, é a resultante das forças de atrito ($\vec{f}_{at}$) entre os pneus e a estrada.

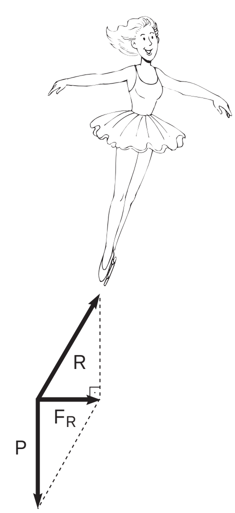


Figura 13. Uma patinadora executa movimentos circulares numa pista de gelo plana e horizontal. A força centrípeta é a força resultante ($\vec{F}_R$) de duas forças: o peso da patinadora ($\vec{P}$) e a reação do plano ($\vec{R}$) sobre a patinadora.

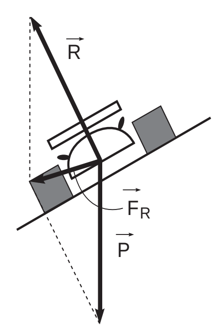


Figura 14. As pistas dos autódromos e das boas estradas e avenidas são inclinadas (sobrelevadas) nas curvas. Isso é feito para que os motoristas não dependam apenas do atrito para fazer a curva. Assim, a reação ($\vec{R}$) da pista sobre o veículo é inclinada, o que ajuda a aumentar o valor da força ($\vec{F}_R$) resultante que exerce o papel de força centrípeta. Se não fosse assim, o motorista só iria contar com a força de atrito ($\vec{f}_a$) para fazer a curva, como na Figura 12.

Passo-a-passo

Um bloco de massa m = 0,2 kg gira horizontalmente sobre uma mesa, descrevendo círculos com freqüência constante f = 6 rpm. Ele está preso ao centro da circunferência por um fio de 1,5 m de comprimento. Supondo desprezível o atrito, qual a tração exercida pelo fio?

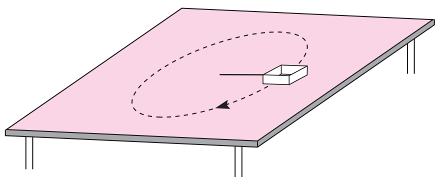


Figura 15

Se o bloco descreve círculos com freqüência constante, ele tem um MCU. A força resultante (F_R) que atua sobre ele é a força centrípeta (F_C). Veja na Figura 15 que, nesse caso, F_R é igual à força T (tração no fio).

Logo, se $F_R = F_C$ e $F_R = T$, conclui-se que: $F_C = T$

Mas $$F_C = m\,a_C \text{ e } a_C = \frac{v^2}{r}$$

Logo, $$F_C = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow T = m\frac{v^2}{r}$$

Então, calculamos a velocidade **v** do bloco, dada pela expressão: $v = 2\,\pi rf$.

Admitindo que o tamanho do bloco é desprezível, o raio da circunferência é igual ao comprimento do fio, r = 1,5 m. A freqüência, dada em rpm (rotações por minuto), deve ser transformada em hertz para que a velocidade seja obtida em m/s. Então:

$$f = 6\text{ rpm} = \frac{6}{60}\text{ Hz} = 0{,}1\text{ Hz}$$

Portanto a velocidade do bloco é:

$$v = 2\,\pi rf = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}1 = 0{,}94\text{ m/s}$$

A tração no fio, portanto, é:

$$T = m\frac{v^2}{r} = 0{,}2 \cdot \frac{0{,}94^2}{1{,}5} \Rightarrow T = 0{,}12\text{ N (aproximadamente)}$$

Passo-a-passo

Suponha que a patinadora da Figura 13 executa trajetórias circulares de 2,5m de raio com uma velocidade de 5 m/s. Admitindo-se g = 10 m/s^2, qual deve ser o ângulo de inclinação da patinadora com a horizontal?

Na figura, sendo P = mg, o peso da patinadora e F_R a força resultante, pode-se ver que:

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{mg}{F_R}$$

Por outro lado, sabemos que $F_R = F_C = m\frac{v^2}{r}$. Substituindo esse valor na expressão acima, temos:

$$\text{tg a} = \frac{mg}{\frac{mv^2}{r}} = \frac{rg}{v^2} = \frac{2{,}5 \cdot 10}{5^2} = 1{,}0$$

Se $\text{tg}\,\alpha = 1{,}0 \Rightarrow \alpha = 45^\circ$

Vamos voltar ao início da nossa aula, quando Cristiana, emocionada, via a patinadora rodopiar. Como ela desconfiou, os gestos da patinadora, a coreografia da sua exibição, têm tudo a ver com a Física. Naquele caso, vimos que, encolhendo e estendendo os braços, ela podia regular a freqüência de rotação do seu corpo em torno de si mesma. Esse último exemplo mostra que a inclinação do corpo de uma patinadora em relação à pista também influi para que ela possa descrever círculos com maior ou menor velocidade. É verdade que para ser uma grande patinadora não é preciso estudar Física, embora o seu conhecimento possa fazê-la entender melhor como aprimorar seus movimentos. Em outras áreas da atividade humana, no entanto, o conhecimento das leis físicas do movimento de rotação é essencial. Uma curva de estrada mal construída, sem a inclinação adequada, pode acarretar inúmeros acidentes. Quase todas as máquinas, domésticas ou industriais, têm no movimento de rotação, a base de seu funcionamento. Entender melhor esse movimento e suas implicações para o seu dia-a-dia foi o objetivo desta aula.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que são movimento periódico; freqüência e período;
- o que é velocidade angular e como ela se relaciona com f e T;
- o que é um Movimento Circular Uniforme (MCU);
- a equação do MCU;
- que a velocidade de um ponto em MCU é constante em módulo mas varia em direção e sentido;
- o que são movimentos circulares acoplados;
- o que são aceleração e força centrípeta.

Exercício 1

A polia de um motor tem 15 cm de raio e gira com uma freqüência de 1.200 rpm. Determine:

a) a sua freqüência em hertz e seu período em segundos;
b) a sua velocidade angular;
c) a velocidade de um ponto na periferia da polia;
d) a aceleração centrípeta desse ponto;
e) qual deveria ser o raio de uma outra polia que, acoplada a essa, gire com uma freqüência de 400 rpm.

Exercício 2

Um satélite está a 600 km de altura, em órbita circular, efetuando uma rotação em 2 horas. Qual a velocidade e aceleração centrípeta desse satélite, admitindo-se que ele está sobre o equador e que o raio da Terra é de 6.400 km?

Exercício 3

Um ponto material executa um MCU de 0,6 m de raio em período de 4 segundos. Suponha que no instante t = 0, o ângulo descrito pelo raio que passa pelo ponto φ_0, seja zero. Determine:

a) a freqüência do movimento;
b) a sua velocidade angular;
c) a lei angular do movimento desse ponto material;
d) represente graficamente a posição desse ponto material no instante t = 8,5 s.

Exercício 4

Suponha que, no satélite do Exercício 2 há um astronauta de massa 70 kg. Qual a força que a Terra exerce sobre ele?

Exercício 5

Um carro de massa 800 kg faz uma curva circular plana e horizontal de 100 m de raio, com velocidade de 72 km/h. Qual a resultante das forças de atrito que atuam sobre ele?

Exercício 6

Uma patinadora descreve trajetórias circulares de 2,5 m de raio, formando um ângulo de 45º com a horizontal. Qual a sua velocidade?

Exercício 7

No Exercício 5, qual deveria ser a inclinação da pista para que o carro pudesse fazer a curva sem depender da força de atrito? Nesse caso, a massa do carro influi? Por quê?

AULA

12

Por que não flutuamos?

PARA COMEÇAR

Gaspar tinha um sonho: ir à Lua! Ficava horas a fio olhando a bela Lua. "Como será andar na Lua?", pensava.

Era um lunático! E fanático! Lua! Lua! Lua! Adorava ver televisão, não qualquer programa, só aqueles onde se viam foguetes, astronautas e, é claro, a Lua!

Um dia, Gaspar viu um filme que mostrava imagens dos astronautas no interior de uma nave espacial. Aquela cena deixou Gaspar pensativo: "Muito estranho, os astronautas flutuam dentro da cabina. E não só os astronautas, mas também os objetos ao seu redor", intrigava-se.

Gaspar então ficou com aquela dúvida martelando na sua cabeça: "Por que não flutuamos?"

Fique ligado

Você, certamente, alguma vez já teve a mesma dúvida de Gaspar: por que nós não flutuamos, isto é, por que não ficamos soltos no ar, sem tocar o chão?

Essa pode parecer uma pergunta sem interesse, afinal, ficar no chão é tão natural, não é mesmo? Mas se você pensar um pouco nesse assunto, verá quantas coisas interessantes irão surgir!

Flutuar lembra, entre outras coisas, ar e chão. Chão lembra terra (onde nossos pés estão) e terra lembra a nossa Terra, o mundo em que vivemos. Mas, o que é a Terra? Como ela é? Onde se encontra?

Essas perguntas hoje podem parecer fáceis de responder, mas foram necessários muitos e muitos anos para que se conhecesse melhor esse assunto.

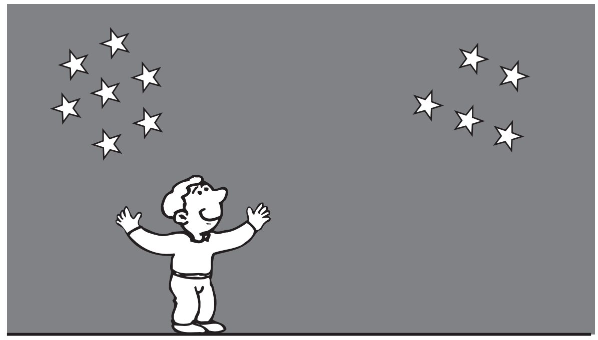
Você tem aprendido uma porção de coisas novas, e é sempre bom lembrar que elas foram criadas pelo homem. O ser humano é curioso: observa a natureza e quer saber o porquê das coisas. Movido pela curiosidade e pela vontade de conhecer, faz perguntas e tenta respondê-las, observando ao seu redor.

O conhecimento é fruto das perguntas que o ser humano faz a si mesmo, e é uma maneira de explicar o mundo que se observa.

Graças a muitos curiosos observadores, hoje estamos aqui falando sobre Terra, flutuar e coisas assim!

Observando ao nosso redor

Figura 1



Numa bela noite de sábado, Gaspar convidou sua esposa, Alberta, para ir ao quintal observar o céu. No céu, à noite, podem ser observados inúmeros pontinhos brilhantes. Gaspar então explicou para Alberta: "Aqueles pontinhos brilhantes são **astros** celestes. Se você ficar algum tempo observando-os, verá que eles se movimentam, isto é, mudam de posição em relação ao ponto em que estamos aqui na Terra."

Observe o céu à noite. Escolha um ponto aqui na Terra (uma árvore, o telhado de uma casa, um edifício etc.) e observe os astros que estão ali "perto". Depois de um certo tempo observe novamente. O que ocorreu?

"Eles se movem todos juntos! Giram ao nosso redor!", exclamou Alberta.

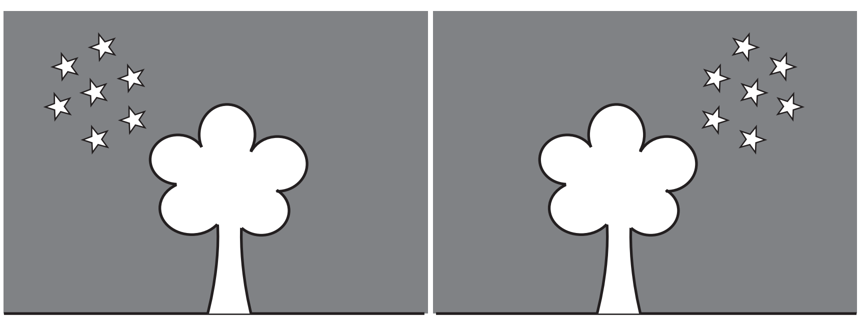
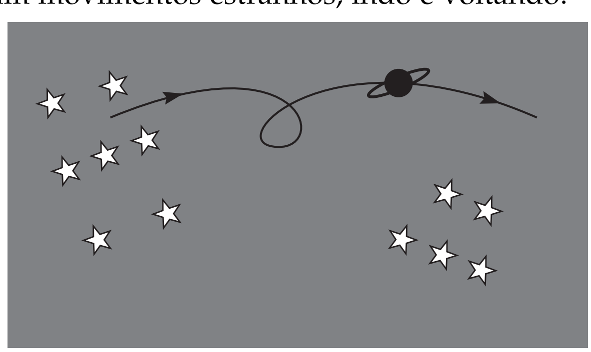


Figura 2. O **"**movimento" do céu à noite.

"Sim, eles mudam de lugar em relação a nós aqui na Terra, mas não muda a **posição entre eles**. Esse movimento dá a **impressão** de que a Terra está parada e que os astros giram ao seu redor. Os gregos, há uns 2.000 anos, acreditavam que a Terra era o centro do universo e que, portanto, tudo girava ao nosso redor. Eles deram o nome de **estrelas** aos astros celestes."

Gaspar apontou então um astro com um brilho muito intenso: "Observe aquele astro: não é uma estrela, mas sim um **planeta**. Depois de muitas observações cuidadosas, os gregos perceberam que nem todos os astros se moviam juntos. Alguns realizavam movimentos estranhos, indo e voltando!"

Figura 3. Os planetas descrevem uma estranha trajetória em relação às estrelas. Como esse movimento é muito lento, deve-se observá-lo em várias noites diferentes.



"Essas estrelas foram chamadas de **estrelas errantes**, isto é, aquelas que 'caminham' pelo céu, e que, em grego, são chamadas de **planetas**."

Observações mais cuidadosas levaram à criação de um novo modelo, no qual o Sol está no centro e os planetas giram ao seu redor, num movimento chamado de **translação**.

Hoje já sabemos algumas coisas sobre as estrelas e os planetas:

- **Estrelas** são astros que produzem luz e estão muito distantes da Terra. A estrela mais próxima, e também a mais conhecida de todos nós, é o Sol. O Sol é uma estrela amarela, que ilumina o nosso dia e nos aquece, permitindo que exista vida na Terra: sem ele nós não existiríamos!
- **Planetas** são astros de formas arredondadas, formados em geral por materiais rochosos e que não produzem luz: eles são **iluminados** pelas estrelas.

E Gaspar continuou: "O Sol, a Terra e outros oito planetas formam o que chamamos **Sistema Solar**. Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol; depois vem Vênus, a Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e, finalmente, Plutão, o mais distante."

O padre polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs o modelo de sistema astronômico em que o Sol ocupa posição central, e não a Terra, como se acreditava até a época em que ele viveu.

Foi um astrônomo (aquele que estuda os astros) chamado Nicolau Copérnico que propôs esse modelo de Sistema Solar. A Figura 4 mostra como é esse sistema.

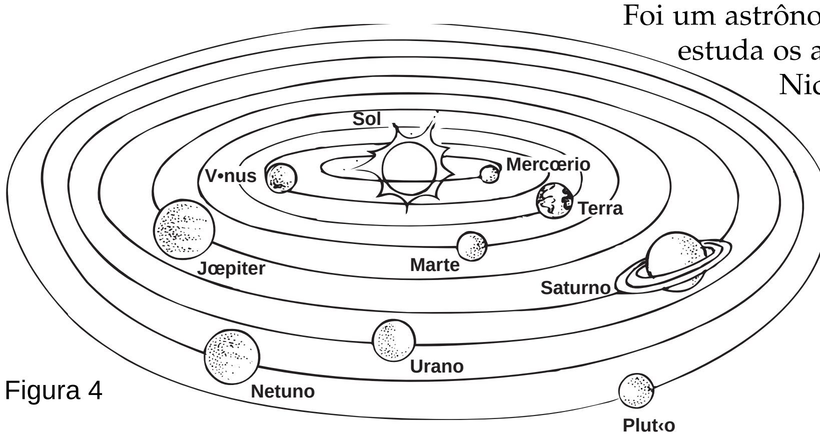


Figura 4

A translação da Terra dura pouco mais de 365 dias, e esse período é chamado **ano**, como se vê na Figura 5.

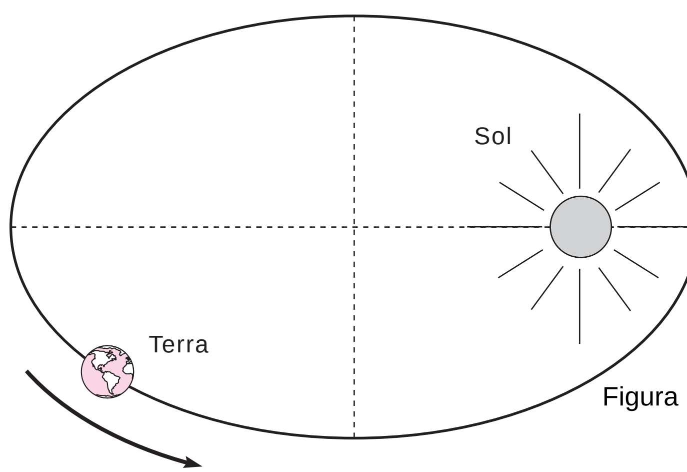


Figura 5

Por ser um planeta, a Terra não tem luz própria; ela é iluminada pelo Sol.

Graças à luz do Sol e ao movimento de **rotação** da Terra, existem o dia e a noite. Rotação é o movimento que a Terra realiza sobre si mesma e o seu período é de 24 horas. Veja a Figura 6.

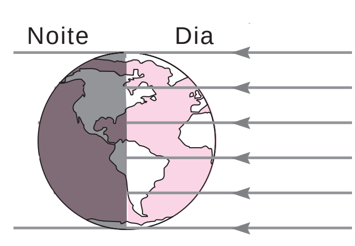


Figura 6. Raios de luz vindos do Sol

Podemos então concluir que a Terra, além de dar voltas em torno do Sol (**translação**), gira sobre si mesma, como um pião (**rotação**). E é por causa deste último movimento que existem o dia e a noite.

Parece, mas não é

Os outros oito planetas que compõem o Sistema Solar também realizam os movimentos de translação e rotação, embora com períodos bem diferentes.

Vamos voltar à nossa história.

Descrente, Alberta insistiu: "Tudo indica que é o Sol que se move, pois eu não **sinto** a Terra se mover!"

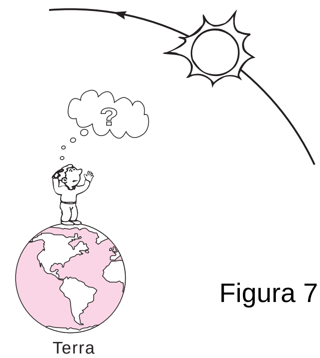


Figura 7

Ao ouvir isso, Gaspar disse: "Pense bem: quando andamos de carro por uma estrada, vemos que os objetos se afastam ou se aproximam, mas sabemos que é o carro que se move, pois podemos sentir o vento."

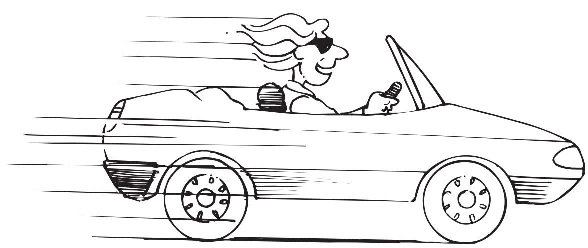


Figura 8

Alberta concluiu: "Então, se a Terra se deslocasse, nós deveríamos sentir o vento! Por que não o sentimos?"

Gaspar retrucou: "Alberta, no caso do carro é diferente. Você sente o vento porque você se desloca e o ar não. No caso da Terra, não se sente o vento **porque o ar que envolve a Terra também se desloca**! Acontece a mesma coisa quando as janelas do carro estão fechadas: o ar que está dentro se desloca junto com o carro e não sentimos o vento!"

E continuou: "O ponto fundamental é que esse modelo explica os movimentos estranhos das estrelas errantes, isto é, dos **planetas**. Por isso ele é adotado pelos cientistas." Só então Alberta pareceu ter se convencido.

Figura 9

"Além das estrelas e dos planetas, existem outros astros: os **satélites naturais**. Eles se parecem muito com os planetas, mas são menores, e não giram ao redor do Sol, mas ao redor de alguns dos planetas", disse Gaspar.

E acrescentou: "A Terra possui um satélite natural: a bela Lua."

Ainda tem mais

Você já observou a Lua em dias diferentes? Se a sua resposta for não, comece a observá-la, ao menos uma vez por semana! Se você já a observou, deve ter percebido que ela está sempre "mudando de cara". Veja na Figura 10 as quatro "caras" principais da Lua. Esses quatro momentos chamam-se as **fases** da Lua.

Figura 10

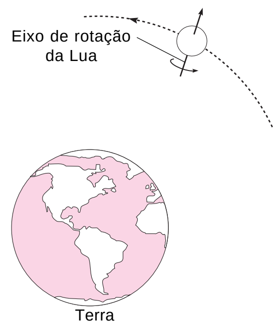


Figura 11

Assim como a Terra, a Lua também realiza dois tipos de movimento: rotação (sobre si mesma) e translação (ao redor da Terra), como indica a Figura 11.

A Lua também não produz luz, ela é iluminada pelo Sol. A face da Lua que está voltada para o Sol recebe luz dele e pode ser vista. A face oposta não recebe luz e, portanto, não é vista, como mostra a Figura 12.

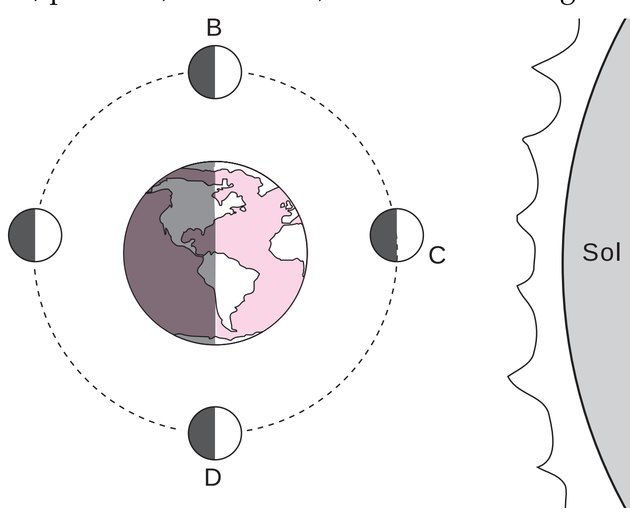


Figura 12. A luz do Sol ilumina a Lua, que é vista da Terra em suas quatro fases.

Observe a figura no sentido horário, como indicam as setas. Quando a Lua vai do ponto A até o ponto C, ocorre a chamada **fase minguante**, que começa com a Lua **cheia** (A) e termina com a Lua **nova** (C), passando pelo quarto minguante (B). Enquanto ela vai de C até A, é a **fase crescente**, que começa com a Lua nova (C), termina com a Lua cheia (A), passando pelo quarto crescente (D).

Para dar uma volta completa ao redor da Terra, a Lua leva aproximadamente 28 dias, que é seu período de translação.

Com a mão na massa

Observe num calendário quantos dias são necessários para que uma fase da Lua ocorra novamente, isto é, verifique quantos dias a Lua demora para voltar a uma mesma fase.

E daí?

A Lua gira em torno da Terra. A Terra gira em torno do Sol. E daí, qual a relação desses fatos com a pergunta que intrigou Gaspar?

Alberta, após um longo período em silêncio, perguntou: "Por que a Lua não sai por aí, vagando pelo espaço? Por que ela continua, sempre nesse movimento ao redor da Terra? E tem mais, por que a Terra continua sempre a girar ao redor do Sol?"

Gaspar coçou a cabeça. Ia começar a responder quando, de repente, uma enorme jaca caiu no chão! Por pouco não os atingiu em cheio!

"Por que ela caiu?", perguntou Gaspar.

"Ora, porque estava madura, se soltou e caiu. Muito simples", respondeu rapidamente Alberta.

Mas Gaspar buscava uma explicação científica para o acontecimento. "Não, Alberta. Você não compreende? Isso não é tão simples assim! Existe uma causa muito importante para que a jaca desabe no chão. E se ela não estivesse presa, ficaria na árvore?"

"É óbvio que não, Gaspar. Ela estaria no chão, como todos nós", respondeu Alberta, confiante.

"É isso mesmo, Alberta! Acho que essa é a resposta à minha questão: a jaca vem para o chão pelo mesmo motivo por que nós ficamos nele. Ela não flutua, assim como nós não flutuamos", animou-se Gaspar. "Mas **por que ela cai**?"

Silêncio.

"E qual a relação disso com a Terra, a Lua e o Sol?" quis saber Alberta.

> **RECORDANDO**
>
> Na Aula 5, você aprendeu que todos os corpos próximos à superfície da Terra caem com a mesma aceleração, que chamamos de **aceleração da gravidade**. Até aquele momento não falamos por que isso acontece, por que eles caem. Só foi estudado o movimento, não sua causa.
>
> Na Aula 8, você viu que para alterar o estado de movimento de um objeto é preciso aplicar sobre ele uma **força**.

"Algo puxou a jaca para baixo", concluiu Gaspar. E emendou: "Aí está a resposta à sua pergunta, Alberta: a Lua não sai por aí porque a Terra a atrai, da mesma forma que atrai a jaca! E o mesmo ocorre com a Terra, que, atraída pelo Sol, fica a seu redor!"

Alberta, agora estava muito confusa. Pensou na Lua, pensou na jaca e lançou então uma questão que deixou Gaspar sem fôlego:

"E por que a Lua não cai?"

"Bem... é porque ... eu não sei explicar...", admitiu Gaspar, desapontado.

Vamos ver se nós chegamos lá!

Matéria atrai matéria...

De fato, a jaca caiu no chão porque foi **atraída** pela Terra, isto é, a Terra puxou a jaca, assim como ela puxa todos os objetos, inclusive a Lua. Essa atração é chamada de **atração** ou **força gravitacional**.

Essa força existe entre o Sol e a Terra, entre a Terra e a jaca, entre a Terra e cada um de nós...

Quem estudou e desenvolveu a teoria que descreve a atração gravitacional entre os corpos foi Isaac Newton. De acordo com a sua teoria, a força que faz uma jaca cair no chão é do mesmo tipo da força que faz com que a Terra fique ligada ao Sol, ou a Lua fique ligada à Terra.

Newton generalizou a idéia da atração gravitacional a todos os objetos no universo, afirmando que **todos os corpos no universo se atraem mutuamente**. Isto é, o Sol atrai a Terra, assim como a Terra atrai o Sol. A Terra atrai a jaca e a jaca atrai a Terra. Todos os objetos do universo seguem essa lei que foi chamada: **lei da gravitação universal**.

E Newton foi além: propôs que a **força gravitacional** (F_g) seria tanto maior quanto maiores fossem as massas dos objetos; isto é, quanto mais matéria o objeto tem, maior a força com que ele atrai os outros objetos para perto de si, e igualmente é atraído por esses objetos. Portanto, a força gravitacional entre dois objetos de massas **M** e **m** é **diretamente proporcional às suas massas**:

$$F_g \text{ é proporcional a } M \cdot m$$

Além disso, a força é menor quanto mais afastados estiverem os objetos. Porém, mais do que isso, a força diminui com o **quadrado da distância**. Portanto, a força gravitacional é **inversamente proporcional ao quadrado da distância**:

$$F_g \text{ é proporcional a } \frac{1}{d^2}$$

Juntando as duas suposições, escrevemos:

$$F_g \text{ é proporcional a } \frac{M \cdot m}{d^2}$$

Em Matemática, quando duas grandezas são proporcionais, existe uma **constante de proporcionalidade** que as relaciona. No caso da força gravitacional, essa constante é chamada de **constante da gravitação universal**, e é representada pela letra **G.**

Então, de acordo com a lei da gravitação universal, a força entre dois objetos quaisquer, de massas M e m, separados pela distância d, é:

$$F_g = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$$

Isolando a constante G, isto é, passando todas as outras grandezas para o outro lado da equação, podemos escrever:

$$G = F_g \cdot \frac{d^2}{M \cdot m}$$

Assim, quando conhecemos a força entre dois objetos (é possível medi-la), as massas dos objetos e a distância entre eles, podemos calcular o valor da constante G:

$$\boxed{G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ Nm^2/kg^2}$$

Como você viu, Terra foi capaz de colocar a jaca em movimento, isto é, a jaca se moveu em direção à Terra; mas não observamos o contrário, isto é, a Terra não saiu do lugar! Vamos entender por que isso acontece.

RECORDANDO

Você se lembra da **terceira lei de Newton**? Ela diz que, se um objeto A exerce uma força sobre um objeto B, o objeto B fará uma **força de mesma intensidade**, **mesma direção** e **sentido contrário** sobre o objeto A. Por isso, recebe o nome de **lei da ação e reação**.

Então, a intensidade da força com que a Terra atrai a jaca é igual à intensidade da força com que a jaca atrai a Terra:

$$F_{Terra,jaca} = F_{jaca,Terra}$$

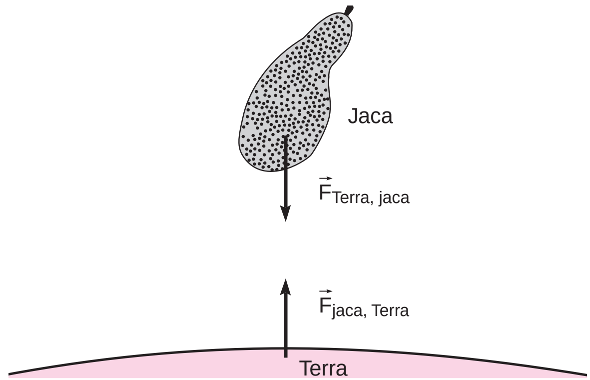


Figura 13

Mas a massa da jaca é muito pequena e a força que a Terra exerce sobre ela é suficiente para alterar o seu estado de movimento. Assim, a jaca, que estava parada, adquire velocidade. Por outro lado, a massa da Terra é muito grande, e a força que a jaca exerce sobre ela não é suficiente para movimentá-la. Por isso a jaca é acelerada e a Terra não.

Peso ou massa?

Sabemos que é difícil alterar o estado de movimento de objetos que têm grandes massas (levantar um armário por exemplo). Agora é possível entender bem por que isso acontece.

Para levantar um objeto do chão é preciso fazer força. Porque, para erguer um objeto, precisamos vencer a força gravitacional, que o puxa para baixo. Quanto mais **pesado** um objeto, mais força precisa ser feita.

Mas... o que é **peso**?

O homem da Figura 14 tem dificuldade em levantar o elefante porque a Terra o puxa para sua superfície.

Quanto maior for a massa do elefante mais difícil será levantá-lo, pois, quanto maior for a sua massa, maior será a força com que a Terra o atrai! Lembre-se:

$$F_{Terra,elefante} = G \cdot \frac{m_{Terra} \cdot m_{elefante}}{d^2}$$

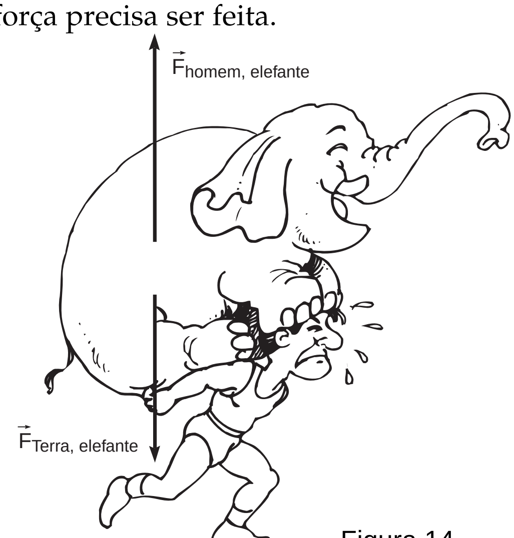


Figura 14

Nesse caso, a distância entre a Terra e o elefante é o raio da Terra ($d = r$), pois é a distância do elefante ao centro da Terra.

$$F_{Terra,elefante} = \frac{G \cdot m_{Terra}}{r^2} \cdot m_{elefante}$$

Para calcular a força exercida pela Terra sobre qualquer objeto em sua superfície, basta usar a expressão anterior, substituindo a massa do elefante pela massa do objeto.

Observe que G, m_{Terra} e r têm sempre o mesmo valor quando calculamos a força com a qual a Terra atrai qualquer objeto, portanto o seu produto é uma constante:

$$\frac{G \cdot m_{Terra}}{r^2} = \text{constante}$$

Mas que **constante** é essa?

RECORDANDO

Na Aula 8, discutimos a segunda lei de Newton: a resultante das forças que agem sobre um corpo é igual ao produto da sua massa pela sua aceleração.

$$F_{resultante} = m \cdot a$$

Ao se soltar da árvore, a única força agindo sobre a jaca é a atração gravitacional da Terra. Portanto, ela é a força resultante na jaca.

$$\boxed{F_{Terra,jaca} = F_{resultante}}$$

Usando as equações anteriores, pode-se escrever:

$$\frac{G\ m_{Terra}}{r^2} \cdot m_{jaca} = m_{jaca} \cdot a_{jaca}$$

Portanto:

$$\frac{G\ m_{Terra}}{r^2} = a_{jaca}$$

A aceleração da jaca não depende da sua massa, e seu valor é **constante**. Isso significa que é a mesma para todos os objetos, isto é, todos os objetos próximos à superfície da Terra caem com a mesma aceleração, a **aceleração da gravidade**.

Pode-se então escrever:

$$F_{Terra,\ jaca} = m_{jaca} \cdot g$$

onde

$$g = \frac{G\ m_{Terra}}{r^2}$$

A força com que a Terra atrai a jaca é proporcional à massa da jaca, sendo a constante de proporcionalidade a aceleração da gravidade. Essa força é conhecida como ***força-peso***, ou simplesmente **peso**!

Portanto, o peso de qualquer objeto é igual ao produto de sua massa pela aceleração da gravidade, isto é:

$$\boxed{\mathbf{P = m \cdot g}}$$

Para calcular a aceleração da gravidade em qualquer outro planeta, usamos:

$g = \dfrac{G\ m_{planeta}}{r^2_{planeta}}$ substituindo a massa do planeta e o seu raio.

Assim, se você for à Lua, ficará mais leve, e poderá pular mais alto, com menos esforço. Isso porque a força gravitacional (e a aceleração da gravidade) na Lua é menor do que na Terra. Mas note: é o peso que varia, não a massa; esta permanece a mesma.

Por que a Lua não cai?

Vimos que todos os objetos se atraem gravitacionalmente e que a força com que a Terra atrai a Lua pode ser calculada pela expressão:

$$F_{\text{Terra, Lua}} = G \cdot \frac{(m_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{Lua}})}{D_{T,L}^{\;2}}$$

onde $D_{T,L}$ é a distância da Terra à Lua, precisamente a distância entre os seus centros.

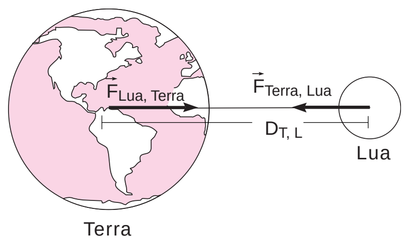


Figura 15

A Lua gira em volta da Terra, e sua trajetória, isto é, o caminho que ela percorre pode ser considerado circular.

Vimos na aula anterior que, para existir um movimento circular, é preciso que a força resultante aponte para o centro da circunferência, isto é, uma força centrípeta.

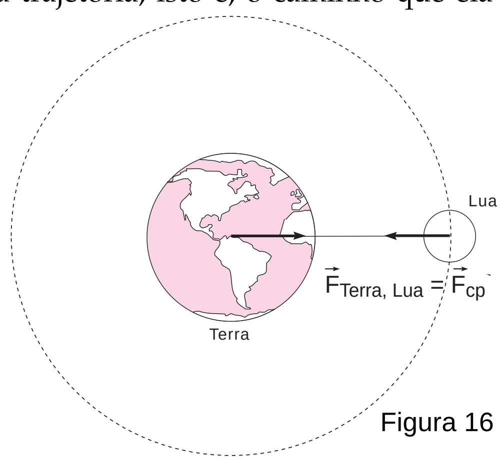


Figura 16

Então, a Lua tem aceleração centrípeta, que muda a direção do movimento, isto é, a direção da velocidade, mas não muda o seu valor (módulo).

Dizemos que a Lua está **em órbita** ao redor da Terra e aí permanece. Para colocar um objeto em órbita ao redor da Terra, como fazemos com os satélites artificiais, devemos lançá-lo com uma certa velocidade mínima, chamada "velocidade de escape".

Observe a Figura 17:

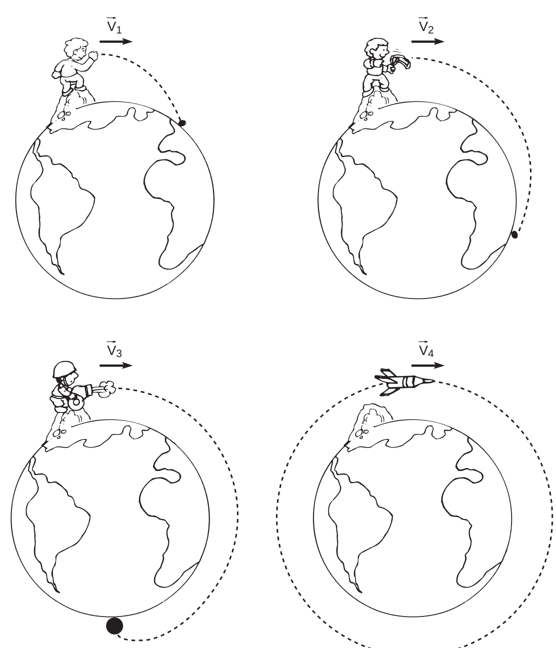


Figura 17. A partir de certa velocidade, o objeto entrará em órbita.

Só quando o objeto é lançado com velocidade maior ou igual à velocidade de escape ele pode “entrar em órbita” ao redor da Terra. A Lua tem uma velocidade maior do que a de escape.

Lembre-se de que os objetos próximos à superfície da Terra estão sujeitos à força da gravidade e que, portanto, caem com aceleração $g = 9{,}8\ m/s^2$.

Com a Lua, a nave e os astronautas ocorre o mesmo! É como se todos eles caíssem com g. Mas, ao mesmo tempo em que caem, eles andam para o lado. Por isso nunca atingem a superfície da Terra.

Nesta aula você aprendeu que:

- existem diferentes tipos de astros, com características diferentes: estrelas, planetas e satélites;
- os astros realizam dois tipos de movimentos: **translação** e **rotação**;
- todos os objetos se atraem mutuamente, essa atração é chamada **força da atração gravitacional** e descrita pela **lei da gravitação universal**;
- os objetos na superfície da Terra não flutuam, eles ficam no chão porque a Terra os atrai gravitacionalmente para a sua superfície;
- a força com que a Terra atrai os objetos é o peso do objeto ($P = m \cdot g$);
- **massa** é a **quantidade de matéria** que forma um objeto, e **peso** é uma **força** cujo valor depende da massa do objeto e da aceleração da gravidade; por isso, o peso de um objeto pode ser diferente em outro planeta, mas a sua massa será a mesma.

Exercício 1

São conhecidos os valores aproximados:

- raio da Terra: $6{,}37 \cdot 10^6$ m;
- massa da Terra: $5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg;
- massa da Lua: $7{,}4 \cdot 10^{22}$ kg;
- raio da Lua: $1{,}7 \cdot 10^6$ m;
- constante da gravitação universal $G = 6{,}7 \cdot 10^{-11}\ Nm^2/kg^2$.

Calcule os valores da aceleração da gravidade na Terra e na Lua. Lembre-se de como se fazem operações utilizando a notação científica. Não se esqueça de verificar as unidades!

Exercício 2

Gaspar foi à Lua. Suponha que a massa dele seja 80 kg. Utilizando os valores calculados no Exercício 1, calcule o seu peso na Terra e na Lua.

Exercício 3

A força com que o Sol atrai a Terra é dada por: $F = G\,\dfrac{m_{Sol} \cdot m_{Terra}}{d^2}$, onde:

d é a distância entre a Terra e o Sol. Se essa distância fosse o dobro, isto é, duas vezes maior, o que aconteceria com a força entre eles?

Exercício 4

Você já sabe que todos os objetos no universo se atraem, e que a força depende de suas massa e da distância entre eles. Calcule a força de atração gravitacional entre dois sacos de açúcar de 1 kg cada, colocados a 1 m de distância um do outro (lembre-se de que a constante da gravitação universal é a mesma, sempre). Compare o seu resultado com a força de atração que a Terra exerce sobre cada saco, isto é, seu peso. O que você pode concluir?

AULA

13

Chocolate, energia que alimenta

PARA COMEÇAR

Cristiana e Roberto têm o saudável hábito de correr quase todas as manhãs para manter a forma. Mesmo assim Roberto está engordando, pelo menos é o que acha Cristiana.

"É essa sua mania de chocolate," diz ela, "você é viciado em chocolate!"

Roberto, é claro, não concorda. Ele come uma barrinha de chocolate de vez em quando e, sempre que come, não usa o elevador: sobe até o 5º andar, onde mora, pela escada, para compensar.

Quem conhece a vida de um casal sabe que essa conversa não acontece uma vez só; ela se repete até que alguém proponha uma saída. E a saída foi recorrer à Física, consultar a vizinha Maristela, que, segundo diziam no prédio, era estudante de Física.

Cristiana queria saber se, afinal, os cinco lances de escada que Roberto dizia subir (ela nunca tinha visto) compensavam o chocolate que ele comia.

Maristela consultou uma tabela de calorias de alimentos, perguntou o peso de Roberto (que diminuiu uns 5 quilos, segundo Cristiana), avaliou a altura dos degraus da escadaria do prédio e chegou a uma dramática conclusão. Coçando a cabeça, decretou: "Para consumir a energia fornecida por uma barra de 100 gramas de chocolate, o vizinho deveria subir uma escadaria de uns 12.000 degraus, pelo menos – mais de 800 andares!" Para os cinco andares que ele subia, 1 grama já dava e sobrava.

Bem que Maristela ainda tentou consolar Roberto. Falou que não era médica e, portanto, não entendia muito bem como funciona o corpo humano; que a conta feita por ela supunha que toda a energia do chocolate seria utilizada para subir a escada, o que certamente não era verdade; o nosso organismo também consome energia para digerir os alimentos, respirar, pensar...

"Pra isso ele já come mais que o suficiente", fulminou Cristiana, vitoriosa.

Conformado, Roberto começou a entender melhor por que a propaganda dizia que chocolate é "a energia que alimenta". Mas não se deu por vencido: a vizinha devia ter errado. Como é que uma barra de chocolate podia fornecer tanta energia? Afinal, o que é **energia**?

Infelizmente, Roberto vai ter ainda alguma frustração. Não é fácil responder a essas perguntas, principalmente a última. Uma definição comum de energia, que também vamos adotar, afirma que **energia é a capacidade de realizar trabalho**. Mas o que é trabalho? É uma grandeza física criada para medir energia.

Richard Feynman, um dos maiores físicos contemporâneos e ganhador do Prêmio Nobel de 1965, afirmava que os físicos **não sabem o que é a energia**.

De qualquer forma, embora seja difícil definir energia, saber **o que ela é**, sabemos muito sobre ela. Conhecemos suas formas e transformações, sabemos como se conserva, embora mude de forma e, sobretudo, sabemos medi-la em função de seus efeitos. Esta aula será dedicada a algumas dessas idéias iniciais.

Fique ligado

As formas de energia

Imaginemos algumas coisas e situações bem diferentes: uma barra de chocolate, uma pilha, um litro de álcool, uma rocha à beira de um penhasco e uma ensolarada praia do Nordeste com dunas de areia modeladas pelo vento. O que esses objetos ou lugares têm em comum? Eles podem produzir algum efeito, realizar algum **trabalho**. Ilustram fontes ou formas de energia.

A barra de chocolate é um alimento, tem energia química que, por meio da digestão em nosso organismo, pode se transformar em outras formas de energia.

A energia química da pilha só é útil para nós quando se transforma em energia elétrica, que por sua vez, pode se transformar em energia luminosa numa lanterna, em energia sonora num rádio, ou em energia mecânica num brinquedo.

A energia química do álcool pode se transformar em energia térmica, quando nos ajuda a acender a churrasqueira, ou em energia mecânica nos veículos a álcool.

Uma rocha à beira de um penhasco tem uma energia potencial gravitacional. Ela pode cair, transformando-se em energia cinética e causar muitos prejuízos.

A praia do Nordeste não é só uma fonte de beleza, mas também um lugar onde é abundante a energia solar e a energia cinética dos ventos.

Nessa descrição aparecem dois verbos que são a chave para a compreensão do conceito de energia: **poder** e **transformar.** Sempre que alguma coisa **pode** realizar um trabalho, direta ou indiretamente, por meio de alguma **transformação**, é porque essa "alguma coisa" tem uma forma de energia.

Algumas vezes essas relações são percebidas facilmente. Por exemplo, quando alguém puxa o elástico de um estilingue e, soltando, faz uma pedra subir. Não é difícil perceber que o elástico esticado tem uma energia que se transfere à pedra.

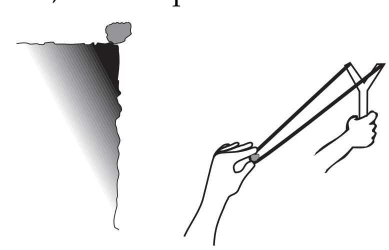


Figura 1. A rocha no alto do penhasco e a pedra no elástico esticado têm energia potencial.

Outras vezes essa relação é menos visível como no caso da energia fornecida pelos alimentos, ou da energia elétrica, da qual depende praticamente toda a civilização moderna.

Seja como for, todas as formas de energia podem ser resumidas em duas: **potencial** e **cinética** e todas as transformações de energia são, essencialmente, transformações de energia cinética em potencial e vice-versa.

Energia potencial

Se um corpo tem energia quando **pode** realizar um trabalho, pode-se classificar a sua energia pela propriedade que dá a ele a capacidade de realizar esse trabalho. Vamos voltar à rocha no alto do penhasco (Figura 1). Ela tem energia porque está lá no alto e **pode** cair. Mas por que ela pode cair? Porque a Terra a atrai, é o que afirma a lei da atração gravitacional. Se não existisse essa propriedade, a rocha não cairia e, portanto, não teria energia.

Uma situação semelhante ocorre com a pedra que está no elástico esticado do estilingue. Ela tem energia porque, se o elástico for solto, tenderá a voltar à sua posição inicial, levando a pedra que, por isso, **pode** ser lançada à distância. Se o material não fosse elástico, como um chiclete que estica e não volta, a pedra também não teria energia.

Nesses dois casos, a característica de cada corpo, e que dá a capacidade de realizar trabalho, é a **posição.** É a posição da rocha no alto do penhasco e da pedra no elástico esticado a origem da energia desses corpos.

Toda energia que se deve à **posição** de um corpo do **tipo potencial**. No caso da rocha, essa energia é uma **energia potencial gravitacional**. É a atração gravitacional que faz a rocha ter energia naquela posição. Da mesma forma, é a elasticidade do elástico do estilingue que dá à pedra, naquela posição, uma **energia potencial elástica**.

Há outras formas de energia potencial. Um corpo carregado eletricamente pode ser atraído ou repelido por outro também carregado, adquirindo, energia potencial elétrica.

É interessante notar que a energia potencial, como a própria palavra indica, é uma energia que pode vir a ser usada, mas, se não for, não se perderá. Por isso costuma-se dizer que energia potencial é uma energia **armazenada** no corpo. Isso não ocorre com a outra forma de energia, a energia cinética.

Energia cinética

O ar parado não realiza trabalho, mas o ar em movimento – o vento – é uma fonte de energia. Foi a energia dos ventos que trouxe as caravelas dos descobridores para o Novo Mundo, há quinhentos anos. As águas paradas de um lago tranqüilo também não realizam trabalho, ao contrário da correnteza de um rio ou o vaivém das águas do mar.

Mas não só a água e o ar têm energia quando em movimento. Todo corpo em movimento tem energia, uma **energia cinética**.

No entanto, diferentemente da energia potencial, a energia cinética não fica "armazenada" no corpo, ela só pode ser aproveitada, diretamente, enquanto ele se move. Quando os ventos paravam, as caravelas paravam – era a **calmaria**, uma espécie de "crise energética", que só podia ser resolvida desviando a rota para regiões onde havia vento. Não era possível guardar parte da energia dos dias em que ventava muito para utilizar nos dias em que ventava pouco.

É interessante lembrar que, na realidade, tudo está em movimento, desde as estrelas, o Sol, a Terra e os planetas, até os átomos e moléculas que formam os corpos. Tudo, portanto, sempre tem energia cinética. Logo, você poderia dizer que não existe calmaria, certo? Certo e errado.

Como vimos no estudo da Cinemática, o movimento é um conceito relativo, pois um corpo pode estar em movimento em relação a alguma coisa e parado em relação a outra. O mesmo vale para a energia cinética. Na calmaria, a caravela estava parada em relação ao mar ou à Terra, embora se movesse, junto com a Terra em relação ao Sol. Em relação ao Sol, portanto, a caravela tinha energia cinética, mas não em relação ao mar. Se a caravela fosse uma nave espacial, não teria havido maiores problemas.

Por outro lado, os átomos e moléculas de um corpo estão em permanente estado de agitação, eles **sempre** têm energia cinética. Essa energia cinética, embora não seja visível, pode ser percebida por sua **temperatura**. Quanto maior a temperatura de um corpo, maior a energia cinética de seus átomos e moléculas.

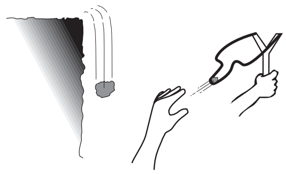


Figura 2. À medida que a rocha cai ou a pedra se desloca, a energia potencial transforma-se em energia cinética.

Sob o ponto de vista microscópico do mundo invisível dos átomos e moléculas, todo corpo tem, sempre, energia cinética. Sob o ponto de vista macroscópico, do que podemos ver, um corpo pode ter ou não energia cinética: depende do referencial.

Voltemos à rocha no alto do penhasco. Ela está parada; logo, não tem energia cinética, mas tem energia potencial. Se ela se desprender e cair, enquanto a altura de queda diminui, sua velocidade aumenta. À medida que a altura vai diminuindo, diminui a energia potencial gravitacional, porque o trabalho que essa rocha pode fazer depende da altura de queda. Se ela estiver no chão, não haverá mais trabalho a realizar, a energia potencial gravitacional da rocha é nula. Por outro lado, como a velocidade da rocha vai aumentando, a sua energia cinética, que lá em cima nem existia, também vai aumentando (Figura 2).

Conservação da energia

Há, portanto, uma compensação: enquanto **a energia potencial gravitacional da rocha diminui**, **sua energia cinética aumenta**. E quando ela pára, o que acontece com essas energias? Desaparecem? Não, a energia potencial inicial da rocha não se transforma apenas em energia cinética da própria rocha, mas também na energia cinética de seus átomos e moléculas, pois ela se aquece no atrito com o penhasco.

Além disso, durante a queda ela transfere energia a outras rochas e pedras; a galhos de árvore que se vergam e quebram; ao chão e ao ar, que também se aquecem, vibram e se manifestam na forma de energia sonora, pelo ruído assustador do seu caótico movimento.

O mais importante é que, segundo a Física, a energia total em jogo nesse processo não se perde, apenas se transforma. Essa é uma conseqüência de um dos seus princípios fundamentais, o **princípio da conservação da energia.**

A idéia de que a energia sempre se conserva pode nos dar uma falsa impressão: se nada se perde, não há por que nos preocuparmos com a preservação da energia. Essa é uma conclusão errada, porque nem toda forma de energia pode ser aproveitada pelo homem. O que restou do movimento da rocha, por exemplo, foi um enorme ruído e um ligeiro acréscimo na temperatura da rocha e em tudo que foi atingido por ela durante a queda. Em pouco tempo, tudo isso acabou por se transferir ao ambiente. A energia total não se perdeu, é verdade, mas não é mais possível aproveitá-la. Para a natureza, nada se alterou, para nós, seres humanos, há agora menos energia disponível.

As fontes de energia disponíveis para nós são aquelas que sabemos aproveitar: a energia potencial gravitacional da água; a energia química dos combustíveis, como os derivados do petróleo, o álcool e o carvão; a energia nuclear e, em pequena escala, ainda, a energia solar, dos ventos e das marés. A maior parte dessa energia é transformada em energia elétrica e o restante na energia mecânica da maioria dos nossos meios de transporte. Nossas principais fontes de energia, porém, são limitadas.

Mesmo nos poucos países, como o nosso, onde há abundância de energia de rios e cachoeiras, a disponibilidade é cada vez menor, e mais caras as obras necessárias para o seu aproveitamento. O petróleo, pelo que se sabe até agora, deve durar apenas mais algumas décadas. A energia nuclear, além de limitada, apresenta problemas de armazenagem do lixo atômico que ainda não foram resolvidos. A energia renovável do álcool freqüentemente ocupa terras férteis que poderiam produzir alimentos.

Em resumo, como se vê, a ciência além de não saber exatamente o que é energia, não sabe também se, no futuro, haverá energia suficiente para a sobrevivência da nossa civilização.

O mais sensato, hoje, é não desperdiçar. Apagar as lâmpadas desnecessariamente acesas, tomar banhos menos demorados, regular o motor do carro etc. Felizmente, o nosso organismo é muito mais eficiente e os alimentos, nossa fonte de energia, de uma variedade quase interminável.

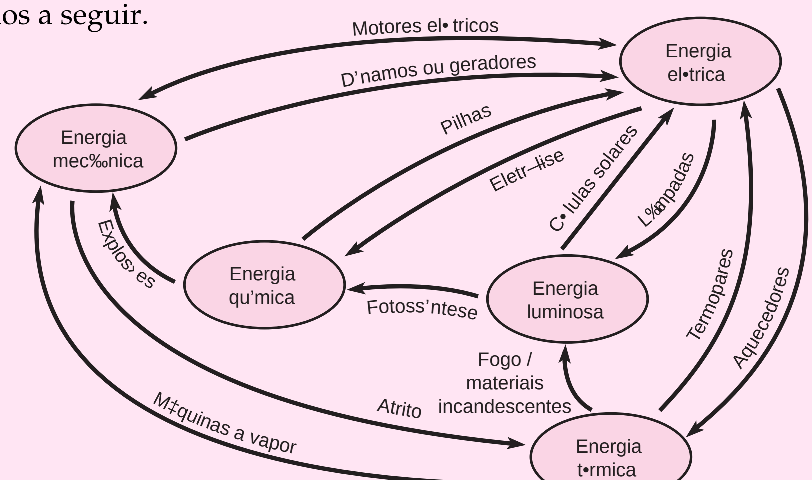
Graças a isso, o nosso amigo Roberto pôde deixar de comer chocolate, que lhe fornecia energia em excesso, transformado em gordura no seu eficiente organismo. Em compensação, Cristiana tem preparado deliciosos pratos à base de pepino, abóbora, jiló, quiabo e outras iguarias menos energéticas, mas igualmente saborosas!

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que é energia;
- quais as formas de energia e suas transformações;
- que a energia se conserva, mas nem toda forma de energia pode ser aproveitada pelo homem.

Use a figura e descreva as transformações por que passa a energia nos exercícios a seguir.



Exercício 1

Um atleta, no salto com vara, corre, apóia a vara na pista, vergando-a, e salta, ultrapassando o sarrafo.

Exercício 2

O Sol aquece as águas da superfície terrestre, que evaporam e sobem para as camadas mais altas da atmosfera. Lá elas se resfriam, liqüefazem e caem de novo sobre a superfície na forma de chuva.

Exercício 3

As águas de uma represa, no alto de um morro, são canalizadas para baixo, onde acionam turbinas que, ligadas a geradores, produzem eletricidade.

Exercício 4

Uma criança coloca uma pilha num carrinho que, quando ligado, corre, acende os faróis e toca a buzina.

Exercício 5

Numa região desértica, o vento gira as pás de um moinho que aciona uma bomba para retirar água do fundo de um poço.

AULA

14

O trabalho cansa?

PARA COMEÇAR

Roberto já não subia mais as escadas, só usava o elevador. Afinal ele não comia mais chocolate, não tinha mais energia sobrando para subir centenas de andares. Mas uma coisa ainda o intrigava. Como Maristela tinha feito aqueles cálculos? Como alguém pode achar resultados numéricos tão precisos a partir de um conceito que, segundo falou a própria Maristela, nem os físicos sabiam direito o que era?

A resposta a essas perguntas começa a ser dada nesta aula. Já vimos que as grandezas fundamentais da Física podem ser medidas diretamente por meio da criação de padrões adequados. É o caso do comprimento, da massa e do tempo. Outras grandezas derivadas não têm padrões próprios, mas podem ser medidas com auxílio dos padrões criados para as grandezas fundamentais. É o caso da área, do volume, da velocidade, da aceleração, da força etc. É o caso também da energia, mas com uma característica a mais: a medida da energia tem, como ponto de partida, uma outra grandeza física, o **trabalho**. Se energia é a capacidade de realizar trabalho, mede-se a energia de um corpo pelo **trabalho que ele realiza**. Mas o que é trabalho? Como se mede o trabalho realizado por um corpo?

Fique ligado

Conceito de trabalho

O avô de Roberto, um sitiante, ficou alguns dias no apartamento do neto e estranhou que aquela vizinha passasse a noite toda com a luz acesa.

“Ela não dorme?”, quis saber o desconfiado lavrador.

“É que ela fica até tarde trabalhando sentada na frente do computador”, explicou Roberto.

“Trabalhar sentado é novidade, pra mim isso não é trabalho, não cansa!”, sentenciou o lavrador.

De fato, segundo a Física, Maristela não trabalhava, ou melhor, não **realizava trabalho**. O conceito de trabalho, em Física, é parecido com o do lavrador: sem força não há trabalho. Mas só a existência de força ainda não basta; é preciso que ela produza ou atue ao longo de um deslocamento. O trabalho poderá então ser medido pelo produto da força pelo deslocamento:

$$\boxed{\textbf{Trabalho = força} \cdot \textbf{deslocamento}}$$

Mas por que essa relação? Por que produto e não soma, por exemplo? Porque são grandezas que se compensam, isto é, se nós aumentamos uma, podemos diminuir a outra, na mesma proporção. Veja a Figura 1.

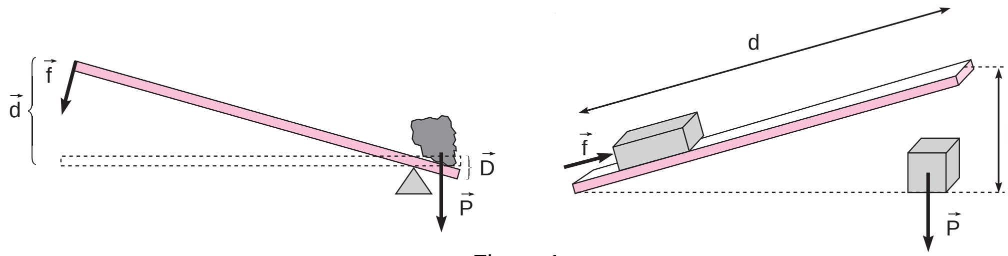


Figura 1

Na alavanca, uma força **menor** ($\vec{f}$) pode mover um peso **maior** ($\vec{p}$) porque o deslocamento (d) da força menor é maior que o deslocamento (D) do peso. O mesmo ocorre no plano inclinado. É possível elevar por uma altura (D) o caixote de peso ($\vec{p}$) fazendo uma força ($\vec{f}$) menor que ($\vec{p}$) porque, por intermédio do plano inclinado, a força ($\vec{f}$) atua ao longo de um deslocamento (d) maior que (D). Em ambos os casos é válida a relação:

$$\boxed{F \cdot d = P \cdot D}$$

Em outras palavras, **é possível fazer uma força menor desde que se compense com um deslocamento maior**. A energia consumida é a mesma em ambos os casos, pois o trabalho realizado é o mesmo. Essa definição de trabalho, no entanto, não prevê todas as situações possíveis. Veja a situação ilustrada na Figura 2: o bloco está se movendo ao longo do deslocamento (d) sob a ação simultânea de várias forças. Será que todas realizam o mesmo trabalho? Como calcular o trabalho de cada uma das forças?

Trabalho de uma força constante

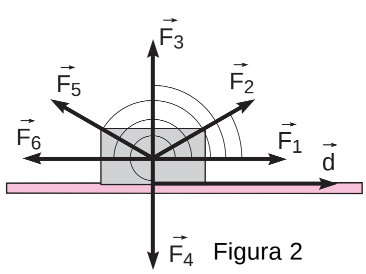


Figura 2

Como você pode ver na Figura 2, há forças que favorecem o deslocamento d ($\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$), outras que não influem diretamente ($\vec{F}_3$ e $\vec{F}_4$) e outras que se opõem ($\vec{F}_5$ e $\vec{F}_6$). Essas relações estão ligadas ao ângulo formado entre a força e o deslocamento. Se esse ângulo está compreendido entre 0º e 90º, a força favorece o deslocamento, realiza um trabalho **positivo.** Se for igual a 90º, ela não influirá no deslocamento, e seu trabalho será **nulo**. Se o ângulo estiver compreendido entre 90º e 180º, ela dificultará ou se oporá ao deslocamento, isto é, realizará um trabalho **negativo**. Além disso, apenas nos casos em que o ângulo é 0º ou 180º, a força atua **integralmente** a favor ou contra o deslocamento; nos demais casos, só uma parcela da força influi. Essa parcela é **a componente da força na direção do deslocamento.** Todas essas características devem aparecer na definição de trabalho de uma força. Por isso, além do produto **força** × **deslocamento**, aparece a grandeza trigonométrica cos α (co-seno de α, ângulo entre a força e o deslocamento). A definição do trabalho de uma força F, que representamos por τ_F é, portanto,

$$\boxed{\tau_F = F \cdot d \cdot \cos \alpha}$$

No SI, como a força é dada em newtons (N) e o deslocamento em metros (m), o trabalho será dado em N · m, unidade que recebe o nome de joule (J), em homenagem a James Prescott Joule, físico inglês do século XIX. Assim:

1 joule é o trabalho realizado por uma força de 1 newton que atua na mesma direção e sentido de um deslocamento de 1 metro.

Passo-a-passo

Como exemplo do cálculo do trabalho de uma força, vamos voltar à Figura 2 e calcular o trabalho das forças F_1 (τ_1), F_2 (τ_2), F_3 (τ_3), F_4 (τ_4), F_5 (τ_5) e F_6 (τ_6), ao longo do deslocamento d.

Suponha que todas as forças sejam iguais e valham 10 N e o deslocamento seja de 5 m. Em relação aos ângulos, temos:

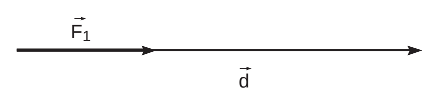
- O ângulo entre F_1 e d é $a_1 = 0°$; F_1 tem **a mesma direção e sentido** do deslocamento**.**
- Vamos supor que o ângulo entre F_2 e d seja $\alpha_2 = 37°$.
- Os ângulos entre F_3 e d e entre F_4 e d são $\alpha_3 = 90°$ e $\alpha_4 = 90°$; F_3 e F_4 são **perpendiculares** ao deslocamento.
- Vamos supor que o ângulo entre F_5 e d seja $\alpha_5 = 120°$.
- O ângulo entre F_6 e d é $\alpha_6 = 180°$, porque F_6 tem a **mesma direção e sentido oposto** ao deslocamento.

Observação: Você pode obter os valores do co-seno desses ângulos com uma calculadora ou consultando uma tabela de senos e co-senos.

Podemos agora calcular o trabalho de cada força:

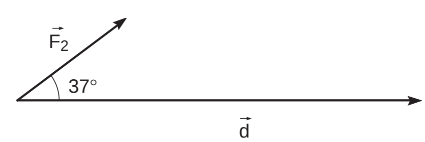
- $\tau_1 = F_1 \times d \times \cos \alpha_1$
  $\tau_1 = 10 \times 5 \times \cos 0°$
  $\tau_1 = 50 \times 1{,}0 = 50$ J

Figura 3. Trabalho de F1



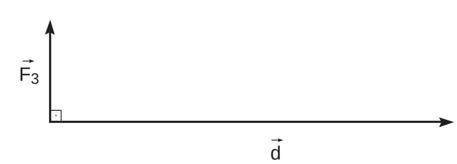
- $\tau_2 = F_2 \times d \times \cos \alpha_2$
  $\tau_2 = 10 \times 5 \times \cos 37°$
  $\tau_2 = 50 \times 0{,}8 = 40$ J

Figura 4. Trabalho de F2



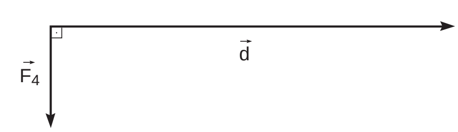
- $\tau_3 = F_3 \times d \times \cos \alpha_3$
  $\tau_3 = 10 \times 5 \times \cos 90°$
  $\tau_3 = 50 \times 0 = 0$

Figura 5. Trabalho de F3



- $\tau_4 = F_4 \times d \times \cos \alpha_4$
  $\tau_4 = 10 \times 5 \times \cos 90°$
  $\tau_4 = 50 \times 0 = 0$

Figura 6. Trabalho de F4



- $\tau_5 = F_5 \times d \times \cos \alpha_5$
  $\tau_5 = 10 \times 5 \times \cos 120°$
  $\tau_5 = 50 \times -0{,}5 = -25$ J

Figura 7. Trabalho de F5

- $\tau_6 = F_6 \times d \times \cos \alpha_6$
  $\tau_6 = 10 \times 5 \times \cos 180°$
  $\tau_6 = 50 \times -1{,}0 = -50$ J

Figura 8. Trabalho de F6

Observe que o valor do co-seno do ângulo corrige o valor do trabalho, em cada caso. Se o trabalho fosse calculado apenas pelo produto $F \cdot d$, obteríamos sempre o mesmo valor e o mesmo sinal, o que não corresponderia à realidade. É importante notar ainda que, se todas essas forças atuarem ao mesmo tempo, o trabalho resultante dessas forças, τ_R, será a **soma algébrica** do trabalho de cada uma. Assim, teremos:

$$\tau_R = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_6$$
$$\tau_R = 50 + 40 + 0 + 0 + (-25) + (-50)$$
$$\tau_R = 15\ J$$

Trabalho e energia cinética

Agora que já sabemos calcular o trabalho de uma força constante, é possível encontrar uma expressão matemática para a energia cinética. O raciocínio é simples. Suponha que um corpo está em repouso sobre um plano horizontal sem atrito (veja a Figura 9).

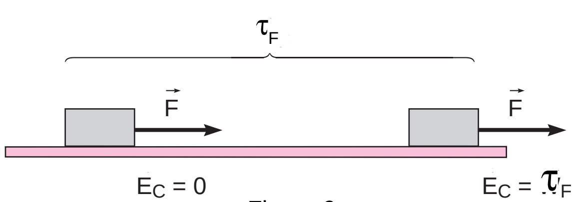


Figura 9

Como ele está em repouso, não tem energia cinética. Sobre esse corpo passa a atuar uma força constante $\vec{F}$, paralela ao plano, que o desloca na mesma direção e sentido da força. Depois de um deslocamento **d**, esse corpo está com uma determinada velocidade **v.** Adquire, portanto, uma energia cinética, E_C . Como só essa força realiza trabalho, essa energia cinética é fruto do trabalho dessa força (há mais duas forças atuando sobre o corpo, o peso e a reação do plano, mas são perpendiculares ao deslocamento e, portanto, não realizam trabalho). Pode-se, então, determinar a energia cinética desse corpo, pelo trabalho realizado por essa força, ou seja:

$$\boxed{\tau_F = E_C}$$

Temos, então:

$$\tau_F = F \cdot d \cdot \cos 0^o$$

Mas, pela segunda lei de Newton, $F = m \cdot a$. Temos, portanto:

$$\tau_F = m \cdot a \cdot d \cdot 1{,}0 \qquad \text{(I)}$$

Usando a equação de Torricelli, que é obtida quando eliminamos o tempo das funções horárias da posição e da velocidade no MRUV.

$$v^2 = v_0^{\ 2} + 2 \cdot a \cdot d$$

Podemos determinar a velocidade do bloco ao final do deslocamento d. Como ele parte do repouso, $v_0 = 0$, a expressão se simplifica:

$$v^2 = 2 \cdot a \cdot d$$

Pode-se obter daí o valor do produto $a \cdot d$:

$$a \cdot d = \frac{v^2}{2}$$

Substituindo esse valor de $a \cdot d$ na expressão (I), obtemos:

$$\tau_F = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

Essa expressão, $m \times \frac{v^2}{2}$, é, portanto, a **energia cinética E_{Cfinal} adquirida pelo corpo em função do trabalho da força F(τ_F)**. Escrevendo essa expressão de uma forma mais elegante, define-se energia cinética de um corpo de massa m com velocidade v como:

$$\boxed{E_C = \frac{1}{2} mv^2}$$

Como a energia cinética é igual ao trabalho realizado pela força, a sua unidade de medida deve ser a mesma unidade de trabalho. Logo, **a unidade de energia no SI também é o joule.**

Vamos voltar à Figura 3 e supor que o corpo **não estava inicialmente em repouso**, ou seja, $v_o \neq 0$. Isso significa que, quando a força F foi aplicada, o corpo já tinha uma energia cinética inicial, $E_{inicial}$. Para saber o trabalho dessa força ao final do deslocamento d, devemos descontar a energia cinética final, E_C, dessa energia cinética inicial, $E_{inicial}$. Nesse caso, o trabalho da força F é igual ao que o corpo ganha **a mais** de energia cinética, o que pode ser calculado pela variação da energia cinética que ele sofre, ou seja:

$$\boxed{\tau_F = E_{Cfinal} - E_{Cinicial}}$$

Se houver mais forças atuando sobre o corpo, cada uma delas vai realizar um trabalho. Nesse caso, como vimos no exemplo 1, o trabalho resultante, τ_R, de todas essas forças é a soma algébrica do trabalho de cada força. Esse trabalho resultante é o responsável pela variação da energia cinética do corpo. Podemos, então, escrever:

$$\tau_R = E_{Cfinal} - E_{Cinicial}$$

Representado por ΔE_C, que significa **variação da energia cinética**, a diferença $E_{Cfinal} - E_{Cinicial}$, temos:

$$\tau_R = \Delta E_C$$

Essas duas últimas relações expressam matematicamente o **teorema da energia cinética**, uma valiosa ferramenta para a interpretação, compreensão e resolução de problemas de Física, cujo enunciado é:

O trabalho resultante (τ_R) de todas as forças que atuam sobre um corpo num deslocamento d é igual à variação da energia cinética desse corpo (ΔE_C) nesse deslocamento.

Passo-a-passo

Um automóvel com massa de 800 kg tem velocidade de 36 km/h quando é acelerado e, depois de percorrer um determinado deslocamento, está com velocidade de 108 km/h. Determinar:

a) Sua energia cinética inicial, $E_{inicial}$:

Como a energia é medida em joules, unidade do SI, precisamos transformar a velocidade em metros por segundo. Portanto, como já vimos anteriormente, v_o = 36 km/h = 10 m/s. Basta agora determinar o valor de $E_{inicial}$:

$$E_{inicial} = \frac{1}{2} mv_{oinicial}^2$$

$$E_{inicial} = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot 10^2 = 40.000 \text{ J}$$

b) A energia cinética final, E_{Cfinal}. Sabendo–se que v = 108 km/h = 30 m/s, temos:

$$E_{Cfinal} = \frac{1}{2}\, mv^2$$

$$E_{Cfinal} = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot 30^2 = 360.000 \text{ J}$$

c) Qual o trabalho da força resultante que atua sobre o automóvel.
Aplicando o teorema da energia cinética, temos:

$$\tau_R = \Delta E_C = E_{Cfinal} - E_{Cinicial}$$
$$\tau_R = 360.000 - 40.000 = 320.000 \text{ J}$$

Observe que esse valor não corresponde ao trabalho do motor. Se a estrada for plana, horizontal, ou predominarem as subidas, o trabalho do motor certamente será maior. Ele deverá vencer também as forças de atrito e resistência do ar e, se houver subida, a componente tangencial do peso do automóvel. Todas essas forças realizam um trabalho negativo. Se houver descida, o trabalho do motor pode ser menor, porque, nesse caso, o peso do automóvel também vai realizar trabalho positivo.

Passo-a-passo

Uma bala com 20 g de massa atinge uma parede com velocidade de 600 m/s e penetra, horizontalmente, 12 cm. Determine o valor médio da força de resistência exercida pela parede, para frear a bala.

Para determinar o valor médio da força de resistência R exercida pela parede sobre a bala, é preciso calcular o trabalho que ela realiza, τ_R. Isso pode ser feito pelo teorema da energia cinética, que permite calcular o trabalho da parede pela variação da energia cinética da bala:

$$\tau_{(parede)} = \Delta E_{C\,(bala)}$$
$$\tau_R = E_{Cfinal} - E_{Cinicial}$$

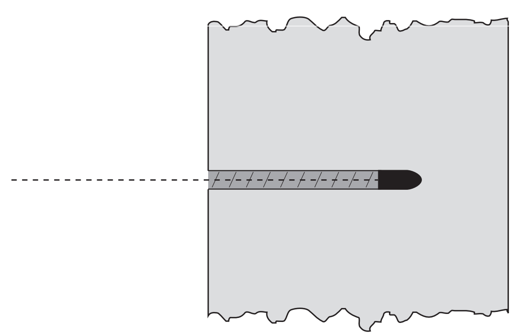


Figura 10

Como a bala pára ao final da penetração, E_{Cfinal} = 0, basta, portanto, calcular $E_{Cinicial}$.

$$E_{Cinicial} = \frac{1}{2}\, mv_o^{\,2}$$

Lembrando que m = 20 g = 0,02 kg e v_o = 600 m/s, temos:

$$E_{Cinicial} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}02 \cdot 600^2 = 3.600 \text{ J.}$$

Voltando a expressão do teorema da energia cinética, temos:

$$\tau_R = E_{Cfinal} - E_{Cinicial}$$

$$\tau_R = 0 - 3.600 = -\,3.600 \text{ J}$$

Para determinar o valor médio da força de resistência, voltemos à definição de trabalho de uma força, lembrando que, aqui $F_{Resultante} = R$:

$$\tau_R = R \cdot d \cdot \cos \alpha$$

Sabendo que o deslocamento da bala dentro da parede é d = 12 cm = 0,12 m, e $\alpha = 180^o$, pois a força exercida pela parede se opõe ao deslocamento, temos:

$$-3.600 = R \cdot 0{,}12 \cdot \cos 180^o$$
$$-3.600 = R \cdot 0{,}12 \cdot (-1{,}0)$$

Logo:

$$R = 3.600 \# 0{,}12 = 30.000 \text{ N}$$

Observação:

Dizemos que esse é o valor médio da força exercida pela parede sobre a bala porque essa força não é constante, ela varia ao longo do deslocamento.

Potência

Já vimos que, sob o ponto de vista da Física, sem força não há trabalho, mas ainda não respondemos a pergunta que dá titulo à nossa aula: o trabalho cansa? A resposta, é claro, só pode ser **"depende".** Depende do trabalho, da força que se faz e do deslocamento em que ela atua.

Mas há um fator a mais que ainda não entrou na discussão. Suponha que o nosso amigo Roberto, na esperança de compensar o chocolate que comia, resolvesse subir as escadas do seu prédio correndo. Será que desse jeito ele não iria gastar mais calorias?

A resposta agora é mais complicada. Fisicamente, o trabalho que ele realiza é o mesmo: transportar o próprio corpo do térreo ao andar em que mora. Mas nem ele nem seu organismo aceitam essa idéia com facilidade. Seu coração bateu muito mais rápido, sua respiração tornou-se ofegante, ele suou e se cansou muito mais. Internamente, o seu organismo consumiu muito mais energia, embora o trabalho externo tenha sido o mesmo. Isso ocorreu porque o **tempo** para a realização desse trabalho foi menor. Em outras palavras, a **potência** desenvolvida pelo organismo foi maior.

Você notou que estamos apresentando uma nova grandeza física muito importante nos dias de hoje, pois relaciona o trabalho (τ), realizado por uma máquina, com o intervalo de tempo (Δt) gasto em realizá-lo: a **potência (**P). Essa grandeza é definida pela expressão:

$$P = \frac{t}{D\,t}$$

Observe que, para um mesmo trabalho τ, quanto **menor** for o intervalo de tempo em que ele é realizado, que é o denominador da fração, **maior** será a potência e vice-versa. A unidade de potência no SI é o watt (W), em homenagem a James Watt, um engenheiro escocês que deu uma notável contribuição ao desenvolvimento das máquinas a vapor no século XVIII. Assim,

1 watt é a potência desenvolvida por uma máquina que realiza um trabalho de 1 joule em 1 segundo.

Como a potência é uma das grandezas físicas mais utilizadas na nossa vida diária, é comum encontrá-la expressa em múltiplos ou submúltiplos ou unidades práticas. Veja a seguir uma pequena lista dessas unidades e a relação delas com o watt:

1,0 quilowatt (kW) = 1.000 W
1,0 miliwatt (mW) = 0,001W
1,0 cv (cavalo-vapor) = 735,5 W
1,0 hp (horse-power) = 746 W

Além dessas unidades, há ainda uma unidade prática de energia, com a qual temos um desagradável contato mensal, por intermédio da conta de energia elétrica: o **quilowatt-hora**, cujo símbolo é kWh. A definição dessa unidade parte da definição de potência. Se a potência é dada por

$$P = \frac{t}{Dt},$$

então, o trabalho pode ser calculado pela relação:

$$\tau = P \cdot \Delta t$$

Isso significa que podemos medir o trabalho realizado por uma máquina e, portanto, a energia que ela consome, multiplicando-se a sua potência pelo tempo que ela fica funcionando. Se a potência é dada em watts e o tempo em segundos, o trabalho (ou a energia) será dado em joules. Essa unidade, no entanto, não é muito prática, principalmente para aparelhos elétricos. Por isso, costuma-se utilizar o quilowatt como unidade de potência e a hora como unidade de tempo, obtendo-se o quilowatt-hora como a correspondente unidade de trabalho (ou energia). Como essa é uma unidade prática (não pertence ao SI), é preciso saber a sua relação com o joule que, como vimos, é a unidade de trabalho e energia desse sistema. Teremos então:

$$1{,}0\ \text{kWh} = 1{,}0\ \text{kW} \cdot 1{,}0\ \text{h} = 1.000\ \text{W} \cdot 3.600\ \text{s} = 3.600.000\ \text{W} \cdot \text{s} = 3.600.000\ \text{J}$$

Imagine se o nosso amigo Roberto, ao invés de subir escadas, resolvesse correr numa estrada horizontal, em linha reta, com velocidade constante. Será que ele iria consumir energia? Se a velocidade é constante, a energia cinética não varia. Como o trabalho é igual à variação da energia cinética, ele não realiza trabalho, logo não consome energia, certo? **Errado!**

Na realidade, como vimos, o trabalho da **força resultante** é igual à variação da energia cinética. Quando alguém corre com velocidade constante, em linha reta, a força resultante é nula, mas a pessoa faz força para frente, pelo atrito de seus pés com o solo. Realiza, portanto, um trabalho positivo. No entanto, essa força é equilibrada pela resistência do ar que realiza um trabalho negativo. Por essa razão, a energia cinética não varia – o trabalho da força que a pessoa realiza para correr é consumido integralmente pelo trabalho da resistência do ar.

Nesse caso particular, é fácil calcular o trabalho que a pessoa realiza e, conseqüentemente, a energia que ela consome, por intermédio da potência desenvolvida. Por definição, o trabalho da força exercida é $\tau_F = Fd \cos \alpha$. Como a força atua na direção e sentido do deslocamento $\alpha = 0^o$ e $\cos \alpha = 1{,}0$. Então o trabalho da força é apenas $\tau_F = Fd$.

Lembrando que a potência é $P = \frac{t}{Dt}$, temos:

$$P = \frac{F \times d}{Dt}$$

Mas $d/\Delta t$ é a velocidade v da pessoa, logo, a potência pode ser expressa por:

$$\boxed{P = F \cdot v}$$

É bom lembrar que essa expressão é válida para qualquer corpo, mas só quando a **velocidade é constante**, ou seja, quando ele tem movimento retilíneo uniforme.

Passo-a-passo

Um automóvel desenvolve uma potência de 80 cv quando em trajetória retilínea com velocidade constante de 108 km/h. Qual a intensidade da força de resistência do ar?

Como o movimento é retilíneo uniforme, a força de resistência do ar é igual à força exercida pelo automóvel. Além disso, vale a expressão da potência num MRU ($P = F \cdot v$) Para aplicá-la, basta transformar as unidades dadas em unidades do SI:

$$P = 80 \text{ cv} = 80 \cdot 735{,}5 = 58.840 \text{ W}$$
$$v = 108 \text{ km/h} = 30 \text{ m/s}$$

Então, temos:

$$P = F \cdot v \Rightarrow 58.840 = F \cdot 30 \Rightarrow F = 58.840 \# 30 = 1.961 \text{ N (aproximadamente)}$$

Rendimento

Sabemos que há carros que consomem menos combustível do que outros, ou que até o mesmo carro, quando regulado, pode consumir menos. Da mesma forma, uma lâmpada fluorescente ilumina mais que uma lâmpada comum, de mesma potência. Isso vale também para o organismo humano. Há pessoas que engordam, mesmo comendo pouco, e outras que comem muito e não engordam. Em outras palavras, há máquinas que aproveitam melhor o combustível que consomem. Dizemos que essas máquinas têm um **rendimento** maior. Define-se o rendimento (r) de uma máquina pela razão entre a **potência útil** (P_U), que ela fornece e a **potência total**, (P_t), que ela consome, ou seja:

$$\boxed{r = \frac{P_U}{P_T}}$$

Pode-se escrever essa mesma expressão na forma de porcentagem. Teremos então:

$$\boxed{r = \frac{P_U}{P_T} \times 100\%}$$

É fácil ver que, se uma máquina fosse perfeita, o que não existe, ela teria rendimento r = 1,0 ou r = 100%, porque a potência útil seria igual à potência total: ela aproveitaria tudo o que consome. Isso não acontece porque toda máquina gasta parte da energia que recebe para seu próprio funcionamento. Além disso, sempre há perdas. É impossível, por exemplo, eliminar completamente o atrito, que acaba se transformando em calor. E o calor gerado por atrito raramente é o objetivo de uma máquina. Ele é, em geral, um efeito indesejável, mas inevitável. Por essa razão, o rendimento de qualquer máquina será sempre um valor menor que 1,0 ou que 100%.

Passo-a-passo

Vamos voltar ao Exemplo 2. Suponha que o sistema mecânico daquele automóvel, naquela situação, tenha um rendimento de 0,25 ou 25% e que o tempo gasto para acelerar de 36 km/h para 108 km/h tenha sido de 10 s. Qual a potência total que ele consome, em cavalos-vapor?

Lembremos a resposta do segundo Passo-a-passo. O trabalho resultante sobre o carro é:

$$\tau_R = 320.000 \text{ J}$$

Que trabalho é esse? Sendo o trabalho resultante, é o **trabalho útil**, aquele que a gente aproveita. Dele pode-se calcular a **potência útil**, mas não a **potência total.** Como dissemos lá na resolução do Exemplo 2, o **trabalho total** que ele consome (que tira da energia fornecida pelo combustível) é certamente muito maior. Além do trabalho útil, ele esquenta, faz barulho, vence os atritos e a resistência do ar.

Vamos, então, calcular primeiro a potência útil. Como a potência é dada por $P = \tau/\Delta t$, a potência útil será calculada por essa expressão, desde que o trabalho, (τ), seja o trabalho útil. O trabalho útil, como comentamos é τ_R = 320.000 J e o intervalo de tempo é Δt = 10 s. Logo:

$$P_U = P_U = \frac{32.000 \text{ J}}{10 \text{ s}} = 3.200 \text{ W}$$

Como o rendimento r = 0,25, temos:

$$r = \frac{P_U}{P_T} \Rightarrow 0{,}25 = \frac{3.200 \text{ J}}{P_T} \Rightarrow P_T = \frac{3.200 \text{ J}}{0{,}25} \Rightarrow P_T = 12.800 \text{ W}$$

Para transformar esse valor em cavalos-vapor, basta dividir por 735,5 W, que equivale à potência de 1 cv. Temos, então:

$$P_T = 12.800 \,\#\, 735{,}5 = 17{,}4 \text{ cv (aproximadamente)}$$

Você pôde ver, nesta aula, que é possível calcular a energia de um corpo pelo trabalho que ele realiza. E que, para os físicos, só existe trabalho quando há força e deslocamento, portanto, o trabalho quase sempre cansa. Chegamos, também, a uma ligação muito importante que relaciona trabalho e energia cinética, $\tau = \Delta E_{C.}$ Vimos que a potência de uma máquina pode ser calculada pela razão entre o trabalho que ela realiza e o tempo gasto em realizá-lo. Que a potência útil é sempre menor que a potência total e a razão entre elas, sempre menor que a unidade, é o seu rendimento. Mas ainda ficamos devendo. Não sabemos como Maristela fez aquele cálculo que tirou o sono do nosso amigo Roberto. Mas estamos mais perto. Você lembra que ali o problema estava na altura que ele subia e no chocolate que comia. É preciso relacionar, então, trabalho com subida ou, falando mais bonito, deslocamento vertical. Esse, no entanto, é o assunto da próxima aula.

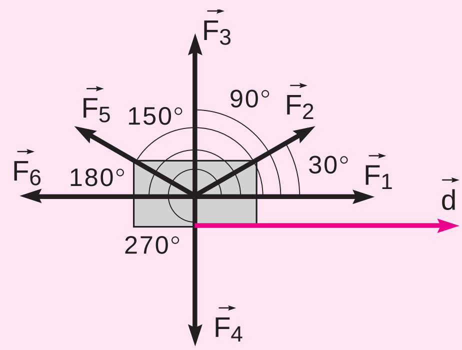
PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que é trabalho e como se acumula;
- o que é energia cinética;
- o que são potência e rendimento.

Exercício 1

No esquema da figura abaixo, supondo todas as forças iguais com valor de 100 N e o deslocamento (d) de 5 m, determine o trabalho de cada força.



Exercício 2

Um automóvel com massa de 1.200 kg tem velocidade de 144 km/h quando desacelerado e, depois de percorrer um certo trecho, está com velocidade de 36 km/h. Determine:

a) a sua energia cinética inicial ($E_{Cinicial}$);
b) a sua energia cinética final (E_{Cfinal});
c) o trabalho realizado sobre o automóvel;
d) se o automóvel percorreu 100 m nesse trecho, qual a intensidade da força resultante que atua sobre ele?

Exercício 3

Uma bala com 50 g de massa atinge uma parede a uma velocidade de 400 m/s e nela penetra, horizontalmente, 10 cm. Determine o valor médio da força de resistência exercida pela parede, para frear a bala.

Exercício 4

Suponha que um automóvel de massa 1.000 kg desenvolve uma potência de 60 cv, quando percorre uma trajetória retilínea com velocidade constante. Se a intensidade da resistência do ar que atua sobre o automóvel é de 1.471 N, qual a sua velocidade?

Exercício 5

Suponha que o conjunto mecânico de um automóvel tem um rendimento de 25%. Se o carro parte do repouso e atinge uma velocidade de 108 km/h em 10 s, qual é a potência total que ele consome, em cavalos-vapor?

AULA

15

Quanto mais alto o coqueiro, maior é o tombo

PARA COMEÇAR

"Quanto mais alto o coqueiro, maior é o tombo", "pra baixo todo santo ajuda, pra cima é um Deus nos acuda"...

Essas são frases conhecidas, ditos populares que expressam a mesma idéia: na subida há consumo de energia, na queda ou descida, a energia é fornecida ou devolvida. É por isso que o nosso amigo Roberto tinha esperanças de gastar a energia do chocolate subindo escadas. O que ele não imaginava é que o chocolate fosse capaz de fornecer tanta energia. Agora é a hora de saber como Maristela chegou à conclusão surpreendente de que Roberto poderia subir milhares de degraus, comendo uma barrinha de chocolate!

A primeira pergunta que se pode fazer é: por que subir é difícil e descer é fácil? Por que "todo santo ajuda"? A resposta está na **lei da gravitação universal**: a Terra nos atrai, puxa a gente para baixo. Na linguagem dos físicos, isso significa que a Terra exerce sobre cada corpo uma força proporcional à massa desse corpo, dirigida para baixo (para o centro da Terra).

Quando levantamos algum objeto, devemos fazer uma força no mínimo igual ao seu peso (no começo ela deve ser um pouquinho maior, é claro). Para baixar esse objeto, não é preciso fazer força alguma, basta largá-lo que a Terra se encarrega do serviço.

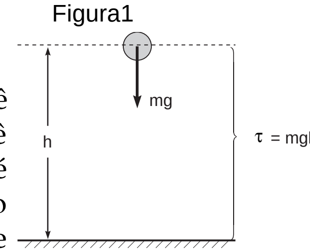
Em outras palavras: para levantar um corpo é preciso exercer uma força sobre ele, **realizar um trabalho**. Em compensação, esse trabalho não se perde. O corpo adquire uma **energia**. E essa energia fica armazenada no corpo porque ele pode, ao cair, devolver o trabalho que realizamos sobre ele. Mais ainda, a energia depende da posição, da altura em que ele está. É, portanto, uma **energia potencial**. E, como já vimos, sendo a origem dessa energia a atração gravitacional da Terra, ela é uma **energia potencial gravitacional**.

Estudaremos agora essa energia e vamos aprender, finalmente, como Maristela fez aquela conta maluca.

Energia potencial gravitacional

Fique ligado

Figura1



Suponha que um corpo de massa m estava no chão e você o levantou até uma altura h (ver a Figura 1). Que trabalho você realizou? Uma das maneiras de responder a essa pergunta é imaginar o que aconteceria se ele caísse livremente, sob a ação da gravidade. Para trazê-lo de volta ao chão a Terra deve realizar um trabalho igual ao que fizemos para colocá-lo lá em cima. Portanto, o trabalho que realizamos sobre o corpo é igual ao trabalho realizado pela Terra.

Lembre-se da a expressão do trabalho de uma força:

$$\tau_F = \mathbf{F \cdot d \cdot cos}\ \alpha$$

O trabalho realizado pela Terra será o trabalho da força que ela exerce sobre o corpo, isto é, o **peso do corpo** ($\vec{P}$). Então, o trabalho realizado pela Terra é o trabalho do peso do corpo (τ_P) ao longo de um deslocamento d = h, altura de queda. Como o peso atua na mesma direção e sentido do deslocamento, o ângulo α é zero. Aplicando-se a expressão do trabalho temos, então:

$$\tau_P = P \cdot h \cdot \cos \alpha = P \cdot h \cdot \cos 0 = P \cdot h \cdot 1,0 = P \cdot h$$

Mas, como P = mg, podemos escrever:

$$\tau_P = mgh$$

Se esse é o trabalho realizado pelo peso do corpo durante a queda, essa é a energia que ele tinha armazenado quando nós o levantamos até a altura h. Em outras palavras, essa é a sua energia potencial gravitacional, E_P. Portanto, a energia potencial gravitacional de um corpo de massa m, a uma altura h do solo, num lugar onde a aceleração da gravidade é g, pode ser definida pela expressão:

$$\boxed{E_P = mgh}$$

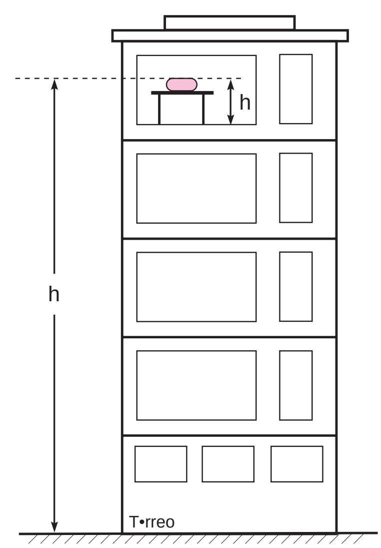


Figura 2

A unidade de energia potencial é a mesma de trabalho e energia cinética, o joule (J). Quanto ao valor de h, é importante notar que ele depende do referencial adotado. Suponha que o nosso amigo Roberto, que mora no 5º andar, queira calcular a energia potencial gravitacional de um pacote de açúcar em cima da mesa da cozinha do seu apartamento (ver a Figura 2).

Que valor de h ele deve usar? O da altura da mesa até o chão da cozinha ou da altura da mesa até o piso do andar térreo? A resposta é: **"depende do referencial adotado"**. Ele tanto pode calcular a energia potencial gravitacional em relação a um piso ou a outro. Em geral, essa escolha é feita em função do nosso interesse. Por exemplo, se quisermos saber com que velocidade o pacote atinge o solo, vamos utilizar o valor de h em relação ao chão da cozinha, já que o pacote não pode atravessá-lo. Se quisermos calcular a energia que podemos aproveitar de uma queda d'água, vamos utilizar como referência a altura onde vão ser colocadas as turbinas e assim por diante.

Uma conclusão mais importante ainda é que a altura h não depende da trajetória, mas apenas do **desnível entre os pontos inicial e final**. Observe a Figura 3: imagine que o trenzinho da figura seja solto a uma altura h do ponto mais baixo da sua trajetória. Pode-se mostrar que o trabalho realizado pela Terra sobre o trenzinho é, sempre, mgh, qualquer que seja a trajetória do trenzinho. Isso porque sempre é possível decompor qualquer trajetória em pequeninos trechos verticais e horizontais. Como nos horizontais a Terra não realiza trabalho, porque o peso é perpendicular ao deslocamento, sobram só os verticais, que somados, dão sempre o mesmo valor h (veja o destaque da Figura 3).

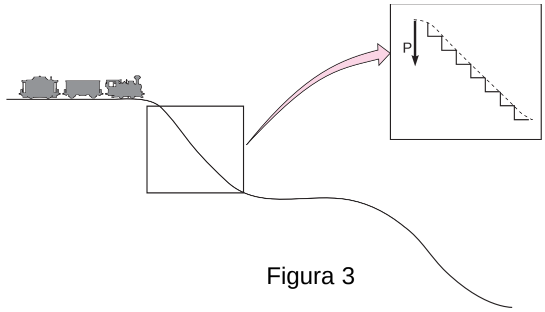


Figura 3

Passo-a-passo

Suponha que o pacote de açúcar que está sobre a mesa da cozinha do Roberto tenha 2 kg. Qual é a energia potencial gravitacional desse pacote em relação ao piso da cozinha e em relação ao piso do andar térreo?

Vamos admitir que a altura da mesa seja $h_c = 0{,}8$ m e que a altura do piso da cozinha ao piso do andar térreo seja 15 m. Portanto, a altura do pacote ao piso do andar térreo é $h_t = 15{,}8$ m. Então, a energia potencial gravitacional (E_{Pc}) do pacote em relação ao piso da cozinha é

$$E_{Pc} = m \cdot g \cdot h_c = 2 \cdot 10 \cdot 0{,}8 = 16\ \text{J}$$

Em relação ao piso do andar térreo, a energia potencial gravitacional (E_{Pt}) é

$$E_{Pt} = m \cdot g \cdot h_t = 2 \cdot 10 \cdot 15{,}8 = 316\ \text{J}$$

Passo-a-passo

Um sitiante pretende instalar um gerador elétrico para aproveitar a energia de uma queda d'água de 20 m de altura e vazão de 200 litros por segundo. Sabendo que cada litro de água tem massa de 1 kg e admitindo $g = 10\ \text{m/s}^2$, qual a potência máxima que ele pode obter dessa queda d'água?

Lembrando a definição de potência, $P = \tau/\Delta t$, para saber a potência máxima que pode ser aproveitada dessa queda d'água é preciso saber qual o trabalho (τ) que a água pode realizar sobre o gerador (movendo uma roda-d'água, por exemplo) localizado no ponto mais baixo da queda. Esse trabalho deve ser realizado num intervalo de tempo Δt. Como a água cai continuamente, vamos considerar um intervalo de tempo $\Delta t = 1{,}0$ s. Sendo de 200 litros por segundo a vazão da queda d'água e como 1,0 litro de água tem uma massa de 1,0 kg, pode-se concluir que, no intervalo de tempo considerado, cai sobre o gerador uma massa m = 200 kg de água. Por outro lado, o trabalho que essa água realiza sobre o gerador, no ponto mais baixo, é igual a sua energia potencial gravitacional no alto da queda d'água, quando h = 20 m. Portanto, podemos escrever:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{E_P}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t} = \frac{200 \cdot 10 \cdot 20}{1{,}0} = 40.000\ \text{W}$$

Essa é a potência máxima ou potência total que poderia ser obtida dessa queda d'água. Dizemos **máxima** porque não pode ser atingida, sendo que a potência útil é bem menor, pois ocorrem inúmeras perdas. A água perde energia na queda devido ao atrito com o ar e com a roda-d'água que ela deve fazer girar para acionar o gerador, que também tem perdas por atrito e aquecimento. Para saber o que de fato se aproveita, isto é, o valor da potência útil, é necessário conhecer o rendimento do sistema.

Nesse último Passo-a-passo, você pôde perceber que, à medida que a água cai, sua velocidade aumenta. Isso significa que, durante a queda, a água adquire energia cinética. Mais ainda: enquanto a água cai, essa energia cinética aumenta pois a velocidade também aumenta. Por outro lado, ao mesmo tempo, a altura vai diminuindo e, portanto, a energia potencial gravitacional também vai diminuindo. Será que não há uma compensação? O que se perde de uma forma de energia não se ganha de outra? Isso é verdade e é o assunto da nossa próxima aula.

Mas, antes de passar à outra aula, é hora de pagar a nossa dívida. Explicar aquela conta maluca da Maristela. Vamos ver como ela fez.

Em primeiro lugar, ela consultou numa tabela de alimentos as calorias que eles fornecem ao corpo humano. Lá está: 1,0 grama de chocolate fornece 4,7 quilocalorias (em algumas tabelas está escrito apenas "calorias", mas o correto é **quilocalorias**). Quilocaloria é uma unidade de energia muito usada em termodinâmica e vale, aproximadamente, 4.200 J. Portanto, 1,0 g de chocolate fornece 4,7 · 4.200 J. Isso dá 19.740 J. Como o Roberto disse que a barrinha de chocolate tinha "só" 100 gramas, a energia que ele consumia era de 100 · 19.740 J, ou seja, 1.974.000 J! Agora, é só calcular a que altura um corpo de 80 kg (que é a massa do Roberto) pode ser elevado com essa energia.

Em outras palavras, se o organismo do Roberto tem disponível uma energia de 1.974.000 J para subir, qual a altura que ele pode atingir carregando o seu próprio peso? Para fazer esse cálculo, basta aplicar a definição de energia potencial, admitindo-se que toda energia do chocolate seja transformada em energia potencial no corpo do Roberto, e calcular a altura h em que isso acontece. Teremos então:

$$\mathbf{E_P = mgh \Rightarrow 1.974.000 = 80 \cdot 10 \cdot h \Rightarrow h = 2.467{,}5\ m}$$

Em geral, os degraus das escadas têm 20 cm de altura (0,2 m) e os andares têm 3,0 m. Então, 2.467,5 m correspondem a 2.467,5 # 0,2 = 12.337,5 degraus e a 2.467,5 # 3,0 = 822,5 andares. Para subir apenas os 5 andares (15 m), a energia necessária seria:

$$\mathbf{E_P = mgh \Rightarrow E_P = 80 \cdot 10 \cdot 15 = 12.000\ J}$$

Como 1,0 g de chocolate fornece 19.740 J, bastariam 12.000 # 19740 = 0,6 g de chocolate, aproximadamente para subir até sua casa. Esses resultados são tão fantásticos porque o organismo humano é, de fato, uma máquina fantástica. Além disso, estamos supondo que toda a energia do chocolate foi usada pelo organismo para fazer o Roberto subir, o que não é verdade. O valor real, certamente, é menor, mas uma conclusão é, infelizmente, inevitável: a única forma eficiente de emagrecer é não comer muito chocolate!

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o conceito de energia potencial e como calculá-la;
- como calcular a potência fornecida por uma queda d'água.
- alguns exemplos de transformação de energia.

Exercício 1

Suponha que um pacote de açúcar com massa de 5 kg está sobre o armário da cozinha de sua casa. O armário tem 1,8 m e você mora no 10º andar de um prédio em que o piso do seu andar está a 30 m do solo. Qual a energia potencial gravitacional desse pacote em relação ao piso da cozinha e em relação ao piso do andar térreo?

Exercício 2

Um sitiante pretende instalar um gerador elétrico para aproveitar a energia de uma queda d'água de 12 m de altura e vazão de 60 litros por segundo. Sabendo que cada litro de água tem massa de 1 kg e admitindo $g = 10\ m/s^2$, qual é a potência máxima que ele poderá obter dessa queda d'água?

Exercício 3

Suponha que o nosso amigo Roberto substitui o chocolate por um suco com 100 gramas de beterraba e cenoura, sem açúcar. Sabendo que 1,0 grama desses saudáveis e saborosos vegetais tem 400 calorias, calcule a altura que ele seria capaz de subir se toda energia desses alimentos fosse aproveitada para isso. Admita que $g = 10\ m/s^2$, que 1 caloria vale 4,2J e lembre-se de que a massa do Roberto é de 80 kg.

AULA

16

Conservação, o “x” da questão!

PARA COMEÇAR

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) optou pelo estudo da Química. Em 1789, publicou o *Tratado elementar de químicas*, onde aparece sua famosa **lei da conservação das massas**.

Quando exigimos das pessoas que moram em nossa casa que apaguem a luz ao sair de um aposento, não deixem a televisão ligada à noite enquanto dormem, fechem bem a torneira para que não fique pingando, ou, ainda, abaixem a chama do gás quando a água ferveu, estamos demonstrando preocupação com o desperdício!

Desperdício significa que algo útil foi jogado fora sem ter sido aproveitado – foi **desperdiçado**.

A água da torneira que pinga vai embora pelo ralo e a gente nem percebe. E uma água nova entra na caixa d'água, em substiuição àquela que foi desperdiçada!

Agora pare e pense em quantas vezes você já ouviu alguém dizendo esta frase, bastante conhecida:

“Nada se perde, tudo se transforma.”

Essa frase é de Lavoisier, um famoso cientista francês do século 18. Podemos entender esta frase, por exemplo, quando colocamos água numa panela e a aquecemos, podemos ver que a água vai evaporando e o seu nível na panela vai diminuindo. Isso não significa que a água é **perdida**, mas que está se **transformando** em vapor d'água!

E a água que escorre pelo ralo, também se transforma?

Podemos pensar em termos de **utilidade**, isto é, a água que estava na caixa-d'água era útil, mas, depois que se foi pelo ralo, perdeu sua utilidade. Se quisermos utilizar novamente a água que se foi, teremos que pagar à companhia de água e esgoto, para que trate mais água e que esta seja enviada pelo encanamento até a nossa caixa-d'água! Ou seja, **haverá um custo na reutilização da água que já foi utilizada.**

No nosso dia-a-dia, usamos muito a expressão “desperdício de energia”, que se refere ao desperdício dos vários tipos de energia, como, por exemplo:

- Energia térmica: quando deixamos uma geladeira aberta, haverá um custo para que seu interior se esfrie novamente.
- Energia elétrica: banhos de chuveiro elétrico demorados geram enorme consumo de eletricidade, que também terá um custo.
- Energia química: carros mal regulados consomem mais do que o normal, aumentando assim o gasto de combustível.

Todas essas transformações, cuja energia não pode ser reaproveitada, são chamadas de **transformações irreversíveis**.

Ou seja, é impossível pegar o frio que sai da geladeira enquanto a porta está aberta e colocá-lo de volta dentro da geladeira. É impossível pegar a eletricidade que foi usada no chuveiro elétrico e colocá-la de volta no fio. É impossível usar o gás que saiu do escapamento de um automóvel, para encher novamente o tanque de gasolina!

A maioria das transformações de energia são do tipo **irreversível**.

Isso significa que a energia útil se transformou num outro tipo de energia e não pode ser reutilizada.

Uma pequena parte das transformações são do tipo **reversível**, ou seja, a energia pode ser transformada em outra forma de energia e depois voltar a ser o que era.

Um sistema que tem essa propriedade é chamado de **sistema conservativo**.

Nesta aula, estudaremos uma forma de energia, a **energia mecânica**, tanto em sistemas conservativos como em sistemas não-conservativos, também chamados dissipativos.

Conservação da energia mecânica

Para compreender a energia mecânica, precisamos antes saber o que são energia cinética e energia potencial. Esses dois tipos de energia já foram definidos nas aulas passadas, mas vamos fazer uma pequena recordação.

Energia cinética é a energia associada ao movimento de um corpo. A energia cinética de um corpo de massa m e com velocidade v, é dada pela expressão:

$$\boxed{E_{cinética} \Rightarrow E_c = \frac{1}{2}mv^2}$$

ou seja, quanto maior for a velocidade ou a massa do corpo, maior será a sua energia cinética.

Energia potencial é a medida do trabalho que a força-peso **pode** fazer sobre um corpo, ou seja, no caso da energia potencial gravitacional, quanto mais alto estiver o corpo, maior será sua capacidade de realizar trabalho. Por exemplo, um bate-estaca consegue realizar melhor o "trabalho" de enfiar a estaca no solo, quanto maior for a altura da qual ele é solto. A energia potencial gravitacional tem a seguinte expressão:

$$\boxed{E_{potencial\ gravitacional} \Rightarrow E_p = mhg}$$

ou seja, quanto maior a massa do corpo ou sua altura em relação ao solo, maior será sua energia potencial gravitacional.

Energia mecânica

Vamos recordar a aula sobre queda livre (Aula 5), onde estudamos o caso do tiro para cima (Figura 1). Agora, vamos analisar esse problema usando o conceito de energia.

No exemplo do tiro para cima vimos que a bala, ao sair do revólver, vai ganhando altura e perdendo velocidade. Quando chega ao ponto mais alto, sua velocidade é zero. Então, ela volta (no sentido contrário ao da subida), perdendo altura e ganhando velocidade, até chegar ao ponto de onde saiu com a mesma velocidade da partida, mas no sentido oposto.

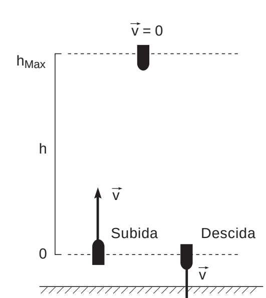


Figura 1

O que acontece com a energia da bala?

Lembre-se de que estamos considerando nula a força de resistência do ar. A bala parte com uma grande velocidade, ou seja com uma energia cinética grande. Sua velocidade vai diminuindo, à medida que sobe e sua energia cinética também diminui. Quando chega no ponto mais alto, sua velocidade é zero, portanto, sua energia cinética também é zero. Quando a bala começa a voltar, sua velocidade aumenta e sua energia cinética também. Finalmente, de volta ao ponto de lançamento, sua velocidade tem o mesmo valor da velocidade de lançamento, mas o sentido contrário. Isso significa que sua energia cinética é **igual** à do momento do lançamento.

Em compensação, podemos pensar, desprezando a altura da pessoa que dá o tiro, que ela sai de uma altura zero, isto é, sai com uma energia potencial gravitacional nula, e vai ganhando altura, aumentando, assim sua energia potencial, até chegar à altura máxima, onde sua energia potencial é máxima. Finalmente ao voltar para a altura da qual partiu, sua energia potencial é novamente zero. Se fizermos um gráfico das energias envolvidas, vamos obter o gráfico da Figura 2:

O que acontece com a energia cinética à medida que a bala vai perdendo velocidade? Ela vai diminuindo. Mas, se quando a bala volta ela recupera sua energia cinética, onde ela ficou armazenada?

Na verdade o que ocorreu foi uma transformação de energia: toda energia cinética se transformou em potencial. E, ao voltar, a energia potencial se transformou em cinética. Trata-se, portanto, de um **sistema conservativo**.

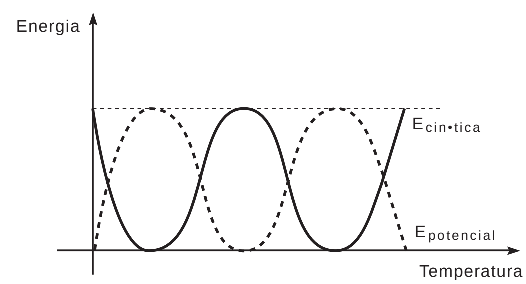


Figura 2

Mas como foi feita essa transformação?

A variação da energia cinética foi igual à variação da energia potencial. Ou seja, à medida que a energia cinética **diminuía** uma certa quantidade, a energia potencial aumentava a mesma quantidade. Podemos escrever essa transformação numa forma matemática:

$$\boxed{\Delta E_c = -\Delta E_p}$$

isto é, $E_{C\ final} - E_{C\ inicial} = -(E_{P\ final} - E_{P\ inicial})$

É possível calcular a energia cinética e a energia potencial da bala? Sim, mas temos que calcular em pontos específicos, que tomaremos como **inicial** e **final**. Por exemplo, se quisermos calcular a altura máxima da bala temos que calcular as energias no início e no fim da subida.

Por exemplo, uma bala de revólver pesa aproximadamente 10 gramas, ou seja, 0,01 kg. Como vimos, a velocidade com que uma bala sai do cano do revólver é de aproximadamente 200 m/s. Assim, podemos calcular a energia cinética no momento do lançamento ($E_{C\ inicial}$):

$$E_{C\ inicial} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}01\ (200)^2 = \frac{1 \cdot 0{,}01 \cdot 40.000}{2}$$

$$\boxed{E_{C\ i} = 200 \text{ Joules}}$$

$$E_{P\ inicial} = mgh = 0{,}01 \cdot 10 \cdot 0 = 0 \text{ Joules} \qquad \boxed{E_{P\ inicial} = 0} \text{J}$$

No ponto mais alto, que será nosso ponto final, a velocidade (v_{final}) é nula, e a altura é máxima (h_{max}), portanto,

$$E_{C\ final} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}01\ (0)^2 \qquad \boxed{E_{C\ final} = 0 \text{ Joules}}$$

$$E_{p\ final} = mgh = 0{,}01 \cdot 10 \cdot h_{max} \qquad \boxed{E_{P\ final} = 0{,}1 \cdot h_{max}}$$

Como não sabemos o valor da altura máxima, temos que usar a equação que expressa a transformação da energia:

$$E_{c\ final} - E_{c\ inicial} = - E_{p\ final} + E_{p\ inicial}$$
$$0 - 200 = - 0{,}1 \cdot h_{max} + 0$$

Com isso podemos concluir que

$$\boxed{h_{max} = 2.000 \text{ m}}$$

A lei de conservação da energia mecânica

Vimos que a energia cinética se transforma em potencial e vice-versa, mas não vimos ainda o que se conserva. Se usarmos a equação de transformação, veremos o que irá se conservar em todo esse processo:

$$E_{c\ final} - E_{c\ inicial} = - E_{p\ inicial} + E_{p\ inicial}$$

Passamos tudo o que é inicial para um lado da equação e tudo o que é final para o outro lado, obtemos:

$$E_{c\ final} - E_{p\ inicial} = - E_{c\ inicial} + E_{p\ inicial}$$

Vemos então que **a soma da energia cinética com a energia potencial no inicio é igual à soma dessas energias no fim.** Isso significa que **essas duas quantidades somadas dão um valor constante.**

A essa quantidade constante damos o nome de **energia mecânica** ($E_{mecânica}$).

$$\boxed{E_{mecânica}\ \text{Þ}\ E_m = E_c + E_p}$$

Mas cuidado! **A energia mecânica é constante apenas nos sistemas conservativos**. Nesse caso, podemos escrever:

$$E_{c\ final} - E_{p\ final} = - E_{c\ inicial} + E_{p\ inicial}$$
$$E_{m\ final} = E_{m\ inicial}$$
$$E_{m\ final} - E_{m\ inicial} = 0$$

Portanto: $$\boxed{\Delta E_m = 0}$$

Essa equação expressa a conservação da energia mecânica, isto é, significa que, **nos sistemas conservativos, a variação da energia mecânica é zero!**

Sistemas dissipativos

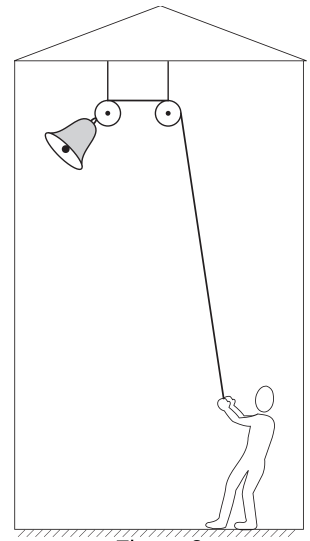


Figura 3

No nosso dia-a-dia, não vemos com freqüência sistemas conservativos. Muito pelo contrário, a grande maioria dos sistemas é dissipativa.

Por exemplo, para que o sino no alto de uma igreja continue tocando, é preciso que alguém puxe continuamente a corda para balançá-lo. Caso contrário, ele irá diminuindo seu movimento até parar definitivamente o balanço.

Por que será que o sino pára de balançar?

Sabe-se que o sino pára de tocar porque existe atrito (lembre-se da Aula 10), isto é, existe uma força externa que faz com que ele pare. Se não houvesse a força de atrito, o sino continuaria tocando indefinidamente. Bastaria realizar o trabalho de levantar o sino uma vez, para um dos lados, e soltá-lo.

Nesse caso, o trabalho de levantar o sino se transformou em energia potencial. Quando o sino é solto, essa energia potencial começa a se transformar em energia cinética, até que o sino tenha altura zero e velocidade máxima, ou seja, energia potencial igual a zero e energia cinética máxima. Em seguida, ele começa novamente a subir, perdendo velocidade e ganhando altura, até chegar do outro lado na mesma altura da qual saiu, e assim o processo continuaria, e o sino tocaria sem parar.

Mas, na realidade, o que ocorre é que o sino vai parando. Ele é solto de uma certa altura, mas chega ao outro lado com uma altura menor e, quando volta, atinge uma altura menor ainda. E assim por diante, até que não varia mais de altura, isto é, ele fica parado no ponto mais baixo possível.

Se fizermos um gráfico da energia potencial e da energia cinética do sino em função do tempo, teremos a Figura 5:

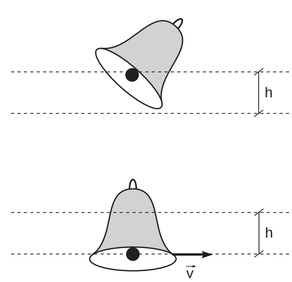


Figura 4. Em seu movimento, o sino atinge alturas diferentes.

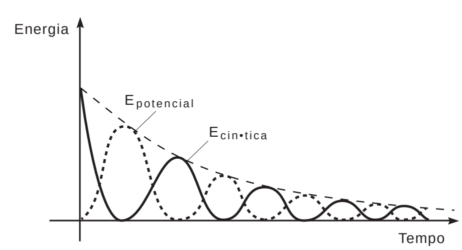


Figura 5. O amortecimento da energia potencial e cinética num sistema dissipativo.

Como podemos ver pelo gráfico, as duas energias vão diminuindo até chegar a zero. Ou seja, a energia mecânica não se conserva: a soma da energia potencial e cinética do corpo diminui até chegar a zero.

Para onde foi a energia mecânica? A única novidade nesse exemplo é a força de atrito, **o que significa que ela é a responsável pela dissipação da energia mecânica**.

O que o atrito fez com o sino? Sempre que quisermos parar um corpo que está em movimento, teremos que exercer uma força sobre esse corpo, até que ele fique em repouso. Ou seja, temos que realizar um trabalho para retirar a energia cinética do corpo. E isso é exatamente o que o atrito faz: ele realiza o trabalho de parar o sino, ou seja, ele retira toda a energia mecânica do corpo.

No que se transformou a energia mecânica do sino? Certamente você já fez a experiência de, quando está com frio, esfregar as mãos para aquecê-las. É exatamente isso que o atrito faz: **ele gera calor.** E calor é uma forma de energia chamada de **energia térmica**. Portanto, a energia mecânica do corpo se transformou em energia térmica.

Podemos, então, expressar a conservação da energia mecânica, nos sistemas dissipativos, como:

$$\boxed{\Delta E_m = \tau_{\text{força de atrito}}}$$

O atrito também é capaz de gerar outras formas de energia como, por exemplo, energia sonora. Quando arrastamos uma cadeira pelo chão, ela faz barulho. Ao ser empurrada, a cadeira ganha energia cinética que, devido ao atrito, transforma-se parte em energia térmica e, parte, em energia sonora.

Infelizmente, esses são processos irreversíveis, ou seja, não é possível reutilizar essas energias: elas estarão perdidas para sempre.

Um outro exemplo mais complexo é o de um automóvel: toda sua energia está armazenada no combustível, na forma de energia química.

Para onde vai toda energia do combustível? Ao ser ligado, o motor do carro fica muito quente, assim como os pneus. O motor também faz barulho. Todas essas manifestações são formas de dissipação de energia, por isso, apenas uma parcela da energia contida no combustível é utilizada para movimentar o carro, isto é, transformada em energia cinética. De modo geral, trata-se de uma máquina muito ineficiente.

Observação: A força de atrito é sempre contrária ao movimento. Isso significa que, se o corpo se desloca, a força de atrito será um vetor de sentido oposto ao vetor deslocamento. Quando calculamos o trabalho da força de atrito, obtemos um trabalho negativo. E o sinal negativo significa que a força de atrito está retirando energia mecânica do corpo, durante o trajeto.

PARA TERMINAR

Nesta aula vimos que:

- a energia se transforma;
- existem dois tipos de sistemas: os **conservativos** e os **dissipativos**;
- a energia mecânica é **a soma** da energia cinética mais a energia potencial;
- nos sistemas **conservativos**, a **energia mecânica se conserva** e tem a seguinte expressão:

$$\boxed{\Delta E_m = 0}$$

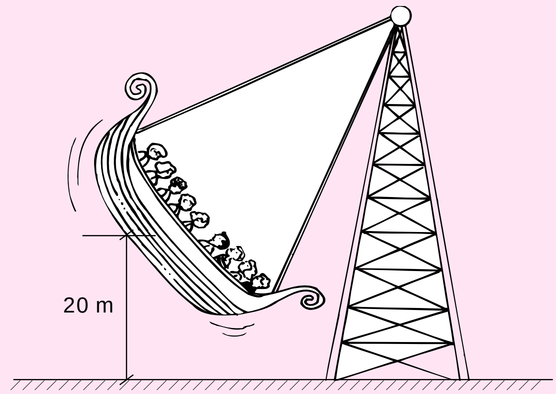
- nos sistemas **dissipativos**, a **energia mecânica não se conserva** e o atrito realiza o trabalho de transformar a energia mecânica em energia térmica ou sonora. E a expressão da conservação da energia se torna:

$$\boxed{\Delta E_m = \tau_{\text{força de atrito}}}$$

- é fundamental perceber quando se está **desperdiçando** energia, pois haverá um custo para gerar mais energia.

Exercício 1

Em alguns parques de diversão, existe um brinquedo que se chama Barco Viking. Esse brinquedo consiste num grande barco, no qual as pessoas entram, que balança de um lado para o outro, como um pêndulo gigante, (figura ao lado). O barco alcança alturas de aproximadamente 20 metros, tanto de um lado como do outro. Como a quantidade de graxa no eixo de oscilação é muito grande, podemos considerar o atrito desprezível. Qual será a velocidade do barco quando ele passar pelo ponto mais baixo da sua trajetória?



Exercício 2

Numa pequena obra um pedreiro do solo joga tijolos para outro que está no segundo andar, que fica a 3 metros do chão. Qual a menor velocidade com que o pedreiro que está no chão deve lançar cada tijolo para este chegar às mãos do outro pedreiro com velocidade zero?

Exercício 3

Existe uma outra forma de energia potencial chamada **energia potencial elástica**. Essa energia normalmente é encontrada em sistemas que utilizam molas ou elásticos. Um exemplo que vemos nas lutas livres: os lutadores normalmente se utilizam das cordas elásticas para tomar impulso, ou seja, jogam-se contra as cordas e são arremessados com a mesma velocidade sobre o adversário. Sua energia cinética vai diminuindo à medida que a corda elástica vai esticando. Quando a corda está totalmente esticada, a velocidade do lutador é zero, ou seja, toda sua energia cinética se transformou em energia potencial elástica. Finalmente, a corda devolve a energia cinética para o lutador, que é arremessado sobre o outro. Supondo que o lutador tenha uma massa de 100 kg e se jogue nas cordas com uma velocidade de 5 m/s, calcule a energia potencial elástica armazenada na corda quando ela está totalmente esticada.

Exercício 4

Quando uma criança desce por um escorregador, parte da sua energia mecânica se perde devido à força de atrito. Supondo que 600 joules se perdem com o trabalho da força de atrito, que a massa da criança seja 50 kg e que o escorregador tenha uma altura de 2 metros, qual será a velocidade com que ela chega ao solo?

Exercício 5

Resolva o Exercício 4, desprezando o trabalho da força de atrito.

AULA 17

O momento do gol

PARA COMEÇAR

Falta 1 minuto para terminar o jogo. Final de campeonato! O jogador entra na área adversária driblando, e fica de frente para o gol. A torcida entra em delírio gritando “Chuta! Chuta! Chuta!”

Mas, em vez de chutar, o jogador fica “ciscando” dentro da área, pra lá e pra cá, até que um adversário lhe dá um tranco e pronto: ele desaba feito uma jaca madura!

A torcida entra em desespero: “Pênalti! Pênalti! Pênalti!” O juiz, que estava perto do lance, apita com convicção e corre para a marca fatal.

Confusão, empurra-empurra, choradeira, todos falando com o indicador pra cima; alguém joga a bola longe, alguém vai buscar... Mas não tem jeito. Apitou, tá apitado.

Bola parada. Jogador e goleiro frente a frente. Tudo pronto.

O que o jogador precisa fazer para marcar o gol?

Parece muito fácil marcar um gol de pênalti, mas na verdade o espaço que a bola tem para entrar é pequeno. Observe na Figura 1:

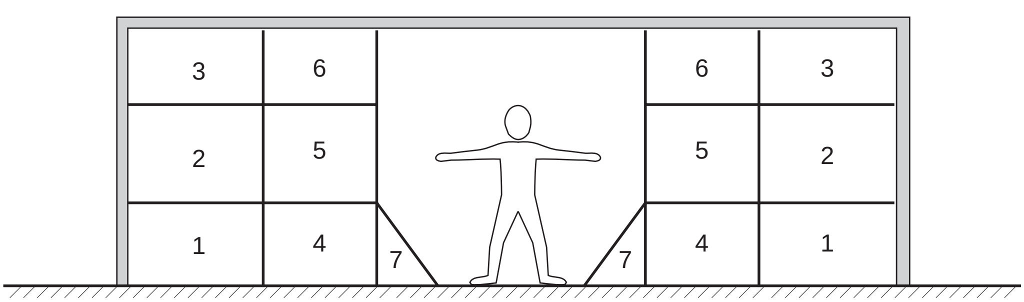


Figura 1. As regiões do gol por onde é mais fácil a bola passar.

Esse problema se parece com o de colocar uma bola de bilhar dentro da caçapa: um desvio na direção da tacada pode fazer com que erremos a caçapa. Sabemos que não basta força para chutar a bola: é preciso chutá-la na **direção** correta, para que a bola vá exatamente no lugar que queremos.

O chute tem que ser preciso, porque o tempo em que o pé do jogador fica em contato com a bola é muito pequeno e não há possibilidade de corrigir a direção da bola depois do chute.

Fique ligado

Impulso

Quando uma força é aplicada sobre um corpo durante um período de tempo muito curto, dizemos que esse corpo recebe um **impulso**.

Assim, quando chutamos uma bola de futebol, ou damos uma tacada numa bola de bilhar, ou mesmo quando empurramos um jogador, estamos dando a eles um **impulso**. Podemos então definir impulso da seguinte maneira:

Impulso é uma força aplicada durante um período de tempo muito curto.

Observe o gráfico abaixo que mostra a força aplicada a uma bola de futebol, durante um chute:

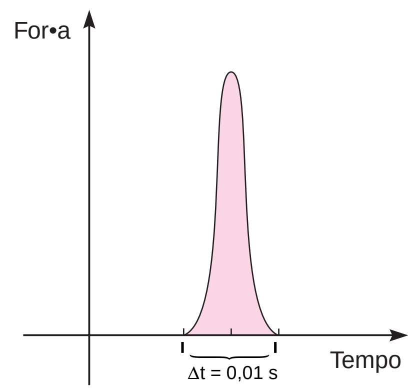


Figura 2

Podemos escrever essa definição de forma matemática **e dizer a mesma coisa:**

$$\boxed{\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t}$$

onde a unidade de impulso é o newton-segundo ($N \cdot s$).

Lembre-se de que para acertar a bola não basta aplicar uma força grande ou pequena, mas é preciso dar ela **a direção correta**.

É exatamente por isso que definimos **impulso** como um **vetor**.

A **intensidade do impulso** é determinada pela intensidade da força, multiplicada pelo intervalo de tempo no qual ela está sendo aplicada. E a **direção** e o **sentido** do impulso serão exatamente os mesmos que a direção e o sentido da força. Por isso, é necessário aplicar a força na direção correta para fazer o gol.


Figura 3

Quantidade de movimento

O que acontece com um corpo, quando lhe damos um impulso?

Se um corpo está parado e lhe damos um impulso ele irá se movimentar, ou seja, sua velocidade vai mudar de zero para algum outro valor. Por exemplo, a bola do pênalti: ela está parada, mas, depois de receber um impulso dado pelo chute do jogador, ela se deslocará, ou seja, **sua velocidade irá variar**.

Já sabemos, pela Segunda Lei de Newton que quando uma força é aplicada sobre um corpo, ele adquire uma aceleração, ou seja, sua velocidade varia. Mas o que estamos fazendo aqui é aplicando uma força e levando em conta o período de tempo durante o qual essa força foi aplicada, o que caracteriza o **impulso**.

Se a bola for muito pesada, será mais difícil fazê-la se mover, isto é, modificar sua velocidade. Se a bola for leve, será mais fácil alterar sua velocidade, ou seu estado de movimento. Isso significa que é mais fácil dar um impulso numa bola com uma massa pequena do que numa com a massa grande. Assim, dois fatores contribuem para descrever o estado de movimento de um corpo: a **massa** e a **velocidade.**

Quando dizemos **estado de movimento**, queremos dizer que o corpo tem uma certa **quantidade de movimento**, que é uma grandeza que pode ser medida. Também dizemos que, se um corpo tem pouca quantidade de movimento, é fácil pará-lo; mas, se tem muita quantidade de movimento, é difícil fazê-lo parar.

Passo-a-passo

Se um ônibus vem com uma velocidade pequena de 0,2 m/s, mas sua massa é muito grande, 4.000 kg, não é fácil pará-lo. Se um ciclista vem com sua bicicleta, onde a somas das suas massas é 80 kg, com uma velocidade de 10 m/s, também não vai ser fácil pará-lo.

Podemos definir uma equação matemática que descreve a quantidade do movimento:

$$\boxed{\vec{q} = m \cdot \vec{v}}$$

Sua unidade, no sistema Internacional (SI) será o **kg · m/s.**

Sabemos que a **velocidade** é uma **grandeza vetorial**, por isso, a **quantidade de movimento** também é uma grandeza vetorial.

Como os dois estão andando em linha reta, podemos, com a expressão acima, calcular o módulo da quantidade de movimento do ônibus e do ciclista:

$$q_{\text{ônibus}} = 4.000 \times 0,2 = 800 \frac{kg \times m}{s}$$

$$q_{\text{ciclista}} = 80 \times 10 = 800 \frac{kg \times m}{s}$$

ou seja, os dois têm a mesma quantidade de movimento, apesar de serem corpos completamente distintos. Podemos então concluir que:

Quando um impulso é dado a um corpo, ele altera sua quantidade de movimento, pois altera sua velocidade.

Chuta a bola!

Finalmente, nosso jogador vai chutar. Tudo preparado, bola parada, goleiro imóvel, esperando o momento em que o jogador vai dar o impulso na bola.

Quando chutar a bola, o jogador estará aplicando uma força sobre ela, que pode ser escrita como:

$$\boxed{\vec{F} = m_{bola} \times \vec{a}}$$

Sabemos que a bola vai ser acelerada por alguns instantes, isto é, sua velocidade vai variar. Usamos a definição de aceleração:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

e substituindo na expressão da força, assim obtemos:

$$\vec{F} = m \times \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

que pode ser escrito de outra forma:

$$\vec{F} \times \Delta t = m \times \Delta \vec{v}$$

O produto da força pelo intervalo de tempo, é o impulso dado à bola. O símbolo Δt, representa a diferença entre dois instantes de tempo, o **inicial** e o **final**. Nesse caso, Δv é a **diferença** da velocidade no intervalo de tempo isto é; a velocidade depois do chute menos a velocidade antes do chute. Podemos então escrever:

$$\vec{F} \times \Delta t = m \times (\vec{v}_{depois} - \vec{v}_{antes})$$
$$\vec{F} \times \Delta t = m \times \vec{v}_{depois} - m \times \vec{v}_{antes}$$

Usando as definições de impulso e de quantidade de movimento:

$$\vec{I} = \vec{q}_{antes} - \vec{q}_{depois}$$

Podemos então escrever que:

$$\boxed{\vec{I} = \Delta \vec{q}}$$

Essa relação entre o impulso e a quantidade de movimento é bastante reveladora, pois mostra exatamente o que estávamos pensando:

Quando um corpo recebe um impulso, sua quantidade de movimento varia!

Passo-a-passo

"Chuta forte!", gritava a torcida.

Nosso jogador está pronto para chutar a bola.

Será que dá para calcular o intervalo de tempo em que o pé do jogador fica em contato com a bola?

Podemos fazer uma avaliação: uma bola de futebol pesa em torno de 400 gramas, ou 0,4 kg, e a força que o jogador exerce quando chuta a bola é, em média, de 2.000 N. A bola, que estava parada, após o chute parte com uma velocidade de 50 m/s, aproximadamente.

O impulso varia a quantidade de movimento da bola. Como a bola vai se deslocar na mesma direção em que for dado o chute, podemos usar apenas o módulo do impulso e da quantidade de movimento:

$$I = \Delta q = m \times v_{final} - m \times v_{inicial}$$

Pela definição de impulso, podemos escrever:

$$I = F \cdot \Delta t = m \times v_{final} - m \times v_{inicial}$$

Substituindo os valores conhecidos, temos:

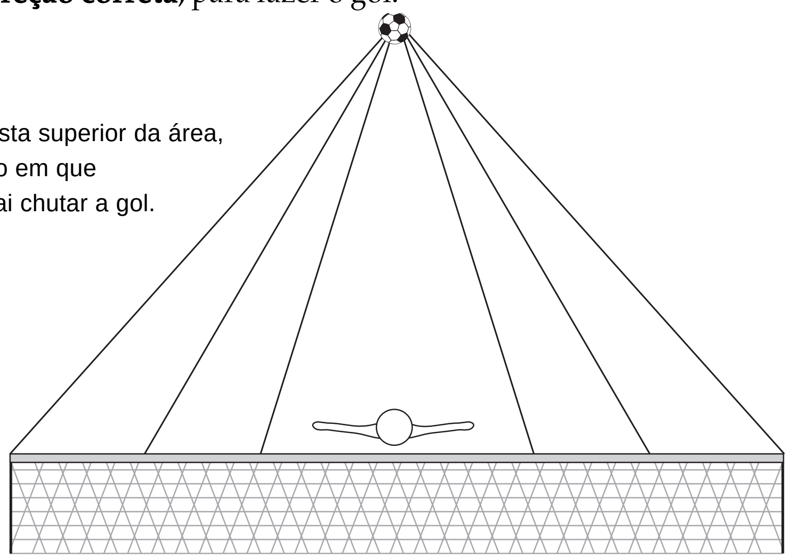
$$2.000 \cdot \Delta t = 0{,}4 \cdot 50 - 0{,}4 \cdot 0$$

Assim:

$$\Delta t = \frac{20}{2.000} = 0{,}01 \text{ s}$$

Isto é, o pé do jogador fica em contato com a bola por apenas 1 centésimo de segundo. Mas o problema ainda não está resolvido. O jogador tem de chutar a bola na **direção correta**, para fazer o gol:

Figura 4. Vista superior da área, no momento em que o jogador vai chutar a gol.



Nosso jogador mira, concentra-se, toma impulso e chuta com fé!

Vetor variação da quantidade de movimento ou vetor impulso

A bola parte com uma velocidade aproximada de 50 m/s em direção ao canto direito do gol; o goleiro, pula para o canto esquerdo do gol; a torcida já comemorava quando, na frente da bola, surgiu a trave.

"Na trave!" grita o locutor.

Vamos entender o que houve. Como podemos ver na Figura 5, a bola tomou a direção da trave e voltou exatamente pelo mesmo caminho. Supondo que a bola manteve sua velocidade de 50 m/s, ela bateu na trave e voltou com a mesma velocidade.

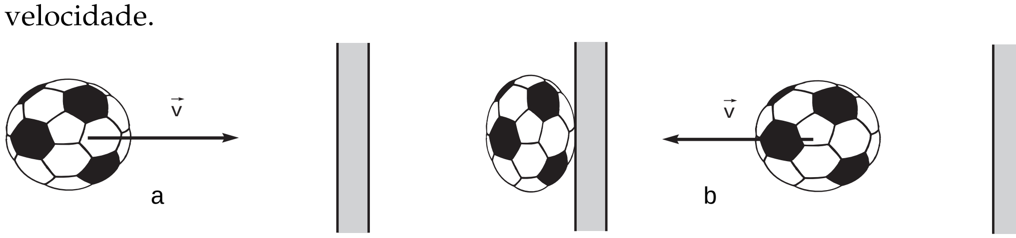


Figura 5. A bola em sua trajetória (a) rumo à trave e (b) na volta.

Podemos calcular a variação da quantidade de movimento da bola? Sim. Para isso precisamos lembrar que a quantidade de movimento é um vetor, bem como sua variação.

A Figura 6 mostra o diagrama de vetores da quantidade de movimento. Para calcular a variação da quantidade de movimento é preciso subtrair o vetor $\vec{q}_{final}$ do vetor $\vec{q}_{inicial}$

Figura 6

Para subtrair graficamente dois vetores, basta mudar o sentido do vetor que está subtraindo (Figura 7), ou seja:

Figura 7

$$\Delta \vec{q} = \vec{q}_f - \vec{q}_i$$
$$-\vec{q}_{inicial} = (-1)\,\vec{q}_{\textbf{inicial}}$$

Isso significa que multiplicar um vetor por um número negativo é o mesmo que inverter o seu sentido.

Então o módulo da variação a quantidade de movimento será:

$$\Delta q = q_{final} - (-q_{inicial}) = q_{final} + q_{inicial} = mv_{final} + mv_{inicial}$$
$$\Delta q = 0{,}4 \cdot 50 + 0{,}4 \cdot 50$$
$$\Delta q = 40 \text{ Ns}$$

Esse é o impulso que a bola recebeu no choque com a trave.

$$I = \Delta q = 40 \text{ Ns}$$

Qual terá sido a força que a trave fez na bola, sabendo que o tempo de contato entre a bola e a trave foi de aproximadamente 0,01 s?

Se o impulso dado pela trave foi 40 Ns, podemos escrever pela definição que:

$$I = F \cdot \Delta q = 40 \text{ Ns}$$

Podemos então calcular a força da trave sobre a bola:

$$F = \frac{40}{\Delta t} = \frac{40}{0{,}01} = 4.000 \text{ N}$$

Isso equivale a sofrer uma pancada de uma massa de 400 kg. "Pobre bola"!

Vamos voltar aos momentos finais desse dramático pênalti.

Nosso jogador, apesar de estar chocado com a bola na trave, rapidamente se recompôs e, percebendo que a bola voltava na sua direção, preparou-se para dar novamente um poderoso chute e dessa vez não teve perdão, mandou uma bomba para dentro do gol!

A torcida, antes desesperada, passou a comemorar, naquele último minuto. Em campo, os jogadores pulavam como crianças, agradecendo ao "milagre" de a trave ter dado um impulso na bola exatamente na direção por onde ela tinha vindo, até onde estava o nosso jogador...

PARA TERMINAR

Nesta aula, aprendemos dois conceitos:

- o impulso de uma força $\vec{I} = \vec{F} \times \Delta t$, que expressa a ação de uma força num intervalo de tempo muito curto;
- quantidade de movimento $\vec{q} = m\vec{v}$, e obtivemos a relação entre essas duas grandezas, dada pela equação

$$\boxed{\vec{I} = \Delta \vec{q}}$$

- aprendemos, também, que essas grandezas são descritas por vetores, ou seja, que têm módulo, direção e sentido.

Exercício 1

Um jogador de bilhar dá uma tacada na bola branca, numa direção paralela ao plano da mesa. A bola sai com uma velocidade de 4 m/s. Considere que sua massa é de 0,15 kg e que o impacto entre a bola e o taco durou 0,02 s. Calcule a intensidade do impulso recebido pela bola, sabendo que ela estava parada antes da tacada, e a força que o taco exerce sobre a bola.

Exercício 2

Que velocidade deve ter um Fusca, de massa igual a 1.500 kg, para ter a mesma quantidade de movimento de um caminhão de carga, que tem uma velocidade de 60 km/h e uma massa de 7,5 toneladas (1 t = 1.000 kg)?

Exercício 3

Num acidente de trânsito, um Fusca, com massa de 1.500 kg, vinha a uma velocidade de 36 km/h, ou seja, 10 m/s. O motorista, distraído, não viu um caminhão parado na rua e foi direto contra a sua traseira, parando logo em seguida. Calcule o impulso dado ao caminhão. E, supondo que o choque demorou 0,1 segundo, calcule a força do impacto.

AULA

18

Bola sete na caçapa do fundo

PARA COMEÇAR

Cansado de uma semana de trabalho bastante puxada, Gaspar resolveu dar uma saidinha e ir até o Bar da Sinuca. Gaspar encontra seus compadres, bebem juntos uma cervejinha e jogam umas partidas de sinuca.

Gaspar encontra Maristela, sua velha amiga, com quem sempre joga, mas de quem nunca ganhou.

Como sempre, Maristela o convida para um joguinho. Começam então a peleja. “Bola vermelha na caçapa do meio”, anunciou Gaspar, que jurou vencer a amiga dessa vez.

O nervosismo começou a crescer; uma a uma, as bolas iam sendo encaçapadas. Os outros amigos de Gaspar e Maristela, percebendo que dessa vez Gaspar tinha chances de vitória, aproximaram-se para ver aquela disputada partida.

As apostas começaram por todo o bar. Muitos já conheciam a fama de Maristela e, sem dúvida, apostaram na sua vitória. Outros, vendo Gaspar tão animado, não tiveram dúvida e apostaram nele.

O jogo continuou, descontraído na platéia, mas nervoso, entre os jogadores. Maristela percebeu que Gaspar havia treinado muito, pois estava jogando muito melhor. Gaspar percebeu que, realmente, tinha chances de vencer o jogo e começou a se empenhar ao máximo.

Depois de muitas bolas encaçapadas, o jogo estava chegando ao final. Nesse momento, até a torcida estava nervosa. Restava somente a bola sete, a preta. O jogo estava empatado e era a vez de Gaspar dar a tacada.

“Bola sete na caçapa o fundo”, gritou Gaspar confiante na vitória, diante de uma Maristela assustada com a possibilidade de, pela primeira vez, perder um jogo para Gaspar.

Gaspar se preparou para a tacada final, pensando consigo: “Basta dar uma tacada na direção da caçapa, com muito, muito cuidado, e eu ganho este jogo”.

Será verdade que basta mirar a caçapa e ter muito, muito cuidado na tacada para encaçapar? O que é necessário fazer para que a bola entre na caçapa?

Fique ligado

Choques

Toda vez que vemos um acidente de trânsito, dizemos que houve uma **batida**, ou seja, houve um choque entre dois ou mais veículos. Num jogo de tênis, os jogadores batem com suas raquetes na bola, para rebatê-la; num jogo de boliche, a bola se choca com os pinos, derrubando-os; num jogo de golfe, o jogador dá uma tacada na pequena bolinha, arremessando-a para bem longe.

Outro jogo que envolve tacada é o beisebol, onde uma bola muito dura é arremessada pelo lançador e o rebatedor tenta acertá-la com o taco, a fim de arremessá-la o mais longe possível.

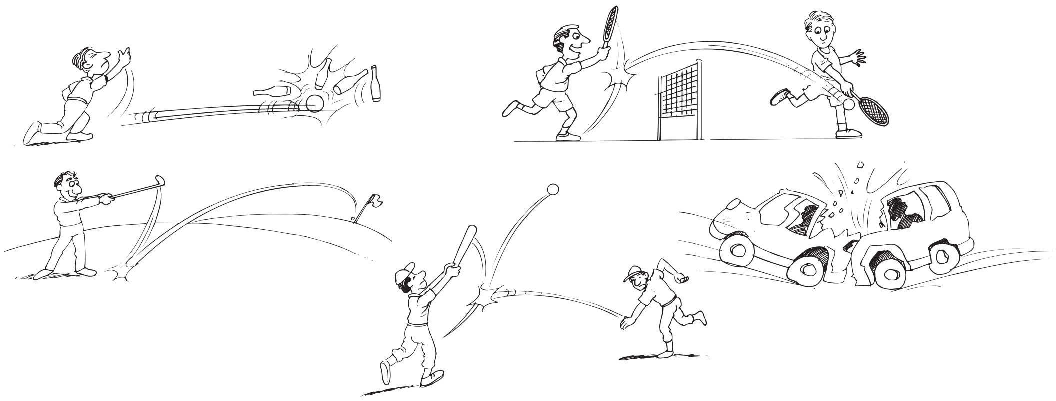


Figura 1. Em todos esses exemplos, existe uma coisa em comum: o choque entre pelo menos dois objetos.

Como já vimos, **impulso** é a grandeza que descreve o que ocorre quando uma força é aplicada sobre um objeto num intervalo de tempo Δt. Logo, essa é uma boa grandeza para compreendermos os exemplos acima, inclusive o exemplo do jogo de sinuca.

E qual é a relação entre **impulso** e **choque**? Quando duas bolas se chocam, elas exercem uma força uma sobre a outra. Isso provoca uma variação do estado de movimento, nas duas bolas. Ou seja, quando um impulso é dado a uma bola, uma força é exercida sobre ela, alterando sua velocidade, isto é, alterando sua quantidade de movimento.

No caso do choque de duas bolas, as duas têm seu estado de movimento alterado, pois, pela terceira lei de Newton, quando um objeto exerce força sobre outro, este também exerce uma força sobre o primeiro.

Vamos lembrar da relação entre impulso e quantidade de movimento, vista na aula passada:

$$\boxed{\vec{I} = \Delta \vec{q} = m \cdot \vec{v}_{final} - m \cdot \vec{v}_{inicial}}$$

isto é, quando uma bola sofre a ação de uma força, se conhecemos sua massa e sua velocidade, antes e depois do choque, saberemos o valor do impulso dado a essa bola.

Qual será o **impulso total do sistema** se, em vez de nos preocuparmos com o comportamento de uma só bola, considerarmos as duas bolas?

Princípio da conservação da quantidade de movimento

Para comparar alguma coisa ao longo do tempo, é preciso identificar o que mudou e o que não mudou, isto é, o que se transformou e o que se conservou. Quando nos olhamos no espelho e numa fotografia antiga, podemos observar que muita coisa se alterou, mas outras permaneceram constantes, como, por exemplo: nossos cabelos começam a ficar brancos, mas nossos olhos continuam da mesma cor.

Ao estudar a natureza, também buscamos identificar o que se transforma e o que se conserva, para podermos fazer comparações.

Já vimos um princípio de conservação na Física: o **princípio de conservação da energia mecânica**, ao qual voltaremos, ainda nesta aula.

Outro princípio de conservação é o da **quantidade de movimento**: sob certas condições a quantidade de movimento de um sistema não se altera, ou seja, **conserva-se.**

Podemos verificar isso de modo muito simples e talvez intuitivo: basta lembrarmos da terceira lei de Newton (a lei da ação e reação).

Essa lei descreve como se dá a interação entre os corpos. E é justamente isso que se estuda num choque entre dois corpos: como acontece e o que podemos descrever deste choque.

Quando duas bolas se chocam, sabemos que cada uma exerce força sobre a outra, isto é, **ação e reação**. Sabemos, também, que cada uma dessas duas forças, que compõe o par de ação e reação, tem a mesma intensidade, sentidos opostos e que cada uma age em só uma das bolas.

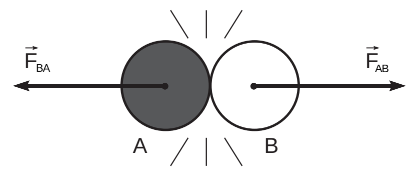


Figura 2

Podemos dizer também que uma dá à outra um impulso, e que o tempo em que uma esteve em contato com a outra foi exatamente o mesmo.

Vamos, então, escrever, de forma matemática, o que está mostrado na Figura 3, começando pelas forças.

Pela terceira lei de Newton, a força que a bola A exerce sobre a bola B ($\vec{F}_{AB}$) tem a mesma intensidade e o sentido oposto que a força que a bola B faz na bola A ($\vec{F}_{BA}$), ou seja:

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

Essas forças foram aplicadas durante o mesmo intervalo de tempo, que é o tempo que as bolas ficam em contato, assim podemos multiplicar cada uma delas por esse intervalo Δt:

$$\vec{F}_{AB}\,\Delta t = -\vec{F}_{BA}\,\Delta t$$

Essa equação está nos dizendo que o impulso que a bola B recebe é igual e de sentido contrário ao impulso que a bola A recebe:

$$\vec{I}_B = -\vec{I}_A$$

Podemos escrever o impulso como a variação de $\vec{q}$ ($\vec{F}\cdot\Delta t = \vec{I} = \Delta\vec{q}$), isto é, a diferença entre a quantidade de movimento do corpo, antes e depois do choque, isto é:

$$\Delta\vec{q}_B = -\Delta\vec{q}_B$$

ou seja,

$$\vec{q}_{B\,\text{depois}} - \vec{q}_{B\,\text{antes}} = -(\vec{q}_{A\,\text{depois}} - \vec{q}_{A\,\text{antes}})$$

$$\vec{q}_{B\,\text{depois}} - \vec{q}_{B\,\text{antes}} = -\vec{q}_{A\,\text{depois}} + \vec{q}_{A\,\text{antes}}$$

Passando as quantidades de movimento **antes do choque**, para o lado esquerdo da equação e as quantidades de movimento **depois do choque**, para o lado direito da equação, teremos a seguinte equação:

$$\vec{q}_{A\,\text{depois}} + \vec{q}_{B\,\text{depois}} = +\vec{q}_{A\,\text{antes}} + \vec{q}_{B\,\text{antes}}$$

Isto é, **a soma da quantidade de movimento da bola A e da bola B, antes do choque é igual à soma da quantidade de movimento da bola A e da bola B, depois do choque**.

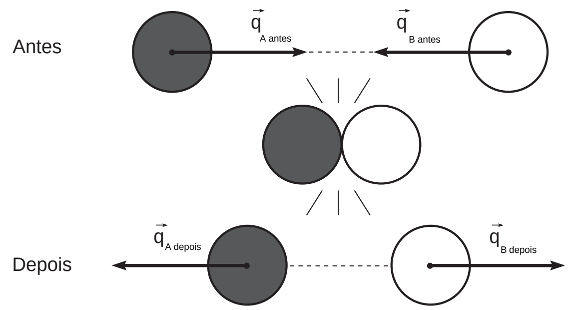


Figura 3. A soma das quantidades de movimento das duas bolas é a mesma antes e depois do choque.

Como $\vec{q}_{Adepois} + \vec{q}_{Bdepois} = \vec{q}_{Aantes} + \vec{q}_{Bantes}$ então $\vec{q}_{TOTAL\ antes} = \vec{q}_{TOTALdepois}$ ou seja, $\vec{q}_{TOTAL\ f} - \vec{q}_{TOTAL\ i} = 0$

$$\boxed{\Delta \vec{q}_{TOTAL} = 0}$$

Esta última expressão nos permite afirmar que **a quantidade de movimento do sistema foi conservada**.

Passo-a-passo

Um perito do Departamento de Trânsito está examinando um acidente entre um pequeno caminhão e um Fusca, que bateram de frente. O motorista do Fusca foi hospitalizado, mas o motorista do caminhão, que saiu sem nenhum arranhão, deu um depoimento. Ele disse que estava a uma velocidade de 36 km/h, quando colidiu com o Fusca. O perito soube por outras testemunhas que, imediatamente depois do choque, tanto o Fusca quanto o caminhão pararam. O perito sabe que a massa do Fusca é de aproximadamente 1.200 kg e que a massa do caminhão é de 3.600 kg. Como o perito descobrirá qual era a velocidade do Fusca antes do choque?

Esse é um típico caso de investigação de polícia técnica. O perito em acidentes usa a conservação da quantidade de movimento para resolver o seu problema. A velocidade do caminhão e do Fusca depois da colisão é zero e a velocidade do caminhão antes do choque era de 36 km/h ($v_F = 10$ m/s). Como o choque se deu numa reta, podemos usar apenas o módulo das quantidades de movimento, ou seja:

$$\Delta q_{\ TOTAL} = 0$$

$$q_{TOTAL\ depois} - q_{TOTAL\ antes} = 0$$

$$(q_{C\ depois} + q_{F\ depois}) - (q_{C\ antes} + q_{F\ depois}) = 0$$

$$q_{C\ depois} + q_{F\ depois} = q_{C\ antes} + q_{F\ antes}$$

$$m_C \cdot v_{C\ depois} + m_F \cdot v_{F\ depois} = m_C \cdot v_{C\ antes} + m_F \cdot v_{F\ antes}$$

$$3.600 \cdot 0 + 1.200 \cdot 0 = 3.600 \cdot 10 + 1.200(-v_{F\ antes})$$

$$v_{F\ antes} = \frac{36.000}{1.200} \qquad v_{F\ antes} = 30\ \frac{m}{s}$$

A velocidade do fusca era de 30 m/s (108 km/h), três vezes a velocidade do caminhão. E por que a velocidade do fusca antes do choque é negativa? É preciso lembrar que, como a velocidade é uma grandeza vetorial, ela tem módulo, direção e sentido. Como escolhemos que a velocidade do caminhão fosse positiva, temos que escolher que a velocidade do Fusca seja negativa, **pois os veículos estavam se movendo em sentidos opostos**.

Tentando prever

Gaspar estava rodando em volta da mesa, tentando recordar as conversas que ele e Maristela tiveram sobre como usar a conservação da quantidade de movimento e o conceito de impulso, para jogar sinuca. Pediu licença, para espanto de todos, e foi até o banheiro. Então, puxou um caderninho e uma caneta do bolso e começou a calcular. Pensou que, se a bola branca, que estava parada, tivesse uma massa de 200 gramas (0,2 kg) e, se ele desse uma tacada com uma força de 1 newton, num tempo de 0,01 segundo, ele daria um impulso de:

$I = F \cdot \Delta t = 1 \cdot 0{,}01 = 0{,}01\ N \cdot s$ o que daria à bola uma velocidade de:

$$I = \Delta q = q_{depois} - q_{antes}$$

$$I = m_B \cdot v_{depois} - m_B \cdot v_{antes}$$

$$0{,}01 = 0{,}2 \cdot v_{depois} - 0{,}2 \cdot 0$$

$$0{,}01 = 0{,}2\ v_{depois}$$

$$v_{depois} = 0{,}5\ m/s = 50\ cm/s$$

Gaspar concluiu que era uma boa velocidade para a bola branca se chocar com a bola preta. Pensou, ainda, que, depois do choque, essa também seria uma boa velocidade para que a bola preta chegasse até a caçapa, mas ficou preocupado com que velocidade a bola branca ficaria depois do choque. Voltou aos cálculos:

A bola branca vai bater na bola preta, que está parada e tem a mesma massa e vai adquirir a mesma velocidade da bola branca, isto é 0,5 m/s. Aplicando o princípio de conservação da quantidade de movimento no choque das duas bolas, teremos que:

$$q_{Pdepois} + q_{Bdepois} = q_{Pantes} + q_{Bdepois}$$

$$m_P \cdot v_{Pdepois} + m_B \cdot v_{Bdepois} = m_P \cdot v_{Pantes} + m_B \cdot v_{Bantes}$$

$$0{,}2 \cdot 0{,}5 + 0{,}2 \cdot v_{Bdepois} = 0{,}2 \cdot 0 + 0{,}2 \cdot 0{,}5$$

$$0{,}1 + 0{,}2 \cdot v_{Bdepois} = 0{,}1$$

$$0{,}2 \cdot v_{Bdepois} = 0$$

$$v_{Bdepois} = 0$$

Gaspar ficou satisfeito: se a bola branca tiver uma velocidade de 0,05 m/s antes do choque, a bola preta, depois do choque, terá uma velocidade de 0,05 m/s e a bola branca vai ficar parada. Isso era suficiente para garantir que a bola branca não fosse para caçapa com a preta.

Tudo calculado. Gaspar volta à mesa de bilhar. Com um ar confiante, pega o taco e novamente se prepara para pôr em prática seus estudos. Todos o olhavam com espanto, tal era sua confiança. Apenas Maristela, com um riso no canto da boca, olhava com tranqüilidade para a cena.

Explosão

Quando alguém se distrai na cozinha e esquece a panela de pressão no fogo, corre o risco de vê-la se tornar uma bomba. Todos nós sabemos que, quando uma bomba explode, pedaços voam para todos os lados, atingindo quem estiver por perto. De onde vem o movimento dos pedaços, se a panela estava parada?

Quando um casal de patinadores está realizando manobras sobre os patins, treinam uma manobra clássica, onde os dois estão parados e a moça está de costas para o rapaz que, em determinado momento, empurra a moça, como podemos ver na figura 5. Mas só a moça se movimentou? Não.

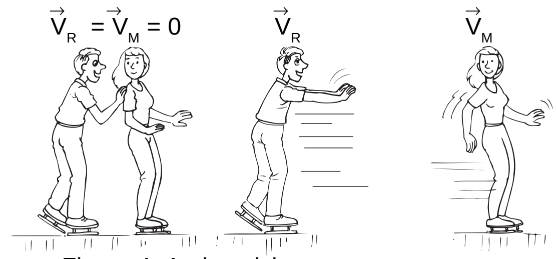


Figura 4. Ao impulsionar a moça, o rapaz também é impulsionado por ela.

Como se movimentaram? De acordo com a terceira lei de Newton, quando o rapaz empurra a moça é, ao mesmo tempo, empurrado por ela.

Analisando essa situação, em termos da quantidade de movimento, veremos que a quantidade de movimento total do sistema (rapaz e moça) no início era zero. Apesar de o rapaz ter uma massa de 90 kg e a moça de apenas 45 kg, a velocidade de ambos era zero.

Pelo princípio de conservação da quantidade de movimento, a quantidade de movimento no início e no fim devem ser iguais; ou seja, a **soma da quantidade de movimento** dos dois patinadores deve ser sempre zero.

$$\vec{q}_{\text{(Rapaz)depois}} + \vec{q}_{\text{(Moça)depois}} = \vec{q}_{\text{(Rapaz)antes}} + \vec{q}_{\text{(Moça)antes}}$$

$$m_R \cdot \vec{v}_{\text{Rdepois}} + m_M \cdot \vec{v}_{\text{Mdepois}} = m_R \cdot \vec{v}_{\text{Rantes}} + m_M \cdot \vec{v}_{\text{Mantes}}$$

Se o rapaz sair com uma velocidade de 1 m/s, qual deverá ser a velocidade da moça? Como o moça saiu num sentido oposto ao do rapaz, a velocidade dos dois tem sinais diferentes. (Nesse caso, é fundamental que você use o mesmo critério para as velocidades antes e depois do choque, ou explosão, isto é, se você decidiu que a velocidade que aponta para a direita é positiva, então todos os objetos que vão para a direita têm velocidade positiva, e os que vão para a esquerda têm velocidade negativa; é só uma **convenção**.)

$$m_R \cdot v_{\text{Rdepois}} - m_M \cdot v_{\text{Mdepois}} = m_R \cdot 0 + m_M \cdot 0$$

Substituindo o valor das velocidades e das massas conhecidas:

$$90 \cdot 1 - 45 \cdot v_{\text{Mdepois}} = 0$$

$$v_{\text{depois}} = \frac{90}{45}$$

$$v_{\text{depois}} = 2 \text{ m/s}$$

Ou seja, a força com que cada um empurrou o outro foi a mesma (terceira lei de Newton), porém, como o rapaz tem mais massa que a moça, ele saiu com uma velocidade menor.

Condições para que a quantidades de movimento seja conservação

Lembre-se de que usamos a terceira lei de Newton para obter o princípio da conservação da quantidade de movimento.

Quando usamos a terceira lei, estamos interessados em descrever a interação entre dois corpos, ou seja, a **força que cada um faz no outro.**

No exemplo do choque entre as duas bolas de bilhar, sabemos que, se não houver nenhuma força externa ao movimento das bolas, como, por exemplo, a força de atrito, só haverá a ação das forças de ação e reação que uma bola faz na outra. Essa é a condição para que **a quantidade de movimento de um sistema se conserve**.

Outro exemplo é o do bate-estaca. Quando o bate-estaca cai de certa altura, tem uma grande quantidade de movimento, sua massa é muito grande, mas a estaca, que se pretende enterrar no solo, também tem uma massa muito grande. Quando o bate-estaca se choca com a estaca, ambos se impulsionam, transmitindo quantidade de movimento. Entretanto, a estaca penetra no solo apenas alguns centímetros.

Por que a quantidade de movimento que o bate-estaca transferiu para a estaca **não se conserva depois do choque?** Porque existe uma força externa, e, nesse caso, é o solo que impede que a estaca continue seu trajeto após o choque.

Então, a quantidade de movimento só se conserva quando os corpos que estão se chocando não sofrem a ação de forças externas.

A tacada final

Gaspar suava de nervoso, estava em total concentração! Esfregava talco nas mãos suadas para que o taco deslizasse sem problemas entre seus dedos. Imaginou o momento de glória quando encaçapasse a bola. Seria carregado pelos seus companheiros para comemorar a grande vitória sobre Maristela.

Maristela, a essa altura do jogo, já havia se recuperado do susto inicial e esperava o momento decisivo: apenas um erro de Gaspar seria suficiente para que ela virasse a situação.

Gaspar, convicto, preparou a tacada. Com medo de bater muito forte na bola, reduziu a força e tocou bem de leve na bola branca, que rolou lentamente em direção à bola preta. Ao se chocar com a bola preta, a bola branca parou, transferindo-lhe toda sua quantidade de movimento, como Gaspar havia previsto. A bola preta, com o choque, adquiriu uma quantidade de movimento e seguiu rumo à caçapa. Mas, para espanto geral, parou exatamente na boca da caçapa.

Gaspar gritava com raiva. Não acreditava que seus cálculos estivessem errados, estava tudo certinho, pensava ele. Maristela dava pulos de alegria, dizendo: "Eu sabia que você tinha esquecido de alguma coisa!"

O que será que Gaspar esqueceu?

Rapidamente, Maristela se preparou para jogar e, não teve dúvida, colocou a bola preta no fundo da caçapa ganhando novamente o jogo. Foi aquela gritaria!

Quando os ânimos se acalmaram, Gaspar perguntou a Maristela do que ele havia se esquecido. A moça, num tom professoral, disse: "Você se esqueceu de que a mesa de bilhar é coberta com feltro (um tipo de tecido), o que gera um pequeno, mas significante, atrito sobre as bolas, enquanto elas estão em movimento. Isso significa que haviam **forças externas** agindo sobre o sistema formado pelas duas bolas."

E continuou: "Aposto que você usou o **princípio de conservação da quantidade de movimento**, ou seja, calculou a velocidade da bola preta, sabendo que a quantidade de movimento da bola branca deveria ser totalmente transmitida para a bola preta, o que de fato é verdade. Mas você se esqueceu de levar em consideração que o atrito foi tirando uma parte da quantidade de movimento da bola branca antes do choque e, também da bola preta, depois do choque."

Maristela concluiu dizendo: "É Gaspar, quem sabe você ganha na próxima!"

Conservação da energia e da quantidade de movimento

Num choque, existem sempre forças envolvidas. Essas forças podem ser suficientes para amassar, deformar ou mesmo quebrar os corpos que se chocam. É difícil observar a deformação que uma bola de futebol sofre com o chute do jogador, pois o tempo de contato entre o pé do jogador e a bola é muito pequeno.

Quando dois carros se chocam, podemos ver claramente a deformação sofrida por eles. Existem então dois tipos de choque: num deles, os corpos não ficam deformados depois do choque (bolas de bilhar) e, no outro, ficam deformados depois do choque (colisão dos carros).

A deformação dos corpos está associada à transformação de energia cinética em energia potencial elástica. Se, depois do choque, os corpos recuperam sua forma, dizemos que a energia mecânica é conservada, isto é, a energia cinética se transforma, durante o choque, em energia potencial elástica; e, após o choque, toda energia cinética é restituída. Mas se eles se deformam de forma irreversível, dizemos que a energia mecânica **não se conserva**, pois parte dela foi usada para deformar o corpo!

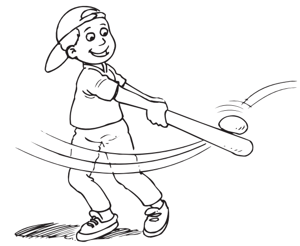


Figura 5. No momento da batida, a bola sofre uma grande deformação.

Separamos então os choques em dois tipos, os **elásticos** e os **inelásticos**.

- Os **choques elásticos** conservam a quantidade de movimento e a energia mecânica.
- Os **choques inelásticos**: conservam a quantidade de movimento e não conservam a energia mecânica.

Observe que a **quantidade de movimento sempre se conserva**, a não ser que exista alguma força externa ao sistema.

Passo-a-passo

Duas bolas de bilhar, uma branca e uma preta estão sobre uma superfície lisa, sem atrito. As duas têm massas iguais a 0,2 kg (ou 200 gramas).

A bola preta está inicialmente parada e a branca tem velocidade de 1,0 m/s. Elas se chocam, e não se deformam. Como podemos calcular a velocidade das duas bolas após o choque?

Como não há atrito, não existem forças externas, de modo que a quantidade de movimento se conserva. Portanto, temos:

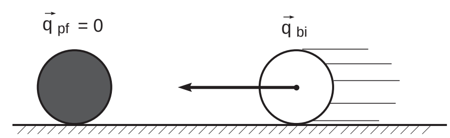


Figura 6

$$m_P \cdot v_{Pdepois} + m_B \cdot v_{Bdepois} = m_P \cdot v_{Pantes} + m_B \cdot v_{Bantes}$$

Como as bolas não sofrem deformações irreversíveis, ou seja, trata-se de um choque do tipo elástico, podemos afirmar que a energia mecânica também se conserva:

$$\frac{1}{2} m_P \cdot v_{Pdepois}^{2} + \frac{1}{2} m_B \cdot v_{Bdepois}^{2} = \frac{1}{2} m_P \cdot v_{Pantes}^{2} + \frac{1}{2} m_B \cdot v_{Bantes}^{2}$$

Podemos ver na expressão da conservação da energia, que só aparecem as energias cinéticas de cada bola antes do choque e depois do choque, pois, como todas estão em cima da mesa de bilhar, a altura das bolas, antes e depois do choque, é a mesma, ou seja, podemos considerar a altura da mesa como zero, desaparecendo assim a energia potencial gravitacional.

PARA TERMINAR

Nesta aula você viu:

- o conceito de **choque** entre dois corpos e sua relação com o conceito de **impulso**;
- que introduzimos a **conservação da quantidade de movimento**, usando o conceito de **impulso** e a **terceira lei de Newton**;
- que podemos usar a **conservação da quantidade de movimento** para analisar **explosões**, ou **separações de corpos**;
- quais são os **limites** para o uso **da conservação da quantidade** de movimento;
- que definimos dois tipos de choque, os **elásticos** e os **inelásticos**; e discutimos sobre a **conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia mecânica**, em cada um deles.

mãos à obra

Exercício 1

Quando um atirador dá um tiro, ele é lançado para trás, devido ao coice da espingarda. Sabendo que a bala da espingarda sai com uma velocidade aproximada de 200 m/s, que sua massa é de 10 g e que a massa da espingarda é de 2 kg, determine a velocidade com que a espingarda é lançada para trás.

Exercício 2

Um homem pescava num lago muito tranqüilo, dentro de uma canoa. Ele estava na extremidade direita da canoa, preparando seu anzol e, quando foi pegar a isca, percebeu que esta tinha ficado na extremidade esquerda da canoa. Ele se levantou e começou a caminhar até lá. Seu filho, que estava na margem do lago, viu o pai com uma velocidade de 0,5 m/s. Supondo que a massa do pescador seja de 60 kg e que a massa da canoa é de 90 kg, calcule a velocidade da canoa enquanto o pescador está se deslocando de um lado para o outro (considere o atrito desprezível).

Exercício 3

Quando um foguete está no espaço, não há nenhuma superfície na qual ele possa se apoiar para dar impulso. A forma de se resolver esse problema é usar o motor do foguete, para queimar combustível e expelir a chama a alta velocidade, de modo que, pela conservação da quantidade de movimento, o foguete adquira uma velocidade e possa se locomover. Supondo que o foguete tem uma massa de 5 toneladas e que ele arremesse 500 kg de combustível a uma velocidade de 360 km/h (100 m/s), calcule a velocidade que o foguete vai adquirir depois dessa explosão.

AULA

19

O ar está pesado

PARA COMEÇAR

Fim de semana, Gaspar vai à praia. Ele mora numa cidade distante do mar, não só distante, como também mais alta do que o mar: é preciso descer a serra. Num momento, durante a descida da serra, Gaspar teve a sensação de ensurdecer: seus ouvidos ficaram tapados.

Você já teve essa sensação? O que se faz normalmente é bocejar ou engolir para que a sensação estranha desapareça! Por que e como isso acontece?

Fique ligado

Muito prazer: atmosfera

Na Aula 12, você aprendeu que todos os objetos se atraem e os que estão próximos à Terra são atraídos para sua superfície.

Envolvendo a Terra existe uma camada formada por gases. Essa camada recebe o nome de **atmosfera** (Figura 1). A atmosfera contém, entre outros gases, oxigênio, que é essencial à vida.

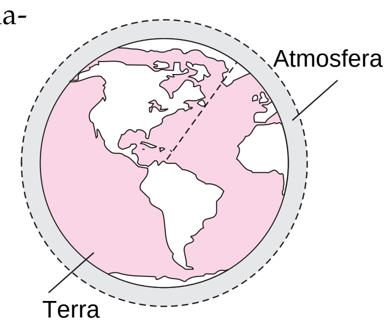


Figura 1

Os gases são formados por conjuntos de átomos, chamados de **moléculas**. Essas moléculas possuem massa e são atraídas para a Terra, mantendo-se, assim, ao seu redor.

Existem muitas dessas moléculas envol vendo a Terra e sendo atraídas na sua direção. Cada uma delas é extremamente leve, pois sua massa é muito pequena, mas, como existem muitas delas, o peso de todas juntas é considerável.

"Não me faça pressão"

Durante a descida da serra, Alberta, a esposa de Gaspar, disse: "Gaspar, no próximo sábado iremos comprar um fogão novo. Não me venha com desculpas. Caso contrário não cozinharei mais!"

E Gaspar respondeu: "Querida, por favor, não me faça **pressão**."

Nesse diálogo do cotidiano, Gaspar usou a palavra **pressão**. Pressão é também um conceito físico e vamos discutir o seu significado mais adiante. Antes, vamos verificar o que **pressão** significa, no contexto acima.

Nessa situação, Alberta está tentando **forçar** Gaspar a comprar um fogão novo, pois, ao que parece, ele não está com muita vontade.

No dicionário encontramos, entre outros, estes significados:

PALAVRA	SIGNIFICADO
Pressão	Coação, ato de pressionar.
Pressionar	Coagir, fazer pressão sobre algo.
Forçar	Conquistar, obter por força, levar alguém a fazer algo contra a sua vontade.

Observe que, nessa situação, foram utilizadas duas palavras relacionadas a dois conceitos físicos: **força**, que você já conhece**,** e **pressão**. No texto acima, é ainda possível perceber que **força** e **pressão** estão relacionadas, mas não têm o mesmo significado, não são sinônimos.

Em Física isso também acontece. Os conceitos de força e de pressão estão relacionados, mas **não são a mesma coisa**!

Vamos analisar o significado de **pressão** na Física e qual sua relação com o conceito de **força**.

Pegue um alfinete e um lápis (com a extremidade sem ponta) e empurre-os contra uma folha de papel colocada sobre uma mesa. Procure empurrá-los com a mesma força. Você notou alguma diferença sobre o papel?

Veremos adiante como sua observação está relacionada ao conceito de pressão. Antes, vejamos outro exemplo:

Passo-a-passo

Se você já passou pela experiência de pregar um prego na parede (se ainda não passou, experimente!), deve ter notado que os bons pregos têm uma ponta bem fina na extremidade, e não uma extremidade reta, como se pode ver na Figura 2. Qual dos dois pregos penetra mais facilmente na parede?

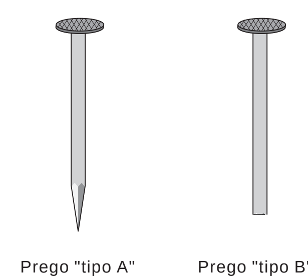


Figura 2

Se você martelar os dois pregos contra a parede, verá que o prego pontudo entrará na parede com mais facilidade.

Por que isso acontece? Qual é a diferença entre as duas situações?

Em ambas as situações, a força que fazemos com o martelo é transmitida pelo prego à parede. Vamos supor que essa força seja igual nas duas situações.

A única diferença é o tamanho da superfície de contato, isto é, da região do prego que encosta na parede. Em outras palavras, a **área onde a força é aplicada é diferente nas duas situações**.

Então, o efeito desejado (que o prego entre na parede) será melhor quanto menor for a área de contato entre o prego e a parede, isto é, quanto mais pontudo for o prego.

O prego pontudo entra na parede com mais facilidade porque a **pressão que ele exerce sobre a parede é maior**. Assim, **quanto menor for a área** de aplicação da força, mais facilmente o prego entrará na parede, pois **maior será a pressão** que ela exercerá sobre a parede.

Se usarmos dois pregos iguais (pontudos), veremos que, **quanto maior for a força aplicada**, mais facilmente o prego entrará na parede, pois **maior será a pressão**. Portanto, quanto maior o força aplicada numa superfície, maior será a pressão da força exercida sobre essa superfície.

Então, podemos juntar as duas observações e dizer que:

- a pressão é **inversamente proporcional** à área;
- a pressão é **diretamente proporcional** à força.

Matematicamente, a pressão (p) é definida como:

$$\boxed{p = \frac{F}{A}}$$

Agora é possível entender por que, quando se empurra o alfinete e o lápis contra o papel, com a mesma força, o alfinete fura o papel, ou ao menos deixa uma marca, e o lápis não faz nada: **a pressão do alfinete sobre o papel é maior**.

Você sabia?

Por causa da pressão, é difícil caminhar na areia com sapatos de salto fino. É muito mais fácil andar com os pés descalços. Devido ao nosso peso, nossos pés exercem pressão sobre a areia. Quando andamos descalços, a superfície de contato, onde a força é aplicada (área dos pés), é maior do que quando andamos com os sapatos (Fig. 3), de forma que a pressão será menor e afundaremos menos, o que facilita a caminhada.

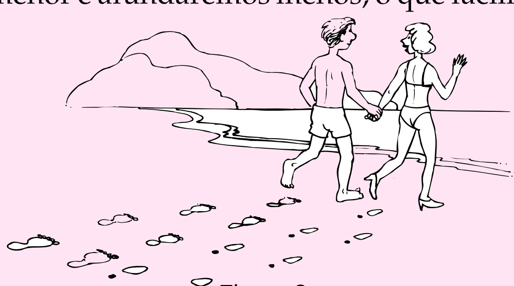


Figura 3

Pela mesma razão, podemos nos deitar numa cama de pregos. Quando nos deitamos, o nosso peso se distribui por uma área grande e, dessa forma, a pressão de cada prego é pequena, e não nos fere. Se, por outro lado, ficássemos em pé sobre a cama, com certeza iríamos nos machucar, pois agora o nosso peso estaria distribuído por uma área bem menor (dos pés) e, assim, a pressão seria bem maior.

Pressão, atmosfera... pressão atmosférica...

Afinal, qual a relação entre as coisas que discutimos: os pregos, a força, a pressão, a atmosfera, e o ouvido do Gaspar?

A conversa a respeito dos pregos serviu para que você aprendesse sobre o conceito de pressão. Para existir pressão, é preciso que uma força seja aplicada a uma superfície, portanto, quando se fala em pressão, entendemos **pressão de uma força sobre uma superfície**.

Vimos como a pressão varia quando variamos a força e a área; portanto, podemos afirmar que:

A pressão de uma força aplicada a uma superfície (ou simplesmente pressão), é igual à intensidade da força aplicada, dividida pela área da superfície onde essa força é aplicada.

Como vimos no início da aula, ao nosso redor e acima de nossas cabeças, existe ar e esse ar tem peso; logo, ele irá exercer pressão sobre as nossas cabeças. E não só sobre elas, mas sobre toda a superfície da Terra. Essa pressão é chamada de **pressão atmosférica**.

Pressão atmosférica é a pressão que a atmosfera exerce sobre a superfície da Terra.

Agora veja: se a pressão depende diretamente da força, nesse caso, o peso do ar e, esse, depende da quantidade de moléculas que existe lá para cima, então, quanto menor for a espessura da atmosfera, menor será sua pressão e vice-versa. Portanto, a pressão **atmosférica diminui com a altitude**, isto é, com a **altura do local, em relação ao nível do mar**.

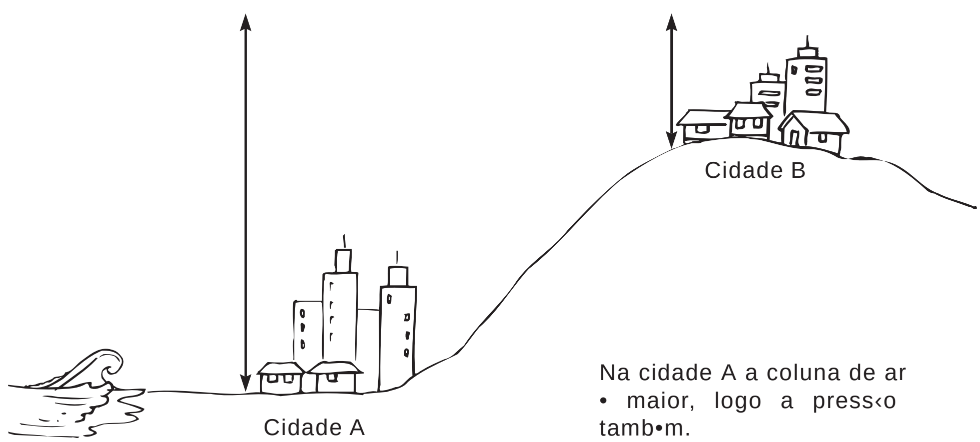


Figura 4. A coluna de ar é maior na cidade A, portanto a pressão também é maior.

E o que aconteceu a Gaspar? À medida que foi descendo a serra, a pressão atmosférica foi aumentando, e o seu ouvido... Vamos estudar um pouco o ouvido.

Você sabia?

No **ouvido**, existe uma pele muito fina, chamada **tímpano**, que separa o interior do ouvido da sua parte externa. Em situações normais, a pressão nos dois lados do tímpano é praticamente a mesma, de forma que ele não sente pressão.

O tímpano é uma membrana muito fina e delicada. Por isso, precisamos ter muito cuidado ao usar cotonetes e também com sons e ruídos muito intensos, para não feri-lo. O tímpano é o principal responsável pela nossa audição, e fortes agressões poderão resultar em surdez.

Você já pode imaginar o que ocorreu: à medida que a pressão atmosférica foi aumentando, a pressão do lado externo do tímpano ficou maior do que do outro lado; então, o tímpano foi pressionado e empurrado levemente para dentro. Essa foi a causa da sensação estranha no ouvido do Gaspar.

Ao engolir saliva ou bocejar, a pressão nos dois lados se torna igual novamente e desaparece a sensação desagradável.

É possível medir a pressão atmosférica?

Até o século XVII, pouco se sabia sobre a pressão atmosférica. Muitas pessoas nem acreditavam que de fato ela existia.

Um físico italiano chamado Evangelista Torricelli, por volta de 1630, realizou uma experiência que comprovou a existência da pressão atmosférica e, além disso, determinou o seu valor.

Torricelli teve uma ótima idéia: primeiro apanhou um recipiente cheio de mercúrio (aquele líquido prateado usado nos termômetros). Depois, pegou um tubo fechado de um lado e o encheu com mercúrio (Figura 5). Em seguida, tapou a outra extremidade e mergulhou o tubo no recipiente (com a parte tapada virada para baixo).

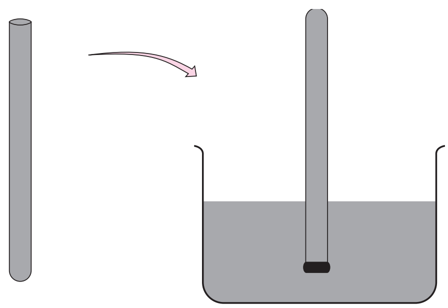


Figura 5

Ao destapar o tubo, ele observou que a coluna de mercúrio desceu até atingir uma certa altura: 76 cm.

Torricelli então concluiu que:

A pressão exercida pela coluna de mercúrio é igual à pressão atmosférica, pois ela é capaz de equilibrar a coluna.

É importante notar que, dentro do tubo, fica uma região sem ar: o **vácuo**. Se fosse feito um buraco no topo do tubo, o ar entraria e a coluna desceria, até atingir o mesmo nível do mercúrio no recipiente, pois seria pressionada pela atmosfera.

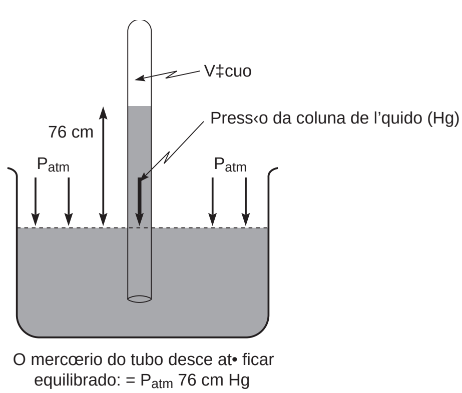


Figura 6. O mercúrio dentro do tubo desce até ficar equilibrado, a 76 cm de altura.

Então, Torricelli concluiu que:

A pressão atmosférica (p_{atm}) equivale à pressão exercida por uma coluna de mercúrio de 76 cm de altura.

O mercúrio é representado pelas letras Hg, então:

$$p_{atm} = 76 \text{ cmHg}$$

Note que **centímetros de mercúrio** (cmHg) é uma unidade de pressão, assim como o **quilograma** (kg) é uma unidade de massa e o **newton** (N) é de força. Foi criada uma outra unidade de pressão chamada **atmosfera** (atm) que equivale à pressão atmosférica. Então:

$$p_{atm} = 1 \text{ atm}$$

Já que 76 cmHg equivalem à pressão atmosférica, são equivalentes:

$$p_{atm} = 1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg}$$

Para sua curiosidade, colocamos na tabela ao lado o valor da pressão atmosférica de acordo com a altitude:

O nível do mar corresponde à altitude 0 m: aí, a pressão atmosférica é máxima.

TABELA 1

Altitude (m)	P_{atm} (cmHg)
0	76
500	72
1.000	67
2.000	60
3.000	53
4.000	47
5.000	41
6.000	36
7.000	31
8.000	27
9.000	24
10.000	21

Chegando ao mar: um bom mergulho!

Finalmente, Alberta e Gaspar chegaram à praia.

O mar estava um pouco agitado e Gaspar sabe nadar muito bem. Pegou sua máscara de mergulho e foi direto para a água.

Gaspar mergulhou fundo. De repente... "Ai, que dor no ouvido!" Desta vez não foi só uma sensação estranha, doeu pra valer. Sabe por quê?

Conforme você aprendeu, quando uma força é aplicada sobre uma superfície, ela exerce pressão. Viu também que existe uma "coluna de ar" sobre nossas cabeças e que, como tem peso, também exerce pressão sobre nós.

O que acontece quando mergulhamos na água? Acima de nossas cabeças existe, **além** da coluna de ar, uma coluna de água. Essa coluna de água **também tem peso** e, portanto, também **exerce pressão sobre nós**. Pobre tímpano! Então:

A pressão no fundo do mar é igual à pressão atmosférica *mais* a pressão da coluna de água!

E isso serve para qualquer situação onde existe um líquido: a pressão, numa certa profundidade do líquido, é igual à pressão atmosférica mais a pressão da coluna do líquido acima daquele ponto.

O valor da pressão atmosférica nós já conhecemos, mas como se calcula a pressão da coluna de líquido?

Já sabemos que **pressão** é a relação entre **a força aplicada e a área**. Assim, o primeiro passo para obter o valor da pressão da coluna de água é calcular a força que ela faz, isto é, o seu peso. De acordo com o que você aprendeu na Aula 12, o peso será dado pelo produto da massa ($m_{líq}$) da coluna pela aceleração da gravidade (g).

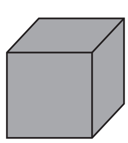
$$\boxed{P_{líq} = m_{líq} \cdot g}$$

E agora temos um outro problema: como calcular a massa da coluna de líquido? Para isso, vamos precisar de uma outra grandeza física: a **densidade.**

Você já deve ter ouvido falar: "a densidade da população na cidade X é de **2 habitantes por metro quadrado**". Isso quer dizer que, nessa cidade existem, **em média**, dois habitantes para cada metro quadrado de terreno.

Então, **densidade** é uma quantidade (que pode ser o número de pessoas, a massa de algum objeto etc.) dividida pela região que ela ocupa (pode ser a área ocupada pela população, o volume do objeto etc.). Portanto é possível utilizar densidade de várias formas, observe a tabela abaixo.

TABELA 2

TIPO DE DENSIDADE	DEFINIÇÃO DA DENSIDADE	UNIDADE DA DENSIDADE
Densidade de habitantes 	Número de habitantes dividido pela área que eles ocupam Ex.: 6 habitantes, área = 3 m^2 d = 2 habitantes/m^2	número de habitantes/ m^2
Densidade de massa de um objeto 	Massa do objeto dividida pelo volume que ele ocupa Ex.: massa = 4 kg, volume = 2 m^3 d = 2 kg/m^3	$\frac{\text{unidade de massa}}{\text{unidade de volume}}$ Ex.: kg/m^3, g/cm^3 etc.

Normalmente, quando falamos da **densidade de um objeto** referimo-nos a sua densidade de massa, que é a relação entre a sua massa e o seu volume. Nesse caso, a densidade é também chamada de **massa específica**, pois ela nos diz a quantidade de massa que existe numa unidade de volume.

Por exemplo: "a densidade do gelo é 0,92 g/cm^3 significa que em cada cm^3 de gelo existem 0,92 gramas de gelo". Ou "a densidade da água é 1,0 g/cm^3 significa que em cada cm^3 de água existe 1,0 grama de água".

A densidade de um material depende da temperatura e da pressão à qual está sujeito. Normalmente, quando nada é falado, a densidade foi medida estando o objeto a zero grau sob a pressão de 1 atm. A tabela ao lado mostra o valor da densidade de alguns materiais.

TABELA 3

Material	Densidade (gramas/cm^3)
Ar	0,0013
Gasolina	0,70
Gelo	0,92
Água pura	1,00
Água do mar	1,03
Ferro	7,60
Mercúrio	13,6
Ouro	19,3

Um fato importante é que a densidade de um objeto não depende do seu tamanho, já a massa depende: quanto maior o objeto, maior é a sua massa. Mas a **densidade é a mesma**, não importam as dimensões do objeto, mas de que tipo de material ele é formado. Por exemplo, a densidade da água é a mesma, não importa se é uma gota ou uma garrafa.

Para representar a densidade, ou massa específica, normalmente se utiliza a letra d. Escreve-se a densidade de um objeto como:

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

onde m representa a massa e V o volume do objeto.

Voltando ao mar

Observe a figura do Gaspar no fundo do mar. Nela, desenhamos uma coluna de água. Vamos calcular a pressão exercida pela coluna. Para isso, precisamos calcular o seu peso, utilizando o conceito de densidade.

Usando a definição de densidade, podemos escrever a massa da coluna como o produto da densidade do líquido pelo volume da coluna:

$$m_{coluna} = d_{líquido} \cdot V_{coluna}$$

Para calcular o volume da coluna, basta multiplicar a área da sua base (A_{base}) pela sua altura (h_{coluna}), que é a profundidade onde o Gaspar se encontra:

$$V_{coluna} = A_{base} \cdot h_{coluna}$$

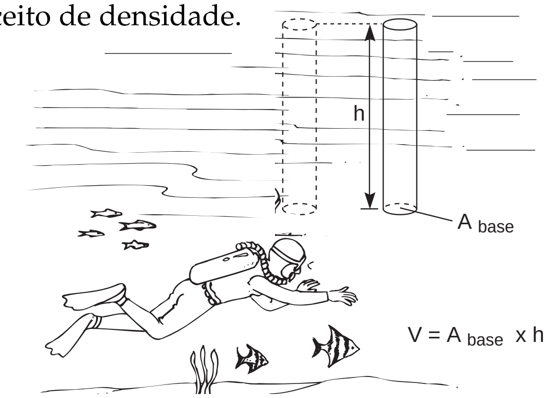


Figura 9. No fundo mar, o Gaspar está suportando a pressão de uma coluna de água.

Então, substituindo o volume, podemos escrever a massa como:

$$m_{coluna} = d_{líquido} \cdot A_{base} \cdot h_{coluna}$$

Ótimo! Agora, basta lembrar que a pressão é força dividida pela área:

$$p = \frac{F_{coluna}}{A_{base}}$$

e que, nesse caso, a força é o peso da coluna:

$$P = m_{coluna} \cdot g, \quad \text{assim:}$$

$$p = \frac{P}{A_{base}} = \frac{m_{coluna} \cdot g}{A_{base}}$$

Utilizando a expressão encontrada para a massa:

$$p = \frac{d_{líquido} \cdot A_{base} \cdot h_{coluna} \cdot g}{A_{base}}$$

Veja que estamos multiplicando e dividindo pela área da base, assim podemos eliminar a área, obtendo finalmente:

$$p = d_{líquido} \cdot g \cdot h_{coluna}$$

Essa é a pressão exercida pela coluna de água sobre o Gaspar.

Mas lembre-se de que, além da água, existe a atmosfera. Assim, a pressão **total** sobre o ponto onde está o Gaspar será:

$$p = p_{atm} + d_{líquido} \cdot g \cdot h_{coluna}$$

Essa expressão determina a pressão num ponto, a uma profundidade h, no interior de um líquido de densidade d. Esse fato é conhecido como **lei de Stevin**, em homenagem ao físico Simon Stevin, responsável pela sua dedução.

Então, Gaspar sentiu uma forte dor no ouvido quando mergulhou fundo, porque a pressão nos seus tímpanos aumentou à medida que ele afundou no mar.

Qual o valor da pressão onde Gaspar mergulhou?

Imagine que Gaspar tenha descido até uma profundidade de 5 m. A pressão da coluna de água será dada pela expressão: $p = d \cdot g \cdot h$. Sabemos que $g = 10\ m/s^2$, $h = 5\ m$ e a densidade da água do mar é $d = 1{,}03\ g/cm^3$.

Agora, basta fazer a conta? Não. É preciso ter muito **cuidado com as unidades**. Elas precisam ser **equivalentes**. Veja que g e h utilizam unidades do SI, mas d não. Por isso, deve-se fazer uma **transformação de unidades**. Precisamos escrever a densidade em kg/m^3.

$$d = 1{,}03\ g/cm^3 = 1{,}03 \cdot 10^3\ kg/m^3$$

Agora, fazendo a conta obtemos o seguinte resultado:

$$p = 1{,}03 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 5$$
$$p = 0{,}5 \cdot 10^5\ N/m^2$$

Então, a pressão total sobre Gaspar, que está no mar a 5 m de profundidade será:

$$p = p_{atm} + p_{líquido}$$
$$p = 1{,}0 \cdot 10^5\ N/m^2 + 0{,}5 \cdot 10^5\ N/m^2 = 1{,}5 \cdot 10^5\ N/m^2 = 1{,}5\ atm$$

Note que essa pressão é 1,5 vez maior do que a pressão atmosférica. Foi por isso que o ouvido de Gaspar doeu.

Igualando unidades

Observe que utilizamos uma outra unidade para pressão, o **newton por metro quadrado** (N/m^2). Ela vem da definição de pressão, quando se utilizam as grandezas no SI (ver Aula 2): $p = F\ (newtons)/A\ (m^2)$. Como se relaciona essa unidade com a unidade **atmosfera,** que equivale a **76 cmHg**?

Sabemos que a pressão da coluna de mercúrio pode ser escrita como $p = d_{Hg} \cdot g \cdot h_{Hg}$. Conhecemos todos esses valores: $d_{Hg} = 13{,}6\ g/cm^3$, $g = 10\ m/s^2$, $h_{Hg} = 76\ cmHg$. Para encontrar o valor da p_{atm} nas unidades do SI (N/m^2), basta transformar todas as unidades para as unidades do SI (kg, m, s) e fazer a conta:

$d_{Hg} = 13{,}6\ g/cm^3 = 13{,}6 \cdot 10^3\ kg/m^3$ e $h_{Hg} = 76\ cmHg = 0{,}76\ m$

Portanto, $p_{atm} = 1{,}01 \cdot 10^5\ N/m^2$ nas unidades do SI.

Então, são equivalentes: $1\ atm = 1{,}01 \cdot 10^5\ N/m^2 = 76\ cmHg$

PARA TERMINAR

Nesta aula, você aprendeu que:

- sempre que uma força é aplicada sobre uma superfície, ela exerce uma **pressão**, que é diretamente proporcional à força e inversamente proporcional à área da superfície onde a força é aplicada. Matematicamente: $p = F/A$;
- por ter peso, a atmosfera exerce pressão sobre a superfície da Terra. É a **pressão atmosférica**: a pressão atmosférica varia de acordo com a altitude e é possível medir o seu valor. Ao nível do mar, ela é máxima e equivale a uma coluna de 76 cmHg (= 1 atm);

- existe uma grandeza física que nos diz a quantidade de massa de um material que existe numa unidade de volume: é a **massa específica** ou **densidade**;
- uma coluna de líquido de densidade d exerce pressão e que essa pressão vale $p = d \cdot g \cdot h$, sendo h a profundidade ou a altura da coluna;
- a **pressão no interior de um líquido** é a soma da pressão atmosférica e da pressão da coluna de líquido: $p = p_{atm} + d \cdot g \cdot h$;
- as unidades mais utilizadas de pressão são: cmHg, atm e N/m^2. E a relação entre elas é: $76\ cmHg = 1\ atm = 1{,}01 \cdot 10^5\ N/m^2$.

Sempre que necessário, utilize $g = 10\ m/s^2$.

Exercício 1

Imagine um planeta cuja p_{atm} é aproximadamente 10 vezes menor do que na Terra. Se a experiência de Torricelli fosse realizada nesse planeta, qual seria a altura da coluna de mercúrio?

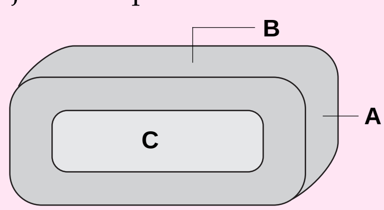
Exercício 2

O ponto mais alto do Brasil é o Pico da Neblina, com cerca de 3.000 m. Qual é o valor aproximado da pressão atmosférica no seu topo? (Consulte a tabela no texto.) Dê a sua resposta em:

a) cmHg
b) atm
c) N/m^2

Exercício 3

As dimensões de um tijolo são aproximadamente 5 cm × 10 cm × 20 cm, e a sua massa 1.500 g.



a) Calcule o seu volume, seu peso e sua densidade.
b) Calcule a pressão que ele exerce sobre uma mesa, quando está apoiado em cada uma de suas três faces.

Exercício 4

A densidade da água do mar é aproximadamente $1{,}03\ g/cm^3 = 1{,}03 \cdot 10^3\ kg/m^3$.

a) Calcule a pressão no fundo do mar, para as profundidades indicadas e complete a tabela abaixo. Não se esqueça de incluir a pressão atmosférica nos seus cálculos. Atenção às unidades. Dê o seu resultado em N/m^2 e atm.

Profundidade (m)	p (N/m^2)	p (atm)
0		
20		
40		
60		
80		
100		

b) Construa um gráfico da pressão (p), em função da profundidade (h).
c) Que tipo de curva você obteve?

AULA 20

No posto de gasolina

PARA COMEÇAR

Gaspar estava voltando para casa, após passar um dia muito agradável na praia, apesar da dor de ouvido.

Ele parou num posto de gasolina para abastecer e verificar as condições gerais do carro, para prosseguir a viagem tranqüilo.

Parando no posto, o rapaz que o atendeu aconselhou-o a calibrar os pneus, trocar o óleo do motor e verificar os freios.

Gaspar concordou prontamente.

Após calibrar os pneus, Gaspar foi trocar o óleo, e colocou o carro sobre um elevador hidráulico. O rapaz acionou o elevador e o carro foi erguido, sem grandes dificuldades.

Gaspar, que é muito curioso e gosta de saber como as coisas funcionam, perguntou ao rapaz como funcionava aquele equipamento, o que resultou numa looooonga conversa...

Fique ligado

Calibrando os pneus

Gaspar foi verificar a pressão no interior dos pneus do seu carro, isto é, "calibrar" os pneus.

Dentro dos pneus existe ar. Como sabemos, o ar é formado por diferentes gases, que exercem pressão sobre as paredes do pneu. Se a pressão lá dentro não estiver correta, o carro ficará instável na pista, por isso é importante que a pressão nos pneus seja sempre verificada.

O aparelho utilizado para medir a pressão de um gás chama-se **manômetro**. Um tipo muito simples de manômetro é formado por um tubo em forma de U (Figura 1), que contém mercúrio (Hg) no seu interior e uma escala para que se possa medir a altura da coluna de mercúrio no tubo e, assim, conhecer a pressão.

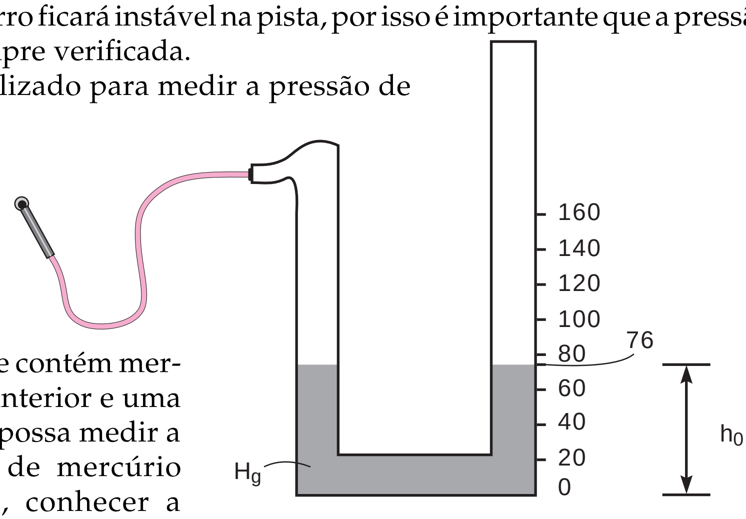


Figura 1. Manômetro simples.

Observe que existem dois ramos, um maior que o outro. No ramo menor, há uma mangueira para ser adaptada ao recipiente que contém o gás cuja pressão se deseja medir.

Quando o manômetro não está em funcionamento, as duas colunas de Hg têm a mesma altura (h_0), como mostra a Figura 1. Isso acontece porque a pressão na superfície do líquido nos dois ramos é a mesma: é a pressão atmosférica (p_{atm}).

Gaspar encaixou o adaptador no bico do pneu, por onde o ar entra e sai. A Figura 2 mostra o que aconteceu:

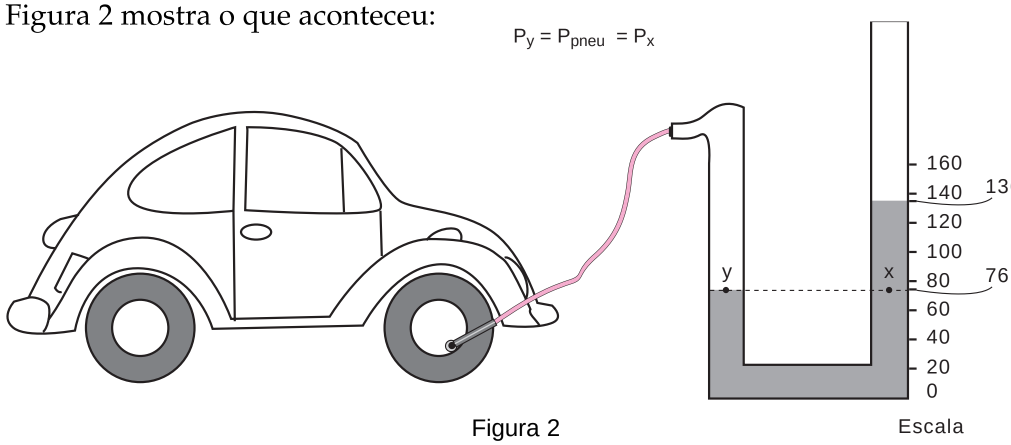


Figura 2

Observe que, quando a mangueira é ligada ao pneu, a coluna de Hg se desloca: no ramo menor, o Hg é empurrado para baixo e, conseqüentemente, sobe no ramo maior. Por que isso acontece?

Porque a pressão no interior do pneu é maior do que a pressão atmosférica e ela empurra o mercúrio até atingir o equilíbrio.

Usando o teorema de Stevin, estudado na Aula 19, é fácil ver que **dois pontos de um líquido, situados numa mesma profundidade têm a mesma pressão**, portanto a pressão no ponto indicado pela letra **y** é igual à pressão indicada pela letra **x** (ver a Figura 2).

A pressão no ponto y corresponde à pressão do gás no interior do pneu (p_{pneu}), e esta corresponde à pressão no ponto x. Assim:

$$p_y = p_{pneu} = p_x$$

Você já sabe calcular a pressão no interior de um líquido: **é a pressão atmosférica mais a pressão da coluna de líquido acima daquele ponto**.

Então, basta verificar usando a escala do manômetro a altura da coluna de Hg acima do ponto x e somá-la ao valor da pressão atmosférica, que é 76 cmHg.

Pela Figura 2 verificamos que a altura da coluna de Hg é 60 cm, que corresponde à pressão de 60 cmHg, portanto:

$$p_x = p_{atm} + p_{coluna}$$

Então, a pressão no interior do pneu do Gaspar era de:

$$p_{pneu} = p_x = 76 \text{ cmHg} + 60 \text{ cmHg}$$

$$p_{pneu} = 136 \text{ cmHg}$$

Para termos uma idéia melhor desse valor, vamos expressar essa medida em atmosferas, lembrando que 76 cmHg=1 atm. Basta fazer uma regra de três:

$$1 \text{ atm} \Rightarrow 76 \text{ cmHg}$$
$$p_{pneu} \text{ (atm)} \Rightarrow 136 \text{ cmHg} \text{ , logo,}$$

$$p_{pneu} = 1{,}8 \text{ atm}$$

Veja que essa pressão é quase o dobro da pressão atmosférica, ou seja, ela é 1,8 vez maior.

Entretanto essas unidades não são muito usadas para se calibrar pneus. Para esse fim, costuma-se usar duas outras unidades:

$$\boxed{\text{kgf/cm}^2} \quad \text{e} \quad \boxed{\text{libra/polegada}^2}$$

Observe que ambas têm a unidade formada por: uma unidade de força (kgf, libra) dividida por uma unidade de área (cm^2, pol^2). Isso funciona sempre: para saber qual a unidade de uma grandeza, basta olhar para as unidades das grandezas que a definem.

É importante conhecer a correspondência entre essas unidades e, para transformar uma na outra, basta utilizar a regra de três como fizemos acima.

$$\boxed{\mathbf{1\ atm = 14{,}2\ lb/pol^2 = 1\ kgf/cm^2 = 1{,}01 \cdot 10^5\ N/m^2 = 76\ cmHg}}$$

Como treino, verifique que a pressão nos pneus do carro de Gaspar é **aproximadamente**:

$$\boxed{p_{pneu} = 25{,}6\ \text{lb/pol}^2}$$

Um café, por favor

Após calibrar os pneus, Gaspar foi tomar um café. No balcão, ele observou que a máquina tinha um tubo externo, transparente, que também continha café.

Gaspar ficou curioso e perguntou ao rapaz do bar para que servia aquele tubo.

E ele descobriu que aquela máquina era uma aplicação daquilo que você aprendeu na aula passada sobre **pressão em líquidos**. A máquina utiliza o sistema que chamamos de **vasos comunicantes**. Esse sistema é formado por dois recipientes (ou vasos) que se comunicam pela base, como mostra a Figura 4:

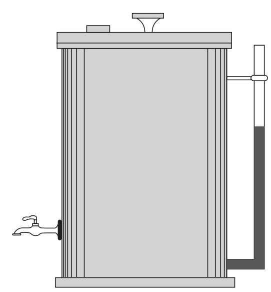


Figura 3. O tubo externo da máquina de café chamou a atenção de Gaspar.

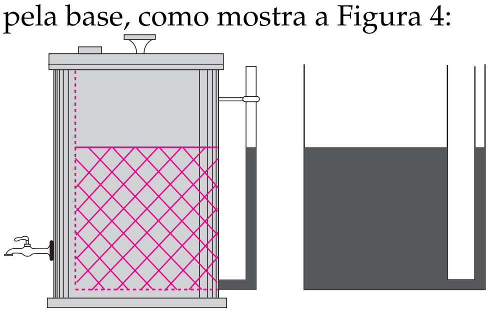


Figura 4. Como é a máquina de café vista por dentro.

Como o café está em equilíbrio e sujeito apenas à pressão atmosférica, a altura nos dois vasos é a mesma. Assim, é possível saber qual a quantidade de café existente no interior da máquina, sem precisar olhar lá dentro.

O interessante é que não importa a forma que esses dois vasos tenham: quando eles estiverem sujeitos à mesma pressão, a coluna de líquido nos dois vasos estará na mesma altura.

Um exemplo muito simples de um sistema desse tipo é a mangueira transparente, com água dentro, que os pedreiros usam nas construções para nivelar, por exemplo, duas paredes ou uma fileira de azulejos (veja a Figura 5).

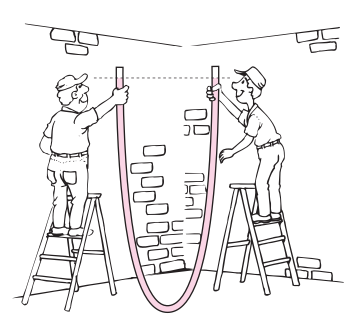


Figura 5

É também devido a essa propriedade que, para se obter uma forte pressão nos chuveiros, as caixas d'água devem ficar mais altas em relação ao ponto de saída da água (Figura 6).

A pressão da água no chuveiro será tanto maior quanto mais alta estiver a caixa d'água, pois a pressão nesse ponto é igual à pressão atmosférica mais a pressão da coluna de água, que, como sabemos, depende da altura da coluna de água acima daquele ponto.

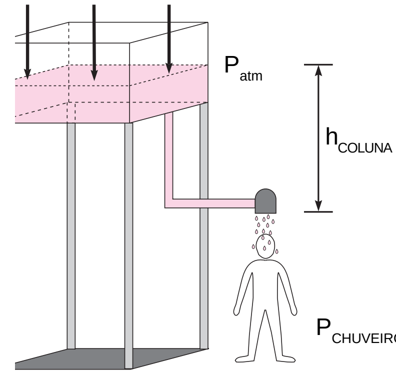


Figura 6. A caixa d'água deve ficar mais alta que o chuveiro.

Trocando o óleo

Gaspar posicionou o carro sobre a plataforma do elevador, que foi, em seguida, acionado: o carro subiu lentamente, mas com facilidade.

"Como é que isso funciona?" quis saber Gaspar.

"Para quem já conhece sobre pressão e vasos comunicantes não é difícil", respondeu o rapaz.

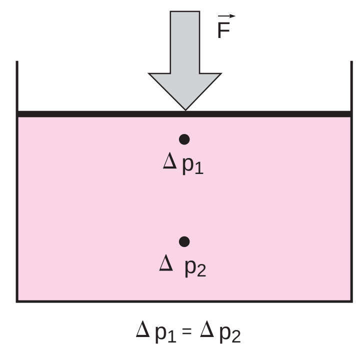


Figura 7. A variação de pressão no ponto 1 é transmitida ao ponto 2. Então, a variação de pressão 1é igual à variação de pressão 2.

Hoje é possível utilizar o elevador hidráulico graças a um cientista francês chamado Blaise Pascal, que, em 1653, descobriu por meio de experiências, que:

Quando, por alguma razão, alteramos a pressão em um ponto de um líquido, essa variação de pressão é transmitida para todos os outros pontos do líquido.

Essa propriedade dos líquidos é hoje conhecida como o **princípio de Pascal**.

O elevador hidráulico é, basicamente, um sistema de vasos comunicantes. É formado por dois recipientes cilíndricos comunicantes, contendo um líquido, normalmente óleo. Em geral, esses recipientes são fechados com um pistão. Uma característica **muito importante** desse sistema é que a **área da superfície de um dos pistões** é bem maior que a do outro, como mostra a Figura 8.

Ao exercermos uma força f no pistão 1 (menor), que tem área **a**, provocamos um aumento de pressão no interior do líquido, dado por:

$$Dp_1 = \frac{f}{a}$$

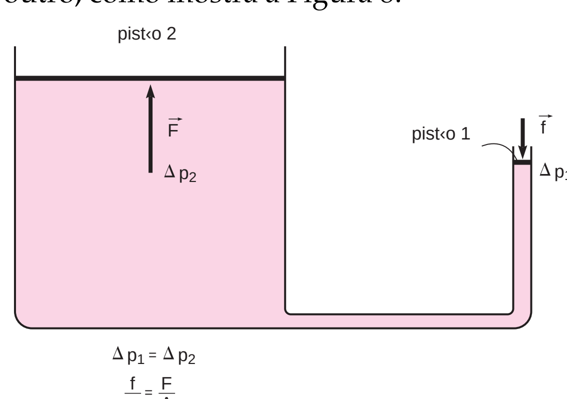


Figura 8

De acordo com o princípio de Pascal, esse aumento é transmitido igualmente a todos os pontos do líquido, o que provoca o aparecimento de uma força F no pistão 2 (maior). Sendo A a área desse pistão, o aumento de pressão sobre ele será:

$$\Delta p_2 = \frac{F}{A}$$

Como o aumento de pressão é o mesmo, podemos igualar essas duas expressões, obtendo assim:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2$$

$$\frac{F}{A} = \frac{f}{a}$$

então, a força que aparece no pistão maior será:

$$F = \left(\frac{A}{a}\right) \times f$$

Logo, como A>a, a força será aumentada.

Observe o carro do Gaspar sobre o elevador: conhecendo as áreas dos dois pistões e o peso do carro do Gaspar, vamos calcular a força necessária para levantá-lo.

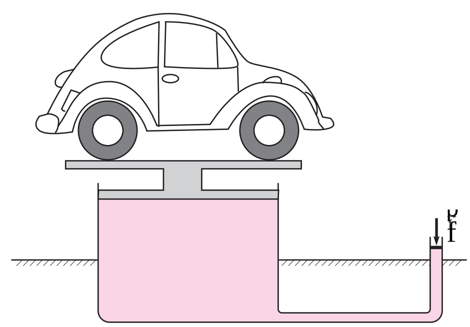


Figura 9. Graças ao Princípio de Pascal, o carro pode ser erguido sem grande esforço.

Seja o peso do carro 800 kgf, a área do pistão maior 2.000 cm^2 e a do menor, 25 cm^2. Então, a força que precisamos fazer no outro pistão será:

$$f = \left(\frac{a}{A}\right) \times F = \left(\frac{25}{2.000}\right) \times 800 = 0{,}0125 \cdot 800 = 10 \text{ kgf}$$

Apenas 10 kgf! Isso equivale a dois pacotes de arroz de 5 kg. Então, é possível, com o elevador hidráulico, equilibrar um carro com apenas **dois** pacotes de arroz! Isso não é incrível?

A força que fazemos no pistão menor é multiplicada por um fator que depende da relação entre as áreas dos pistões. Esse fator é dado por **A/a**. Por isso, dizemos que esse equipamento é um **multiplicador de forças**. O princípio de utilização do elevador hidráulico é o mesmo utilizado em alguns tipos de cadeiras de dentista, na prensa hidráulica e também nos freios hidráulicos dos automóveis.

A prensa hidráulica funciona como o elevador, mas é utilizada para comprimir e compactar objetos (Figura 10).

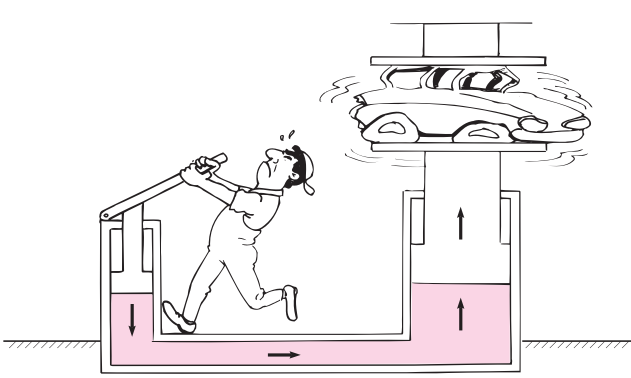


Figura 10

Verificando os freios

O sistema de freios hidráulicos dos automóveis também utiliza esse princípio: a força que aplicamos no pedal é aumentada várias vezes, sendo então utilizada para comprimir as lonas do freio contra o tambor, nas rodas traseiras. Observe a Figura 11.

Por isso, é muito importante verificar o fluido do freio pois, sem ele, quando pisamos no freio, nada acontece, pois, não há como transmitir a força que irá comprimir as lonas contra o tambor, nas rodas traseiras, que por atrito faz com que elas parem.

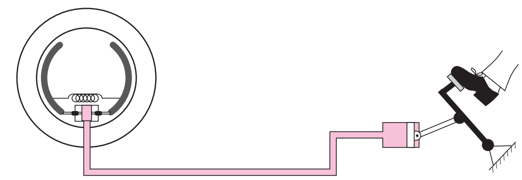


Figura 11

Veja que interessante: é o atrito entre a lona e o tambor da roda que faz o carro parar. É por isso que, em algumas situações, sentimos um cheiro forte de queimado. A lona é feita de uma fibra especial e o calor gerado pelo atrito queima esse material. Por isso, é bom substituir as lonas periodicamente.

PARA TERMINAR

Nesta aula, você aprendeu:

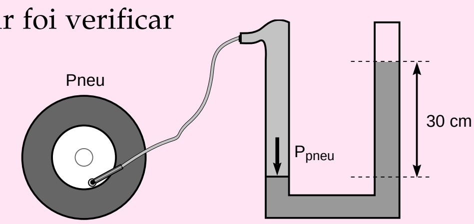
- algumas aplicações da **lei de Stevin**: manômetro, vasos comunicantes;
- que existe um aparelho, o **manômetro,** utilizado para medir a pressão de gases e qual o seu princípio de funcionamento;
- que existe um sistema, chamado **vasos comunicantes**, cuja aplicação é muito útil no dia-a-dia (máquina de café, construções, caixas d'água);
- que muitos equipamentos que utilizamos se baseiam no **princípio de Pascal**, que fala sobre a transmissão da variação da pressão no interior de um líquido, cujo efeito final é a multiplicação de forças.

Mãos à obra

Exercício 1

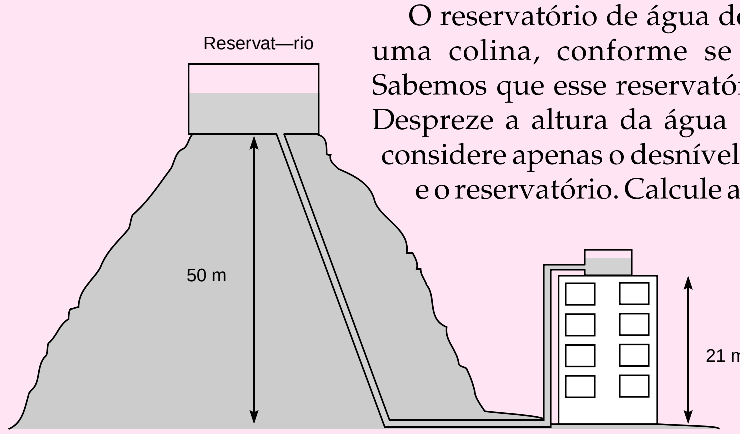
Após calibrar os quatro pneus, Gaspar foi verificar também o reserva (estepe). A figura abaixo mostra o que ele observou no manômetro.

Qual era o valor da pressão no interior do estepe? Dê o resultado em atm, lb/pol^2, e kgf/cm^2.



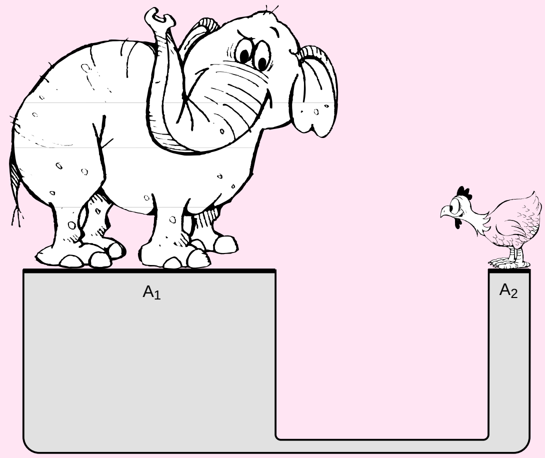
Exercício 2

O reservatório de água de uma cidade fica sobre uma colina, conforme se vê na figura abaixo. Sabemos que esse reservatório fica a 50 m do chão. Despreze a altura da água dentro da caixa, isto é, considere apenas o desnível entre a caixa do edifício e o reservatório. Calcule a pressão com que a água chega à caixa de um edifício, que está a 21 metros do chão, sabendo que a densidade da água é de 1.000 kg/m^3.



Exercício 3

Um elefante e uma galinha estão equilibrados sobre um elevador hidráulico, conforme mostra a figura.



a) Sendo o peso do elefante 16.000 N e o da galinha 20 N, calcule qual deve ser a relação entre as áreas das superfícies sobre a qual eles estão, isto é, quanto vale A1/A2?

b) Suponha que a área onde está apoiada a galinha (A2) seja 10 cm^2. Qual deverá ser a área onde está o elefante (A1)?

AULA

21

Eureca!

PARA COMEÇAR

Ao subir a serra, de volta para casa, Gaspar avistou o mar! Aquela imensidão azul! Como estavam próximos a uma região portuária, viu vários navios aguardando para entrar no porto.

"Alberta, olhe quantos navios! A maioria deles carrega grandes e pesadas cargas, veja só como são enormes! Devem pesar toneladas!"

"É verdade! Eu sempre me pergunto: como é que eles conseguem boiar? Por que não afundam?"

"Eu não sei explicar" disse Gaspar.

E você? Também já teve essa dúvida? Sabe como é que os navios, que pesam várias toneladas, conseguem boiar?

Fique ligado

Nesta aula, vamos investigar a Física que existe por trás desse fenômeno e, então, seremos capazes de explicá-lo. Para isso, vamos utilizar alguns conhecimentos adquiridos nas últimas aulas.

Com a mão na massa

Para realizar esta atividade, você vai precisar de:

- um recipiente com água;
- uma rolha de garrafa.

Coloque a rolha no recipiente com água. O que você observa?

Agora, com o dedo, tente empurrá-la para baixo, isto é, tente afundá-la. O que você observa?

Você deve ter sentido uma resistência, uma dificuldade, ao tentar afundar a rolha, como se algo empurrasse a rolha para cima.

Se você levar a rolha até o fundo e depois soltá-la, verá que sobe imediatamente. De fato, para que a rolha suba, é preciso que haja uma força que a empurre para cima.

Mas que força é essa? E como ela surge?

Na aula passada, vimos o que é pressão e como ela se relaciona com força ($p = F/A$). Além disso, vimos como ela se comporta no interior dos líquidos: **a pressão aumenta com a profundidade**.

Observe a Figura 1: uma rolha mergulhada num líquido. Note que a rolha se estende por uma certa região do líquido.

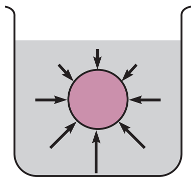


Figura 1

Podemos pensar nela como se fosse formada por vários pedaços: cada um mergulhado numa profundidade diferente.

Lembre-se de que a pressão é o resultado da aplicação de uma força sobre uma **superfície**. Vamos estudar as forças que atuam nas diferentes partes do corpo. Sabemos que a força é diretamente proporcional à pressão: logo, **a força é maior onde a pressão é maior**.

Na Figura 1 as setas indicam as forças que atuam nas diferentes partes do corpo. Note que o tamanho da seta indica a intensidade da força naquele ponto.

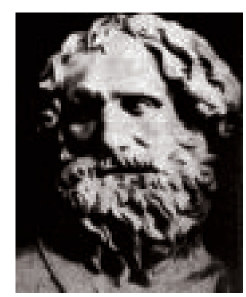
Observe que as forças que atuam na parte de baixo do objeto, isto é, aquelas que tendem a empurrar o objeto para cima, são maiores do que as que tendem a empurrar o objeto para baixo. Somando todas essas forças, vemos que existe uma **força resultante** que tem a **direção vertical** e o **sentido para cima**. Essa força é o **empuxo** e é ele que empurra para cima os corpos mergulhados nos líquidos, inclusive a nossa rolha.

Se a pressão não variasse com a profundidade, todas as forças seriam iguais e se anulariam, portanto, a resultante seria zero e não haveria empuxo.

Então, um corpo pode boiar graças ao empuxo. Mas não são todos os corpos que bóiam, quando colocados num líquido. Por exemplo: um tijolo bóia na água? E um pedaço de madeira? Veremos adiante como calcular o empuxo recebido por um corpo e em que condições um corpo bóia ou afunda.

Como calcular o empuxo?

Foi o filósofo e matemático grego Arquimedes, que viveu no século III a.C., quem descobriu, a partir de experiências cuidadosas, como calcular o empuxo. Arquimedes expressou as conclusões de suas observações num princípio que conhecemos como o **princípio de Arquimedes**, e que diz o seguinte:



Arquimedes: filósofo e matemático grego

Todo corpo mergulhado num líquido recebe um empuxo vertical, para cima, cujo valor é igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo.

Então, para calcular o valor do empuxo exercido sobre um corpo, basta calcular o peso do líquido deslocado pelo corpo.

Portanto, quanto mais líquido o objeto deslocar, maior será o empuxo.

Podemos obter a expressão matemática para calcular o empuxo sobre um corpo. Dissemos que o empuxo (E) é igual ao peso do líquido deslocado ($P_{líq}$):

$$E = P_{líq}$$

O peso é igual ao produto da sua massa, pela aceleração da gravidade. Portanto: $P_{líq} = m_{líq} \cdot g$; assim: $E = m_{líq} \cdot g$

Não é muito conveniente medir a massa do líquido deslocado pelo corpo. Um jeito seria encher o recipiente até a borda, mergulhar o corpo, recolher a água que transborda e colocá-la numa balança. Pouco prático, não é mesmo?

Existe uma maneira indireta de saber qual foi a massa deslocada. Na aula passada, discutimos o conceito de **massa específica**. Vimos que massa específica, também chamada de **densidade,** é uma grandeza que relaciona a massa de um corpo e o seu volume:

$$\boxed{d = m/V} \quad \text{ou} \quad \boxed{m = d \cdot V}$$

Assim, no lugar da massa do líquido deslocado, podemos utilizar o produto da densidade do líquido (obtida numa tabela) pelo volume deslocado (V_d).

Você pode estar se perguntando: será que é preciso recolher a água e medir o seu volume?

Não! Com o volume é mais simples. Primeiro, podemos utilizar um recipiente que contenha uma graduação (em mililitros, por exemplo), de modo que, para saber o volume de líquido deslocado, basta verificar o nível do líquido antes e depois de mergulhar o objeto.

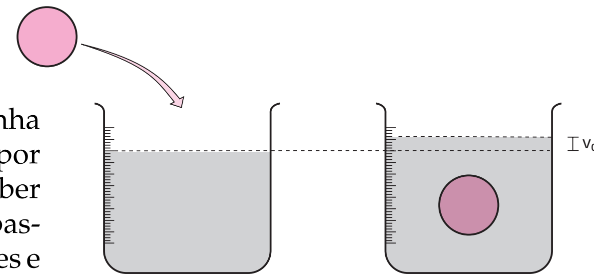


Figura 2. Pela alteração do nível do líquido sabemos o volume deslocado.

Note que o volume de líquido deslocado é igual ao volume do objeto imerso, isto é, mergulhado no líquido. Portanto, uma outra maneira de conhecer o volume de líquido deslocado é a partir do volume do objeto imerso.

Utilizando m = d . V, o empuxo será dado por:

$$\boxed{E = d_{líq} \cdot V_d \cdot g}$$

Então, o valor do empuxo será tanto maior quanto maior for a densidade do líquido e quanto maior for o volume de líquido deslocado.

Sobe, desce ou fica parado?

Nem todos os objetos que colocamos num líquido se comportam da mesma forma: alguns afundam, outros ficam na superfície, outros, descem um pouco e param no meio do líquido.

Quando é que cada uma dessas situações acontece? Quando um objeto é mergulhado num líquido, fica sujeito a duas forças: ao seu próprio **peso** e ao **empuxo**.

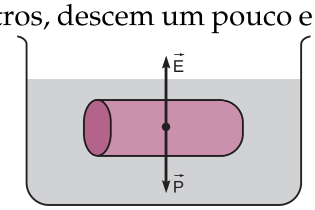


Figura 3

Para saber o que ocorre com o objeto, precisamos estudar a relação entre as forças que agem sobre ele. Podem ocorrer três situações distintas:

P > E P = E P < E

Na tabela abaixo, está um resumo que explica o que ocorre em cada uma das três situações:

	TABELA 1	
Situação	Descrição	Exemplo
P > E	O peso do objeto é maior do que o empuxo: o objeto afunda até atingir o fundo.	Uma pedra ou um tijolo na água.
P = E	O peso do objeto é igual ao empuxo: o objeto fica parado onde foi abandonado.	Um submarino.
P < E	O peso do objeto é menor que o empuxo: o objeto sobe no líquido.	Uma rolha ou um navio na água.

Prevendo situações

Existe uma maneira de saber se um objeto vai afundar ou não num determinado líquido.

Como vimos, o empuxo depende de três grandezas:

- do volume de líquido deslocado;
- da densidade do líquido;
- da aceleração da gravidade.

Isto é: $\boxed{\mathbf{E = d_{líq} \cdot V_d \cdot g}}$

Por outro lado, o peso do objeto ($P_o = m_o \cdot g$) pode ser escrito em função:

- do seu volume;
- da sua densidade;
- da aceleração da gravidade.

Isto é: $\boxed{\mathbf{P = d_o \cdot V_o \cdot g}}$

onde a massa foi escrita como: $m_o = d_o \cdot V_o$

Podemos comparar essas duas expressões, tal como fizemos na seção anterior (Tabela 1). Teremos novamente três situações:

$P > E$ $\qquad$ $P = E$ $\qquad$ $P < E$

Vamos supor que o objeto está totalmente imerso no líquido e, que, portanto:

$$\boxed{V_{líq} = V_O}$$

Então, as duas expressões: $E = d_{líq} \cdot V_d \cdot g$ e $P = d_o \cdot V_o \cdot g$ só diferem quanto às densidades, isto é, quanto aos valores de $d_{líq}$ e d_o.

Vamos analisar os três casos.

P > E

1º – Vimos que o objeto afunda. Nesse caso, $d_o > d_{líq}$, isto é, o objeto é mais denso que o líquido. É o exemplo do tijolo e da pedra.

P = E

2º – Vimos que o objeto permanece parado, em equilíbrio, na posição onde foi deixado, totalmente imerso no líquido. Nesse caso, temos $d_o = d_{líq}$, isto é, a densidade do objeto é igual à densidade do líquido. É o exemplo do submarino.

P < E

3º – Vimos que o corpo sobe até atingir o equilíbrio na superfície, ficando com uma parte para fora do líquido (emersa). Olhando as expressões, teremos $d_o < d_{líq}$. Portanto, se a densidade do objeto for menor do que a densidade do líquido, ele poderá boiar. É o caso do navio e da rolha.

Assim, conhecendo a densidade do líquido e do objeto, podemos prever o que ocorrerá quando o objeto for mergulhado no líquido. Esta tabela resume as nossas conclusões:

TABELA 2

Forças	Densidade	Situação
P > E	$d_o > d_{líq}$	O objeto afunda
P = E	$d_o = d_{líq}$	O objeto fica equilibrado totalmente imerso.
P < E	$d_o < d_{líq}$	O objeto bóia com uma parte emersa.

Você sabia?

Eureca é uma palavra grega que significa: “achei”. Segundo consta, ela foi empregada por Arquimedes quando ele solucionou o problema da coroa do rei Hieron. O rei suspeitava que sua coroa não era de ouro puro, e Arquimedes foi incumbido de solucionar o caso. Arquimedes teria achado a solução do problema enquanto tomava banho, ao observar a elevação do nível da água, quando mergulhou seu corpo na banheira. Ele teria ficado tão entusiasmado que saiu correndo pelas ruas, gritando: “Eureca! Eureca!”. Só que se esqueceu de pegar a toalha!

PARA TERMINAR

Nesta aula, você aprendeu:

- o que é **empuxo** (E): uma força vertical, dirigida para cima, que aparece sempre que um corpo está mergulhado num fluido qualquer;
- que o empuxo surge em conseqüência do fato de a pressão **variar com a profundidade** no interior de um líquido;
- o **Princípio de Arquimedes**, que nos diz: “Todo corpo mergulhado em um líquido recebe um empuxo vertical, para cima, igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo”;
- que, **matematicamente**, o empuxo se escreve como $E = d_{líq} \cdot g \cdot V_{deslocado}$;
- que é possível **prever** o que ocorrerá com um corpo quando ele for mergulhado num certo líquido, apenas analisando as suas densidades.

Mãos à obra

Exercício 1

Uma pedra está mergulhada num rio, apoiada sobre o seu leito. Você se abaixa e levanta, mas sem tirá-la da água.

a) Faça um esquema mostrando as forças que agem sobre a pedra.

b) Ela lhe parecerá mais leve ou mais pesada do que se estivesse fora da água? Explique.

Exercício 2

Um tronco está boiando na superfície de um lago. Metade do tronco fica para fora da água, e a outra metade fica imersa. O volume do tronco é 1 m^3. Considere a densidade da água do lago como sendo de 1.000 kg/m^3.

a) Faça um esquema indicando as forças que agem sobre o tronco.

b) Calcule o valor do empuxo recebido pelo tronco.

c) Qual o seu peso? E qual a sua massa?

d) Calcule a densidade do material que compõe o tronco.

Exercício 3

A massa de um objeto é 80 g e o seu volume 100 cm^3.

a) Calcule a sua densidade.

b) Sabendo que a densidade da gasolina é 0,70 g/cm^3, e a densidade da água 1,00 g/cm^3, verifique o que acontece quando o objeto é mergulhado em cada um desses líquidos.

Exercício 4

Por que um navio pode boiar? O que podemos dizer sobre a densidade média do navio, quando comparada com a densidade da água do mar?

Gabarito das aulas 1 a 21

Aula 2 - A culpa é da barreira!

1. São grandezas físicas: ***calor, energia, trabalho, temperatura, força e aceleração***. Não são grandezas físicas: ***cansaço, rapidez, curiosidade, honestidade, pontualidade e coragem***.
   Observação: As palavras ***calor, energia, trabalho e força*** denominam grandezas físicas, mas são utilizadas também no cotidiano com diferentes significados. Portanto, podem ser ou não grandezas físicas, dependendo do sentido que cada um dá ao termo.
2. I- **a)** 0,03m; **b)** 0,0025 m; **c)** 800 m; **d)** 0,36576 m; **e)** 0,1143 m; **f)** 18,288 m; **g)** 804.500 m.
   II- **a)** 5.000 mm; **b)** 400 mm; **c)** 300 cm; **d)** 120 cm; **e)** 0,150 km; **f)** 180 km.
   III- **a)** 0,012 kg; **b)** 20.000 kg; **c)** 22,7 kg.
   IV- **a)** 700 g; **b)** 8.200 g; **c)** 0,300 t; **d)** 630 t.
   V- **a)** 90 s; **b)** 8.100 s; **c)** 19.333 s.
   VI- **a)** 0,5m^3; **b)** 69.000 cm^3.
3. **a)** 76,2 mm; **b)** 172,72 mm; **c)** 6,35 mm; 7,9375 mm.
4. Não, porque a unidade de velocidade é km/h e não km. Na placa deveria estar escrito: "velocidade máxima 80 km/h".
5. 38,43 mm.
6. 3,78432 X 1018m ou 3.784.320.000.000.000.000 m.

Aula 3 - Bola pra frente!

1. O deslocamento do carro foi de 160 km e o tempo gasto para isso foi 2 h.

$$v_{\text{média}} = \frac{Dx}{Dt} = \frac{160\ \text{km}}{2\ \text{h}} = 80\ \text{km / h}$$

O deslocamento pode ser escrito: então, $\Delta x = v_{\text{média}}\ \ \Delta t$, então, em 4 horas o deslocamento será:
$\Delta x = 80 \cdot 4 = 320$ Km
Por outro lado, $Dt = \dfrac{Dx}{v_{\text{média}}}$. então, para um deslocamento de 400 km, o tempo gasto será:

$$Dt = \frac{400\ \text{km}}{80\ \text{km / h}} = 5\ \text{h}$$

2. O gráfico mostra que a posição no instante zero vale 60 m. Por outro lado, no instante t = 6 s, vale 120 m. Então, a velocidade média vai ser:

- $v_{média} = \frac{Dx}{Dt} = \frac{120\ m - 60\ m}{6\ s - 0\ s} = \frac{60\ m}{6\ s} = 10\ m / s$

  então a função horária da posição será: $x = 60 + 10 \cdot t$
- Fazendo-se t = 10 s, teremos, na função horária:
  $x = 60 + 10 \cdot 10 = 160$ m
- Fazendo–se x = 180 m, teremos, na função horária:
  $180 = 60 + 10 \cdot t$
  $180 - 60 = 10 \cdot t$
  $120 = 10 \cdot t$
  $t = 12$ s

3. A velocidade é dada diretamente no gráfico 10 cm/s. A área do retângulo nos fornece o deslocamento.
Área = (base) · (altura) = (20 s – 4 s) · 10 cm/s = 16 s · 10 cm/s = 160 cm

4. Para determinarmos a função horária, precisamos, inicialmente, calcular a velocidade média. Escolhendo-se os instantes t = 2 s, e t = 4 s, teremos:

$v = v_{média} = \frac{25\ m - 15\ m}{4\ s - 2\ s} = \frac{10\ m}{2\ s} = 5\ m / s$

Nesse caso, a Tabela 7 não nos fornece, diretamente, o valor da posição no instante t = 0, ou seja x_0. Porém, podemos usar, mais uma vez, a definição de velocidade média e fazer:

$v_{média} = \frac{20 - x_0}{3 - 0} = 5$

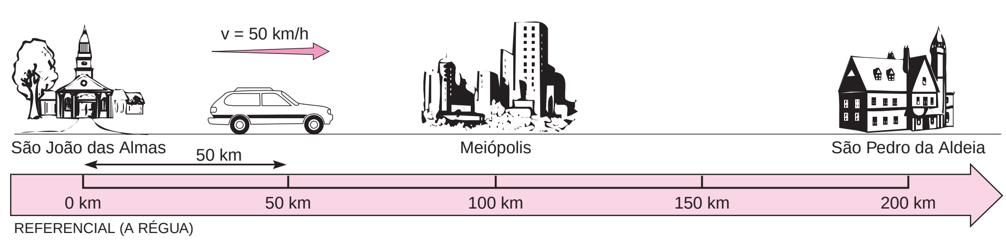
$20 - x_0 = 15$

$-x_0 = 15 - 20$

$x_0 = 5$

Então a função horária vai ficar: $x = 5 + 10 \cdot t$
No instante t = 12 s, teremos: $x = 5 + 10 \cdot 2 = 125$ m
Para a posição x = 80 m, teremos:
$80 = 5 + 10 \cdot t$
$80 - 5 = 10 \cdot t$
$75 = 10 \cdot t$
$t = 7{,}5$ s

5.



Usando o referencial que apresentado na Figura 19, podemos ver que:
$x_0 = 50$ km e $v = 50$ km/h
Então, a função horária vai ser: $x = 50 + 50\ t$
Como Meiópolis está na posição x = 100 km, teremos: $100 = 50 + 50 \cdot t$
$100 - 50 = 50 \cdot t$
$50 = 50 \cdot t$
$t = 1$ h

Por outro lado, São Pedro está na posição x = 200 km, então,
$200 = 50 + 50 \cdot t$
$200 - 50 = 50 \cdot t$
$150 = 50 \cdot t$
$t = 3$ h
Vai chegar depois de 3 horas.

Aula 4 - Acelera Brasil!

1. Para os dois veículos, o gráfico a X t é uma reta, paralela ao eixo do tempo, para o Duna ela corta o eixo da aceleração no valor $a = 2\ m/s^2$ e para o Copa no valor $a = 3\ m/s^2$

2. a) A posição inicial pode ser obtida substituindo-se o tempo (t), por zero na função horária da posição. Ou basta lembrar que o termo que independe de t, nessa função, é o valor inicial da posição, e vale portanto 100 m.
$x = 100 + 2 \cdot (0) + 2 \cdot 0^2 \quad \rightarrow \quad x = 100$ m
b) A velocidade inicial do trem é 20 m/s. Basta lembrar que v_0 é o número que multiplica o t.
c) A aceleração também pode ser obtida diretamente da equação: ela é duas vezes o valor que multiplica o t^2. Assim $a = 4\ m/s^2$.
d) Para saber a posição do trem num instante qualquer, basta substituir o valor de t na equação, portanto para $t = 45 \quad \rightarrow \quad x = 212$ m.

3. A função horária da posição é em geral escrita como: $v = v_0 + at$. Nesse problema, o valor de $v_0 = 20$ m/s e $a = 4\ m/s^2$. Portanto a função será: $v = 20 + 4\,t$ no instante $t = 5$ s e a velocidade será $v = 40$ m/s.

4. **a)** É fácil verificar que a velocidade varia, pois em $t = 0s \rightarrow v = 1$ m/s e em $t=10s \rightarrow v = 21$ m/s.
Deve-se também observar que o gráfico v X t é uma *reta*, o que indica que a velocidade varia sempre da mesma forma, tratando-se pois de um movimento retilíneo uniformemente variado (MRUV).
b) $v_0 = 1$ m/s
c) basta calcular $\frac{Dv}{Dt}$, obtendo o valor a = 2 m/s2
d) $v = 1 + 2t$.

5. **a)** $x = x_0 + v_0 + \frac{1}{2}at^2$ isto é, $x = 100 + 1t + 1t^2$
b) Basta substituir na equação horária das posições o t por 5, obtendo assim $x = 130$ m.

Aula 5 - Tudo que sobe, desce

1. Inicialmente fazemos um esboço da situação, definindo referencial e sistema de coordenadas.

A pergunta do problema é "Qual é o tempo de subida do tijolo?". Com o esboço, podemos construir a equação horária do movimento, pois sabemos a posição inicial do tijolo e o tempo que ele leva para chegar ao primeiro andar. Assim:

$$y = y_0 + v_0 + \frac{1}{2}gt^2$$

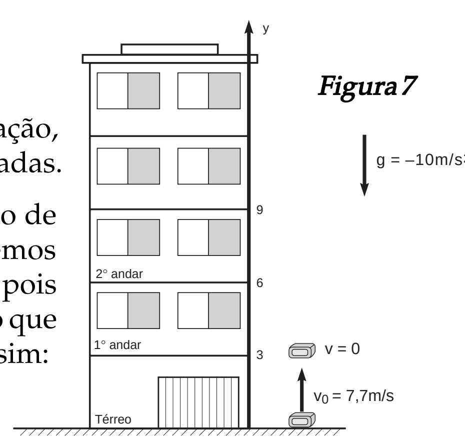


Figura 7

substituindo essas informações na equação de posição:

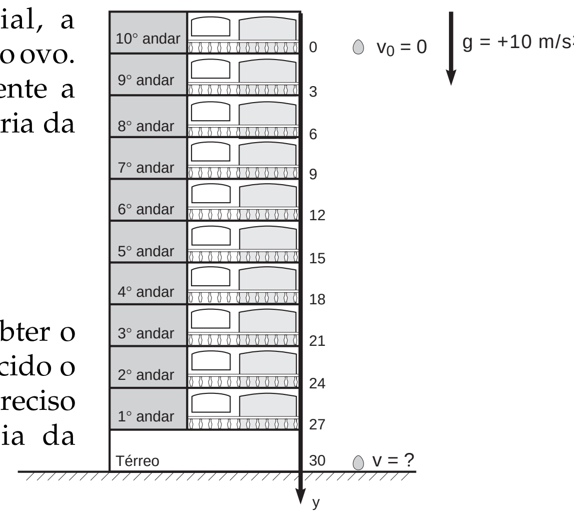
$3 = 0 + 7{,}7\ t - 5t^2$

o tempo de subida será:

$t \cong 0{,}77$ s

É possível resolver o mesmo problema, usando a função horária da velocidade:
$v = v_0 + at$
$0 = 7{,}75 - 10t$
$t \cong 0{,}77$ s

2. Inicialmente, fazemos um esboço da situação, definindo referencial e sistema de coordenadas (ver figura).



São conhecidas a velocidade inicial, a aceleraçao (g), a posição inicial e final do ovo. A primeira função que usa diretamente a velocidade no MRUV é a função horária da velocidade.

$v = v_0 + at$
usando nossa informação
e o referencial defindo no esboço
$v = 0 + 10t$

Com essa expressão, não é possível obter o valor da velocidade, pois não é conhecido o tempo de queda do ovo. Então é preciso calculá-lo, usando a função horária da posição:

$$y = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} gt^2$$

usando nossa informação: $30 = 0 + 0 + 5t^2$
Assim podemos calcular o tempo de queda: t @ 2,5 s
Com esse valor voltamos à função horária da velocidade e calculamos a velocidade final do ovo:

$v = 10 \cdot 2{,}5 = 25$ m/s

Que seria uma velocidade bastante alta, podendo causar um sério acidente.

3. Inicialmente, faremos um esboço da situação, definindo referencial e sistema de coordenadas (ver figura).

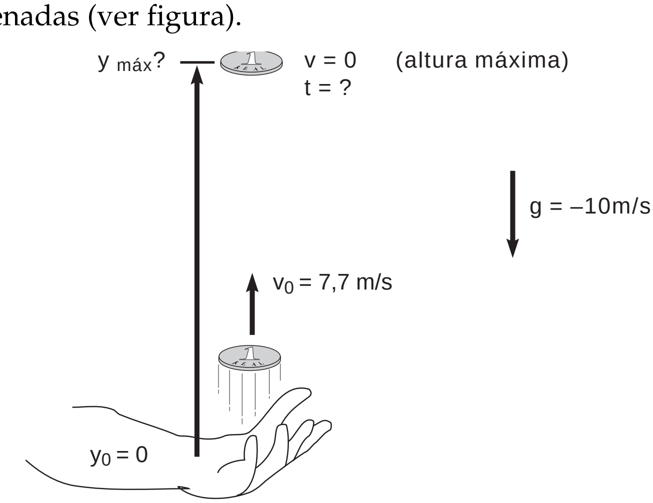


Figura 9

Neste problema, pede-se a altura máxima da moeda e o tempo de subida e descida. Sabemos o valor da velocidade inicial (v_0) e da aceleração (g).

Para obter a altura máxima, usamos a função horária da posição:

$$y = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} gt^2$$

que se transforma em

$$y = 0 + 10t - 5t^2$$

Mais uma vez, para descobrirmos a altura máxima, precisamos do tempo que a moeda demorou para chegar lá. Para isso, usamos uma informação que não foi dita no problema, mas que é fundamental ter na memória: **a velocidade no ponto mais alto é zero**. Com esta informação podemos usar a função horária da velocidade:

$$v = v_0 + at$$

ou seja, $0 = 10 - 10t$

que nos dá o tempo de subida da moeda

$$t = 1 \text{ s}$$

Com essa informação, podemos voltar à equação horária da posição e calcular a altura máxima:

$$y_{max} = 10(1) - 5(1)^2 = 5 \text{ m}$$

Para descobrirmos o tempo total de subida e descida, lembramos que tudo o que sobe desce e no mesmo tempo. Tentão temos mais uma informação que sempre precisamos lembrar: que o tempo de subida é igual ao tempo de descida, ou seja, o tempo total de subida e descida será $t \cong 2$ s

Podemos mostrar isso usando a própria equação horária da posição:

$$0 = 0 + 10t - 5t^2$$

$$t = 2 \text{ s}$$

4. Quem cairá primeiro: o ovo ou a galinha? Aqui é necessário saber se a resistência do ar é desprezível ou não; se não for desprezível, obviamente a galinha baterá suas asas, o que amortecerá sua queda, enquando que o ovo cairá quase em queda livre. Mas, se a resistência do ar for desprezível, ou seja, se Ernesto estiver na Lua, onde não há atmosfera, certamente o ovo e a galinha teriam caído juntos. Essa é uma típica experiência muito rara de ser observada.

Aula 6 - Empurra e puxa

1. Quando penduramos dois ovos na mola, estamos exercendo, aproximadamente, uma força de 1 newton na mesma. Nessa situação, a deformação vale 2 cm.

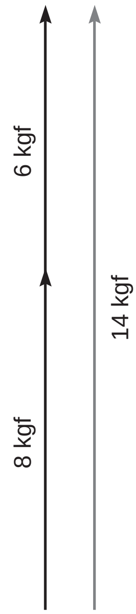
a) Temos: $k = \dfrac{F}{Dx} \quad \Rightarrow \quad k = \dfrac{1 \text{ newton}}{2 \text{ cm}} = 0{,}5 \text{ N / cm}$

b) $Dx = \dfrac{F}{k} = \dfrac{12 \text{ newtons}}{0{,}5 \text{ N / cm}} = 24\text{cm}$

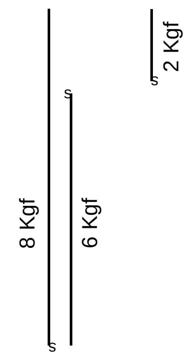
c) $F = k \cdot \Delta x = 0{,}5 \cdot 24 = 12 \text{ N}$

2.

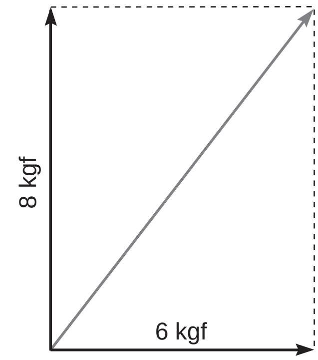
a)



b)



c)

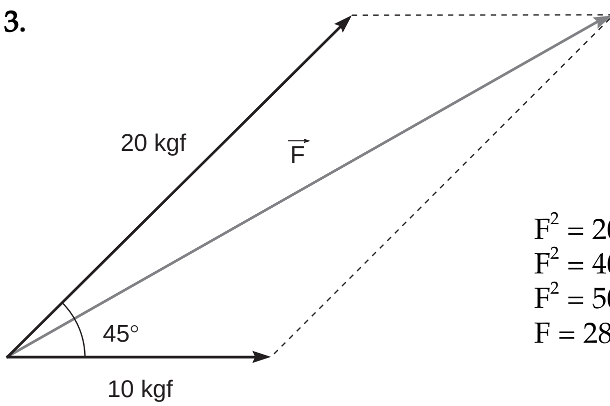


$F^2 = 8^2 + 6^2$

$F^2 = 64 + 36 = 100$

$F = 10$ Kgf

3.



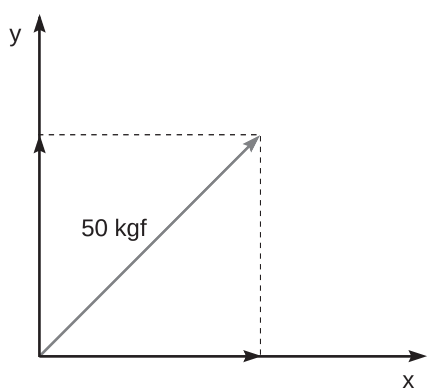
$F^2 = 20^2 + 10^2 + 2 \cdot 20 \cdot 10 \cdot \cos 45^\circ$

$F^2 = 400 + 100 + 400 \cdot 0{,}71$

$F^2 = 500 + 284$

$F = 28$ kgf

4.



$F_x = F \cdot \cos 45^\circ = 50 \cdot 0{,}71 = 35{,}5$ Kgf

$F_y = F \cdot \text{sen}\ 45^\circ = 50 \cdot 0{,}71 = 35{,}5$ Kgf

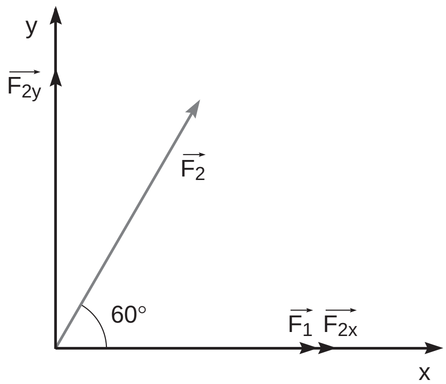
5.

a) $F^2 = 30^2 + 50^2 + 2 \cdot 30 \cdot 50 \cdot (0{,}5)$

$F^2 = 900 + 2.500 + 1.500 = 4.900$

$F = 70$ kgf

b) Vamos colocar a força $\vec{F}_1$ no eixo dos X.



$F_{1X} = F_1 \qquad F_{1Y} = 0$
$F_{2X} = F_2 \cdot \cos 60^o = 50 \cdot 0,5 = 25$ kgf
$F_{2Y} = F_2 \cdot \text{sen } 60^o = 50 \cdot 0,87 = 43,3$ kgf

$F_X = F_{1X} + F_{2X} = 30 + 25 = 55$ kgf

$F_Y = F_{1Y} + F_{2Y} = 0 + 43,3 = 43,3$ kgf

$F_2 = F^2{}_X + F^2{}_Y = (55)^2 + (43,3)^2 \approx 4.900$

$F = 70$ kgf

Aula 7 - Um momento, por favor

1. Chamando-se de M_1 o momento da força quando ela é aplicada no ponto situado a 15 cm do centro da porca e de M_2 o momento quando a distância é 45 cm, teremos:
$M_1 = 100 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m} = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$
$M_2 = 100 \text{ N} \cdot 0,45 \text{ m} = 45 \text{ N} \cdot \text{m}$

2. $M_F = F \cdot d \cdot \text{sen } 30^o$
$M_F = 60 \text{ N} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,5$
$M_F = 15 \text{ N} \cdot \text{m}$

3. Como a caixa tem uma massa de 8 kg, seu peso é 8 kgf. Uma vez que o peso da barra é desprezível, as duas únicas forças que irão agir serão o peso da caixa e a força $\vec{F}$. Para haver equilíbrio, a soma dos momentos dessas forças com relação à um ponto (por exemplo o ponto onde a barra se apoia no suporte), deve ser nula. Então, chamando-se de M_C o momento do peso da caixa, e de M_F o momento da força $\vec{F}$, e admitindo que o sentido horário é o positivo, ficaremos com:

$$M_C - M_F = 0$$

ou então,

$$M_C = M_F$$

$$8 \text{ kgf} \cdot 0,2 \text{ m} = F \cdot 1 \text{ m}$$

$$F = \frac{8 \text{ kgf} \times 0,2 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 1,6 \text{ kgf}$$

Dessa maneira, vê-se que precisamos apenas de uma força de 1,6 kgf, do outro lado da barra. Isso corresponderia a colocar, naquela extremidade, um bloco de massa igual a 1,6 kg.

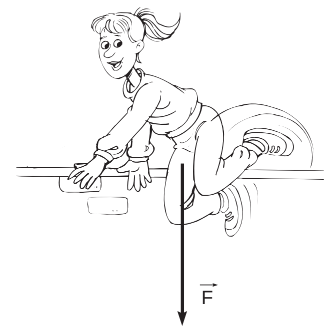
Aula 8 - Eu tenho a força! Será?

1. Temos a impressão de que somos jogados para frente porque, quando o ônibus freia, se não estivermos nos segurando em alguma parte, não teremos "motivo" para parar, ou seja, continuaremos nosso movimento anterior, devido à propriedade de inércia. É fundamental que estejamos nos segurando em alguma parte do ônibus para que sejamos desacelerados junto com ele.

2. Para calcular a força-peso, ou seja, a força de atração que a Terra faz sobre a menina, usamos a Segunda Lei deNewton:

$F_{atração} = ma = 45 \times 10 = 450$ N

que corresponde valor da força Peso.



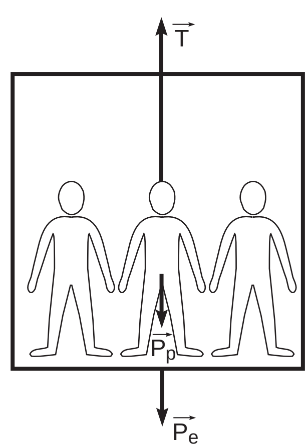
3. Quando empurramos um carro, sabemos que ele também exerce em nós, uma força igual, mas de sentido contrário. O carro anda para frente porque nós estamos fazendo uma força no solo e esse faz uma força de mesma intensidade e sentido contrário em nós. Essa força que o solo exerce em nós é maior que a força que o solo faz no carro, fazendo com que ele se movimente no sentido em que estamos empurrando.

4. Nesse caso, usaremos novamente a Segunda Lei de Newton para calcular a força resultante do caminhão:

$$F_{resultante} = ma = 5.000 \times 5 = 25.000 \text{ N}$$

Aula 9: Como erguer um piano sem fazer força

1.
1° passo - Isolamento.



2° passo - Equações dinâmicas

$$R_{elevador} = T - (P_{elevador} - P_{passageiros}) = (m_{elevador} + m_{passageiros}) \times a$$

$$R_{elevador} = 9.900 - 9.000 = 900 \times a$$

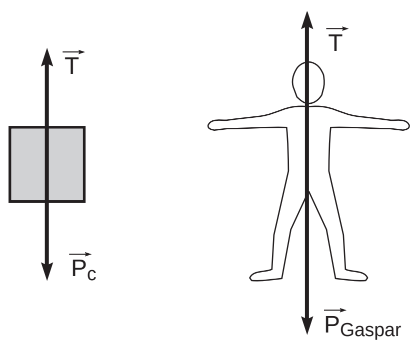
3º passo - solução

$$a = \frac{900}{900} = 1 \ m/s^2$$

2. O custo se reflete no tamanho da corda, pois à medida que vamos colocando roldanas no sistema, existe a necessidade de que o comprimento da corda vá aumentando, e talvez o tempo necessário para levantar o objeto comece a aumentar muito também, pois a corda terá um comprimento muito grande quando colocarmos várias roldanas! É preciso balancear o uso da força que será usada na tarefa com o tempo que se quer gastar com tal tarefa.

3.

1º passo - Isolamento.



2º passo - Equações dinâmicas

$R_{caixa} = m_{caixa} \cdot a = P_{caixa} - T$
$R_{Gaspar} = m_{Gaspar} \cdot a = T - P_{Gaspar}$

Com isso, teremos que

3º passo - Solução

$120 \cdot a = 1.200 - T$
$80 \cdot a = T - 800$

Aqui temos duas equações e duas incógnitas.

Solução do sistema dinâmico

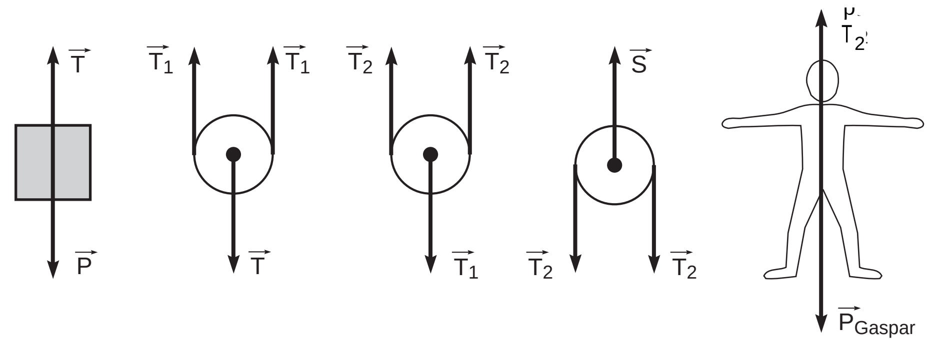
Podemos resolver esse sistema somando cada lado da igualdade.

$120 \cdot a + 80 \cdot a = 1.200 - T + T - 800$

$200 \cdot a = 400$

$a = 2 \ m/s^2$

Gabarito do exercício proposto durante a aula:
Isolamento.



Equações dinâmicas

$R_{pacote} = m_{pacote} \times a = 0 = T - P_{pacote}$

$R_{roldana\ 1} = m_{roldana\ 1} \times a = 0 = T_1 + T_1 - T$

$R_{roldana\ 2} = m_{roldana\ 2} \times a = 0 = T_2 + T_2 - T_1$

$R_{roldana\ 3} = m_{roldana\ 3} \times a = 0 = S - T_2 - T_2$

$R_{Gaspar} = m_{Gaspar} \times a = 0 = P_{Gaspar} - T_2$

Solução do sistema dinâmico

$T = P_{pacote} = m_{pacote} \times g = 1000\ N$

$2\ T_1 = T$ Þ $T_1 = \dfrac{T}{2} = 500\ N$

$2\ T_2 = T_1$ Þ $T_2 = \dfrac{T_1}{2} = 250\ N$

Ou seja, a força que Gaspar faria (T_2) é um quarto do peso do feno.

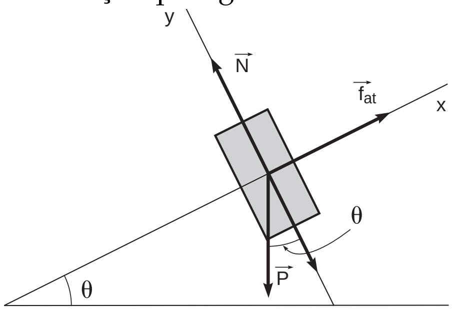
Aula 10 - Ou vai ou racha!

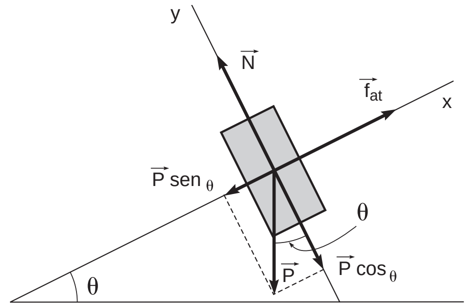
1. Se a lataria dos automóveis fosse muito lisa, ou seja, não tivesse alguma rugosidade, a tinta dificilmente se prenderia na lataria, escorreria e não se fixaria. Por isso, é preciso que a lataria dos automóveis não seja absolutamente lisa, para que a tinta possa se fixar. Mas ela não pode ser muito rugosa, pois nesse caso, muita tinta ficaria presa na lataria e haveria um desperdício muito grande de tinta. É necessário que a rugosidade da lataria do automóvel seja exata para que a tinta absorvida esteja na quantidade adequada.

2. Para resolver problemas com Leis de Newton, usamos os três passos recomendados:

a) *Isolamento*

As forças que agem sobre a caixa são:





- O peso (P), que está sempre apontando para o solo.
- A força normal, que ***sempre está perpendicular*** à superfície sobre a qual a caixa está em contato.
- E a força de atrito ***que sempre aponta para o sentido contrário à tendência do movimento***, ou seja, se a caixa tende a deslizar para baixo, a força de atrito aponta para cima, no sentido de impedir o movimento.

Vamos então para o segundo passo:

b) *Equações dinâmicas*

Sabemos que a caixa não vai se mover no sentido do eixo y, o que nos leva à seguinte equação:

$$N - P\cos\theta = 0$$

e, no eixo x, supondo que o objeto está prestes a se mover, ou seja, que a força de atrito nesse momento é máxima, teremos:

$$P\,\text{sen}\,\theta - F_{at} = 0$$

Ou seja, podemos saber quanto vale tanto a força normal, quanto a força de atrito.

c) *Solução das equações dinâmicas*

Podemos escrever então:

$$N = P\cos\theta \quad \text{e} \quad F_{at} = P\,\text{sen}\,\theta$$

Calculamos o ângulo máximo de inclinação, usando a equação que relaciona a força de atrito e a força normal.

$$F_{at} = \mu \cdot N\text{, temos } \mu = \frac{F_{at}}{N} = \frac{P\,\text{sen}\,\theta}{P\cos\theta} = \text{tg}\,\theta$$

$$\mu = \text{tg}\,\theta$$

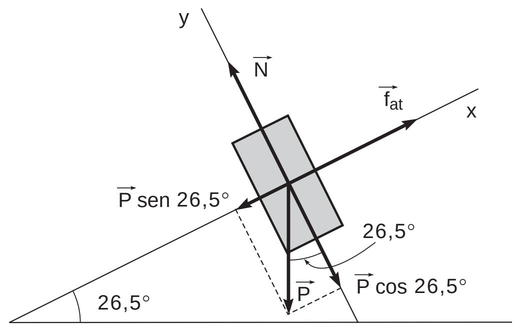
Portanto, o valor do coeficiente de atrito estático é igual à tangente do ângulo de inclinação do plasso. Sabemos que $\mu = 0{,}5$ e, consultando uma tabela,vemos que o ângulo cuja tangente é 0,5 é de 26,5º. Essa operação é feita com o auxílio de uma máquina de calcular, usando a função inversa da tangente, que é o arco tangente (arctan (0,5) = 26,5º).

Com isso, conseguimos saber o valor de todas as forças envolvidas no problema e determinar o ângulo para o qual a caixa começa a deslizar sobre a rampa.

3. Vamos realizar os três passos para resolver problemas de Dinâmica:

a) *Isolamento*

Como podemos ver na Figura, temos as seguintes forças:



- O Peso (P), que está sempre apontando para o solo.
- A Força normal, que ***sempre está perpendicular*** à superfície sobre a qual a caixa está em contato.
- E a força de atrito ***que sempre aponta para o sentido contrário à tendência do movimento***, ou seja, se a caixa tende a deslizar para baixo, a força de atrito aponta para cima, no sentido de impedir o movimento.

Vamos ao segundo passo:

b) *Equações dinâmicas*

Como no exercício anterior, sabemos que a caixa não vai se mover no sentido do eixo y, temos então:

$$N - P \cos q = 0$$

e, no eixo x, o operário obteve o ângulo para o qual a caixa está prestes a se mover, ou seja, ***força de atrito nesse momento é máxima***.

$$P \text{ sen } q - F_{at} = 0$$

Com as equações, vamos ao terceiro passo:

c) *Solução das equações dinâmicas*

$$N = P \cos q = mg \cos q = 100 \cdot 10 \cdot \cos (26{,}5^{\circ})$$
$$N = 8.949 \text{ N}$$

e

$$F_{at} = P \text{ sen } q = mg \text{ sen } q = 100 \cdot 10 \cdot \text{sen } (26{,}5^{\circ})$$
$$F_{at} = 4.462 \text{ N}$$

como

$$F_{at} = \mu \cdot N$$

$$\mu \cdot N = 4.462 \text{ Þ } m = \frac{4.462}{8.949} \text{ Þ } m = 0{,}5$$

Como podemos ver, esse exercício é quase o mesmo que o anterior, mas, nesse caso, em vez de fornecermos o coeficiente de atrito estático para obtermos o ângulo, fornecemos o ângulo para obter o coeficiente de atrito estático.

Aula 11 - Vamos dar uma voltinha?

1. **a)** $f = 1.200 \# 60 = 20$ Hz

b) $\omega = 2\pi f = 2\,\pi \cdot 20 = 40\,\pi$ rad/s @ 126 rad/s

c) $v = \omega r = 40\,\pi \cdot 0{,}15$ @ 18,8 m/s

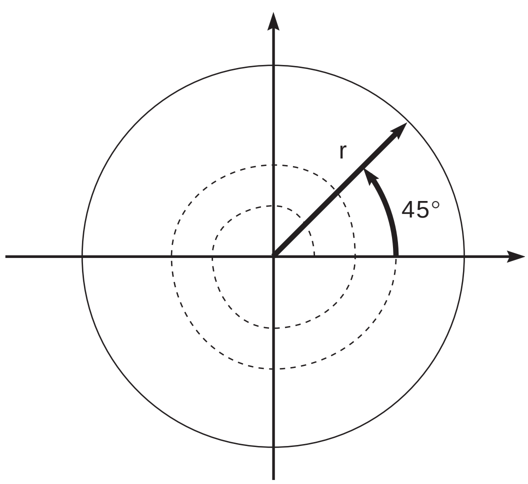
d) $a = \omega^2 r = (40\,\pi)^2 \cdot 0{,}15 = 1.600 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}15 = 240\,\pi^2$ @ 2.368,7 m/s^2

e) $r_1 f_1 = r_2 f_2 \Rightarrow 15 \cdot 1.200 = r_2 \cdot 400 \Rightarrow r_2 = 45$ cm

2.

$$v = \frac{2pr}{T} = \frac{2\ p \cdot\ 10^6}{2\ \cdot\ 3.600} = \frac{14\ p \cdot\ 10^6}{7.200} = 1.944\,\pi \text{ m/s @ } 6.100 \text{ m/s}$$

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(6.100)^2}{7\ \cdot\ 10^6} \text{ @}5{,}3 \text{ m/s}^2$$



3. **a)** $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{4}$ Hz $= 0{,}25$ Hz

b) $\omega = 2\,\pi f = 2\,\pi \cdot 0{,}25 = 0{,}5\,\pi$ rad/s

c) $\varphi = \varphi_0 + \omega t \Rightarrow \varphi = 0 + 0{,}5\,\pi t \Rightarrow \varphi = 0{,}5\,\pi t$

d) $\varphi = 0{,}5\,\pi \cdot 8{,}5 = 4{,}25\,\pi$ rad $= 4{,}25 \cdot 180^\circ = 765^\circ =$

$2 \cdot 360^\circ + 45^\circ = 2$ voltas $+ 45^\circ$ (ver Figura 16)

4. $F = ma \Rightarrow F = 70 \cdot 5{,}3 = 371$ N

5. $$F_{atrito} = F_{centrípeta} = \frac{m\ v^2}{r} = \frac{(800\ \cdot\ 202)}{100} = 3.200 \text{ N}$$

6. $$\text{tg } 45^\circ = \frac{P}{F_C} = \frac{mg}{\frac{m\ v^2}{r}} = \frac{r\ g}{v^2} \Rightarrow \text{tg } 45^\circ = \frac{r\ g}{v^2} \Rightarrow v^2 = \frac{r\ g}{\text{tg } 45^\circ} = \frac{2{,}5 \cdot\ 10}{1} = 25$$

$\Rightarrow v = 5$ m/s

7. $$\text{tg } \alpha = \frac{F_C}{P} = \frac{\frac{mv^2}{r}}{mg} = \frac{v^2}{rg} = \frac{20^2}{100\ \cdot\ 10} = 0{,}4 \Rightarrow \text{tg } \alpha = 0{,}4 \Rightarrow \alpha = \text{arc tg } (0{,}4) \text{ @}24^\circ$$

Aula 12 - Por que não flutuamos?

1. Aceleração da gravidade na Terra aproximadamente 9,8 m/s^2 ; aceleração da gravidade na Lua aproximadamente 1,6 m/s^2.
2. Peso do Gaspar na Terra, aproximadamente 784 N (newtons); peso do Gaspar na Lua, aproximadamente 128 N.
3. A força ficaria 4 vezes menor.
4. A força de atração entre os sacos de açúcar é de, aproximadamente, $6{,}7 \times 10^{-11}$ N. O peso de cada saco é 10 N; portanto, para saber a relação entre eles, basta dividir uma força pela outra: 10 N # $6{,}7 \times 10^{-11}$, que é, aproximadamente, $1{,}5 \times 10^{11}$ N, isto é, a força com que a Terra atrai o saco é 150.000.000.000 de vezes maior do que a força com que um saco atrai o outro.

Aula 13 - Chocolate, energia que alimenta

1. A energia cinética do atleta, durante a corrida, transforma-se em energia potencial elástica da vara, quando se verga. A energia potencial elástica da vara se transforma em energia potencial gravitacional ao elevar o atleta e fazer com que ele ultrapasse o sarrafo.
2. A energia solar transforma a água em vapor. O vapor sobe, ganhando energia potencial gravitacional; quando se resfria, transforma-se em água e gelo e cai novamente, e a energia potencial se transforma em energia cinética das gotas de chuva.
3. A energia potencial gravitacional da água se transforma em energia cinética, ao descer pela tubulação. Essa energia cinética é transferida às turbinas do gerador, que a transforma em energia elétrica.
4. A energia química da pilha se transforma em energia elétrica, que, no carrinho, transforma-se em energia cinética, luminosa e sonora.
5. A energia cinética dos ventos é transferida para as pás do moinho. Por intermédio do moinho, ela se transforma em energia potencial da água, à medida que sobe do fundo do poço.

Aula 14 - O trabalho cansa?

1. $\tau_1 = F_1 \cdot d \cdot \cos a_1 \Rightarrow \tau_1 = 100 \cdot 5 \cdot \cos 0^\circ = \mathbf{500\ J}$
$\tau_2 = F_2 \cdot d \cdot \cos a_2 \Rightarrow \tau_2 = 100 \cdot 5 \cdot \cos 60^\circ = \mathbf{250\ J}$
$\tau_3 = F_3 \cdot d \cdot \cos a_3 \Rightarrow \tau_3 = 100 \cdot 5 \cdot \cos 120^\circ = \mathbf{-250\ J}$
$\tau_4 = F_4 \cdot d \cdot \cos a_4 \Rightarrow \tau_4 = 100 \cdot 5 \cdot \cos 180^\circ = \mathbf{-500\ J}$
$\tau_5 = F_5 \cdot d \cdot \cos a_5 \Rightarrow \tau_5 = 100 \cdot 5 \cdot \cos 90^\circ = \mathbf{0}$

2. a) $E_{C\ inicial} = \frac{1}{2} m v_o^2 \Rightarrow E_{C\ inicial} = \frac{1}{2} \cdot 1.200 \cdot 40^2 = 960.000\ J$

b) $E_{C\ f} = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow E_{C\ f} = \frac{1}{2} \cdot 1.200 \cdot 10^2 = 60.000\ J$

c) $\tau_F = E_{C\ final} - E_{C\ inicial} = 60.000 - 960.000 = -900.000\ J$

d) $\tau_F = F \cdot d \cdot \cos \alpha \Rightarrow -900.000\ J \Rightarrow F \cdot 100 \cdot \cos 180^\circ = -900.000$
$F \cdot 100 \cdot (-1) = -900.000 \Rightarrow F = 9.000\ N$

3. $W_{(parede)} = \Delta E_{C\ (bala)} \Rightarrow \quad F_R \cdot 0{,}10 \cdot \cos 180^o = 0 - \frac{1}{2} \cdot 0{,}05 \cdot 400^2$

$F_R \cdot 0{,}10 \cdot (-1{,}0) = -(4.000) \Rightarrow \mathbf{F_R = 40.000\ N}$

4. $P = Fv \Rightarrow 60 \cdot 735{,}5 = 1.471 \cdot v \Rightarrow \mathbf{v = 30\ m/s}$

5. $P_{útil} = \frac{W_{util}}{\Delta t} \Rightarrow W_{útil} = E_{C\ final} - e_{C\ inicial} = \frac{1}{2} \cdot 1.000 \cdot 30^2 - 0 = 450.000\ J$

$P_{útil} = 450.000 \div 10 = 45.000\ W = 45.000 \div 735{,}5 = 61$ cv (aproximadamente)

$r = \frac{P_U}{P_T} \times 100\% \Rightarrow 25\% = \frac{61}{P_T} \times 100\% \Rightarrow P_T = 244$ cv

Aula 15 - Quanto mais alto o coqueiro, maior é o tombo

1. $EP_{(cozinha)} = mgh_{cozinha} = 5 \times 10 \times 1{,}8 = 90\ J$
   $EP_{(térreo)} = mgh_{(cozinha\ +\ térreo)} = 5 \times 10 \times 31{,}8 = 1.590\ J$

2. $P = W/\Delta t \Rightarrow$ Para $\Delta t = 1{,}0\ s \Rightarrow W = E_P = mgh = 60 \times 10 \times 12 = 7.200\ J$
   $P = W \div \Delta t \Rightarrow P = 7.200 \div 1{,}0 \Rightarrow P = 7.200\ W$

3. $E_{fornecida\ pelos\ alimentos} = 100\ g \cdot 400\ \frac{cal}{g} = 100\ g \cdot 400 \cdot \frac{4{,}2\ J}{g}$

   $E_{fornecida\ pelos\ alimentos} = 168.000\ J$

Aula 16 - Conservação, o xis da questão!

1. O Barco Viking, quando está no ponto mais alto de sua trajetória, tem uma altura de 20 metros e está com velocidade zero. Nós queremos saber qual é a velocidade do barco no ponto mais baixo da trajetória. Como o sistema é conservativo, pois estamos desprezando a força de atrito, a energia mecânica se conserva, ou seja, podemos escrever:

$\Delta E_m = 0$

$E_{m\ final} - E_{m\ inicial} = 0$

$(E_{C\ final} + E_{p\ final}) - (E_{C\ inicial} + E_{p\ inicial}) = 0$

$$\left(\frac{1}{2} mv_{final}^2 + mgh_{final}\right) - \left(\frac{1}{2} mv_{inicial}^2 + mgh_{inicial}\right) = 0$$

Nesse caso, chamaremos de *situação inicial* o momento em que o barco está no ponto mais alto da trajetória, e de *situação final*, o momento em que o barco está no ponto mais baixo da trajetória. Substituindo os valores dados e considerando que, no início, a velocidade era zero e a altura 20 m e no final a altura será zero e a velocidade é o que queremos descobrir:

$$\left(\frac{1}{2} mv_{final}^2 + m \times 10 \times 0\right) - \left(\frac{1}{2} m \times 0^2 + m \times 10 \times 20\right) = 0$$

O fato de não conhecermos a massa do barco não é problema, pois, como todos os termos da equação estão multiplicados pelo valor da massa e a equação é igual a zero, podemos dividir os dois membros da equação pelo valor da massa, fazendo com que ela desapareça da equação, ou seja, não é necessário conhecer a massa do barco.

$$\frac{1}{2}\, m v_{final}^{2} - m \times 10 \times 20 = 0$$

$$\frac{1}{2}\, v_{final}^{2} - 200 = 0 \Rightarrow v_{final}^{2} = 400$$

$$v_{final} = 20 \text{ m/s}$$

Essa é a velocidade que o barco terá no ponto mais baixo de sua trajetória.

2. Como o atrito do ar é desprezível, a energia mecânica se conserva, ou seja:

$$\Delta E_M = 0$$

$$E_{m\,f} - E_{m\,i} = 0$$

$$(E_{C\,final} + E_{P\,final}) - (E_{C\,inicial} + E_{P\,inicial}) = 0$$

$$\left(\frac{1}{2} m v_{final}^{2} + mgh_{final}\right) - \left(\frac{1}{2} m v_{inicial}^{2} + mgh_{inicial}\right) = 0$$

Agora, substituindo os valores que já conhecemos na equação:

$$\frac{1}{2} m \times 0 + m \times 10 \times 3 - \frac{1}{2} m v_{inicial}^{2} - m \times 10 \times 0 = 0$$

$$v^{2}_{\ inicial} = 30 \cdot 2 = 60$$

chegamos ao resultado:

$$v_{\ inicial} \cong 7{,}75 \text{ m/s}$$

que é a velocidade mínima necessária para que o tijolo chegue até às mãos do pedreiro que está no segundo andar.

3. Como não há atrito, usamos a expressão da conservação da energia mecânica de sistemas conservativos, ou seja

$$\Delta E_M = 0$$

$$E_{m\,final} - E_{m\,inicial} = 0$$

$$(E_{c\,final} + E_{p\,final}) - (E_{c\,inicial} + E_{p\,inicial}) = 0$$

Só que, nesse caso, a energia potencial não é do tipo gravitacional e sim do tipo elástica.

Sabemos que toda energia cinética se transforma em energia potencial elástica, pois o lutador veio correndo e se atirou contra as cordas, esticando-as até atingirem sua máxima distensão. Nesse momento, a energia cinética é nula. Vamos tomar, como momento inicial, o instante em que o lutador está com velocidade de 5 m/s e, como final, o instante em que as cordas estão esticadas e o lutador com velocidade zero; como não há atrito, a energia mecânica se conserva, isto é,

$$\Delta E_M = 0$$

$$(0 + E_{P\ \text{elástica}}) - \left(\frac{1}{2} m v_{\text{inicial}}^2 + 0\right) = 0$$

Assim a energia potencial elástica armazenada na corda será:

$$E_{P\ \text{elástica}} = \frac{1}{2} m v_{\text{inicial}}^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times 5^2$$

$$E_{P\ \text{elástica}} = 1.125 \text{ Joules}$$

4. Neste exercício, sabemos que existe atrito entre a criança e o escorregador. Também nos é dado o valor do trabalho realizado pelo atrito. Sabemos que a energia mecânica não se conserva nesse caso e que sua variação é igual ao trabalho realizado pela força de atrito. Assim, podemos usar:

$$\Delta E_M = -600$$

$$E_{m\ \text{final}} - E_{m\ \text{inicial}} = -600$$

$$(E_{C\ \text{final}} + E_{P\ \text{final}}) - (E_{C\ \text{inicial}} + E_{P\ \text{inicial}}) = 600$$

$$\frac{1}{2} m v_{\text{final}}^2 + 0 - (0 + m \cdot g \cdot h_{\text{inicial}}) = -600$$

$$\frac{1}{2} 50 \times v_{\text{final}}^2 - 50 \cdot 10 \cdot 2 = -600$$

$$v_{\text{final}}^2 = \frac{2}{50}(1.000 - 600)$$

$$v_{\text{final}}^2 = 16$$

$$v_{\text{final}} = 4 \text{ m/s}$$

5. Se não houvesse atrito, a conservação da energia mecânica seria:

$$\Delta E_M = 0$$

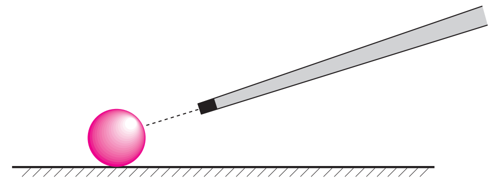
$$E_{m\ \text{final}} - E_{m\ \text{inicial}} = 0$$

$$(E_{C\ \text{final}} + E_{P\ \text{final}}) - (E_{C\ \text{inicial}} + E_{P\ \text{inicial}}) = 0$$

O que nos dá um valor para velocidade de 20 m/s, que é uma velocidade muito superior ao caso em que houve atrito.

Aula 17 - O momento do gol

1. Pela Figura, vê-se que a bola estava parada e adquiriu uma velocidade de 4 m/s. Como conhecemos o valor da massa dessa bola e quando sua velocidade variou, podemos aplicar a definição de impulso. E, como a bola vai na mesma direção da tacada, podemos calcular diretamente o módulo do impulso:



$I = \Delta q = m_{\text{bola}} \cdot v_{\text{final}} - m_{\text{bola}} \cdot v_{\text{inicial}} = 0{,}15 \cdot 4 - 0{,}15 \cdot 0 = 0{,}6\ \text{Ns}$
$I = 0{,}6\ \text{Ns}$

Conhecendo a duração do impacto, podemos calcular o valor da força exercida pelo taco na bola.

$I = F \cdot \Delta t = 0{,}6\ \text{Ns}$

Como o intervalo de tempo foi de 0,02 s temos então que

$$F = \frac{0{,}6}{Dt}\ \text{N} = \frac{0{,}6}{0{,}02} = 30\ \text{N}$$

$F = 30\ \text{N}$

2. Para saber a velocidade do Fusca, basta igualar as duas quantidades de movimento:

$q_{\text{fusca}} = q_{\text{caminhão}}$

$m_{\text{fusca}} \cdot v_{\text{fusca}} = m_{\text{caminhão}} \cdot v_{\text{caminhão}}$

$1.500 \cdot v_{\text{fusca}} = 7.500 \cdot 20$

$$v_{\text{fusca}} = \frac{150.000}{1.500}$$

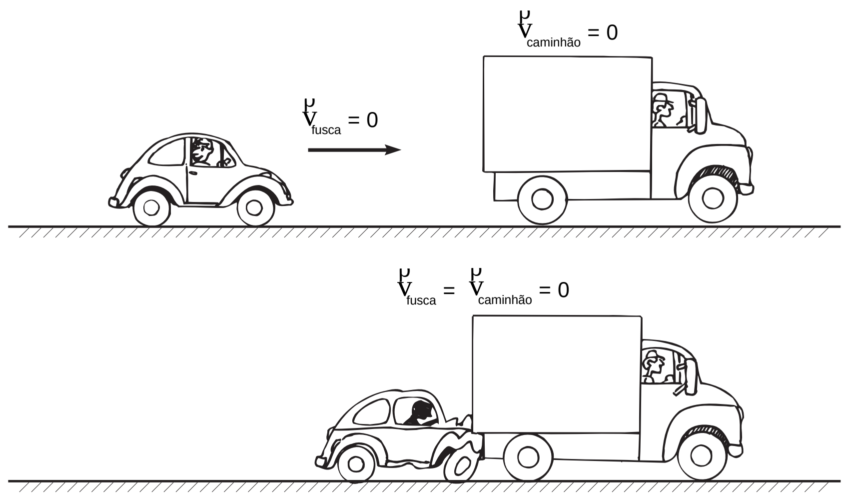
$v_{\text{fusca}} = 100\ \text{m/s}$

Ou seja, a velocidade do Fusca terá que ser muito alta, da ordem de:

$$v_{\text{fusca}} = 100\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 100 \times \frac{10^{-3}\ \text{km}}{\left(\frac{1}{3.600}\right)\text{h}} = 100 \times 3.600 \times 10^{-3} = 360\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

3. Para calcular o impulso recebido pelo caminhão, usamos a variação da quantidade de movimento (ver figura), já que conhecemos a massa do Fusca e a variação da sua velocidade.

$I = \Delta q = m_{\text{fusca}} \cdot v_{\text{final}} - m_{\text{fusca}} \cdot v_{\text{inicial}} = 1.500 \cdot 0 - 1.500 \cdot 10 = 15.000\ \text{Ns}$



A velocidade final do fusca, após o acidente, é zero e, antes do acidente, era 36 km/h, ou seja, 10 m/s.
Para calcular a força do impacto, usamos a definição de impulso:

$$I = F \cdot \Delta t$$

$$F = \frac{I}{\Delta t} = \frac{150.000\ Ns}{0,1\ s} = 1.500.000\ N = 15 \times 10^5\ N$$

que é uma força muito grande, equivalente a um peso de 150.000 kg, ou seja, 150 toneladas!

Aula 18 - Bola sete na caçapa do fundo

1. Podemos aplicar a conservação da quantidade de movimento a essa situação, pois estamos querendo saber qual é a velocidade da espingarda logo após o disparo. Então:

$$m_B \cdot v_{B\ depois} + m_E\,(-v_{E\ depois}) = m_B \cdot v_{B\ antes} + m_E \cdot v_{E\ antes}$$

$$0{,}01 \cdot 200 + 2\,(-v_{E\ depois}) = 0{,}01 \cdot 0 + 2 \cdot 0$$

$$v_{E\ depois} = -\frac{2}{2}$$

$$v_{E\ depois} = -1\frac{m}{s}$$

A velocidade da espingarda, depois do tiro, é de 1 m/s. Não esquecer que, como estamos tratando com vetores, o sentido do movimento é fundamental; então, como a bala e a espingarda tomam sentidos opostos, suas velocidades deverão ter sinais opostos.

2. Quando o pescador começa a andar para a esquerda, a canoa começa a se mover para a direita. Podemos então considerar que, inicialmente, a velocidade, tanto da canoa como do pescador, era zero. Como a canoa deslizou suavemente sobre a superfície lisa do lago, podemos considerar o atrito desprezível; ou seja, na ausência de forças externas que interfiram no movimento da canoa e do pescador, podemos usar a conservação da quantidade de movimento:

$m_C \cdot v_{C\ depois} + m_P \cdot v_{P\ depois} = m_C \cdot v_{C\ antes} + m_P \cdot v_{P\ antes}$

Essa será, então, a velocidade da canoa depois que pescador começou a andar. Não esquecer que, como estamos tratando com vetores, o sentido do movimento é fundamental; então, como o pescador e a canoa tomam sentidos opostos, suas velocidades deverão ter sinais opostos.

$90 \cdot v_{C\ depois} + 60 \cdot (-0{,}5) = 90 \cdot 0 + 60 \cdot 0$

$90 \cdot v_{C\ depois} = 30$ Þ $v_{C\ depois} = \frac{30}{90} \cong 0{,}3\ m/s$

3. Podemos usar a conservação da quantidade de movimento, pois não há ação de nenhuma força externa ao sistema (foguete + combustível). Assim, temos que:

$m_F \cdot v_{F\ depois} + m_C \cdot v_{C\ depois} = m_F \cdot v_{F\ antes} + m_C \cdot v_{C\ antes}$

$5.000\ v_{F\ depois} + 500(-100) = 5.000 \times 0 + 500 \times 0$

$5.000\ v_{F\ depois} - 5.000 = 0$

$v_{F\ depois} = \frac{5.000}{5.000}$

$v_{F\ depois} = 1\ m/s$

que é a velocidade do foguete, após a queima do combustível. Não esquecer que, como estamos tratando com vetores, o sentido do movimento é fundamental; então como o foguete e a chama tomam sentidos opostos, suas velocidades deverão ter sinais opostos.

Aula 19 - O ar está pesado

1. A altura da coluna seria 10 vezes menor.

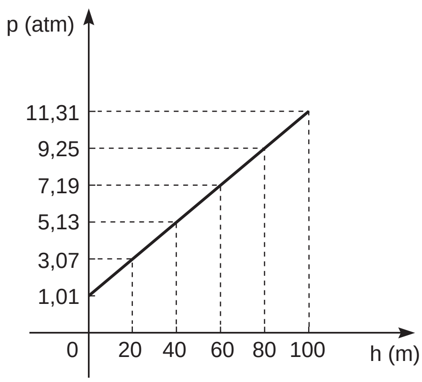
2. **a)** 53 cmHg;
b) aproximadamente 0,7 atm;
c) $0{,}7 \times 10^5\ N/m^2$ ou $7{,}0 \times 10^4\ N/m^2$.

3. **a)** Volume $1.000\ cm^3$, peso 15 N, densidade $1{,}5\ g/cm^3$ ou $1{,}5 \cdot 10^3\ kg/m^3$;
b) basta dividir o peso pela área de cada face: $A_A = 50\ cm^2$ ou $5 \cdot 10^{-3}\ m^2$ e $p_A = 3.000\ N/m^2$,
$A_B = 100\ cm^2$ ou $1 \cdot 10^{-2}\ m^2$ e $p_B = 1.500\ N/m^2$
$A_C = 200\ cm^2$ ou $2 \cdot 10^{-2}\ m^2$
$p_C = 750\ N/m^2$.

4. a)

h (m)	p (N/m^2)	p (atm)
0	$1,01 \times 10^5$	1,01
20	$3,07 \times 10^5$	3,07
40	$5,13 \times 10^5$	5,13
60	$7,19 \times 10^5$	7,19
80	$9,25 \times 10^5$	9,25
100	$11,31 \times 10^5$	11,31

b)



c) O resultado é uma reta, pois a pressão varia linearmente com a profundidade do líquido.

Aula 20 - No posto de gasolina

1. A altura da coluna h = 30 cm, portanto, a pressão será:

$$p = p_{atm} + p_{coluna} = 76 \text{ cmHg} + 30 \text{ cmHg} = 106 \text{ cmHg}.$$

Fazendo uma regra de três simples, obtém-se facilmente p = 19,8 lb/pol^2 que é, aproximadamente, 1,40 kgf/cm^2.

2. Basta medir o desnível entre as duas caixas, que é 29 metros. Portanto a pressão com que a água chega à caixa do edifício será igual à pressão da coluna de água mais a pressão atmosférica que está acima dela.

$$P = P_{atm} + dgh = 1{,}01 \cdot 10^5 + 1.000 \cdot 10 \cdot 29 = 3{,}9 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ ou } 3{,}9 \text{ atm}$$

3. a) Pelo Princípio de Pascal, a variação de pressão é igual nos dois pistões. Assim, o peso da galinha ($P_{galinha}$) vai provocar uma variação de pressão no líquido, variação essa que dá origem a uma força capaz de segurar o elefante e, portanto, igual a seu peso($P_{elefante}$). Dessa forma, podemos escrever:

$\Delta p_{elefante} = \Delta p_{galinha}$

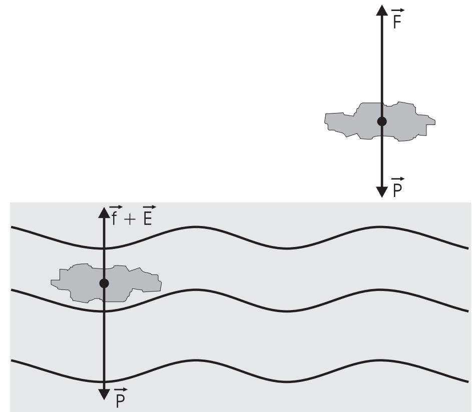
$P_{elefante}/A_1 = P_{galinha}/A_2$

então: $\dfrac{A_1}{A_2} = \dfrac{16.000}{20} = 800$

b) Se $A_2 = 10 \text{ cm}^2$, então $A_1 = 800 \cdot 10 = 8.000 \text{ cm}^2$, ou $0{,}8 \text{ m}^2$.

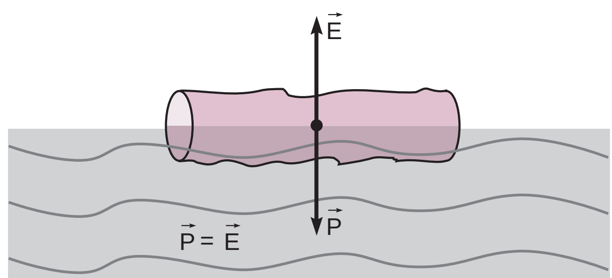
Aula 21 - Eureka!

1. a)



b) Ela parecerá mais leve devido ao empuxo: fora da água existem só o peso da pedra e a força do braço, mas, dentro da água, existe o empuxo que ajuda a empurrar a pedra para cima.

2.
a)



b) O empuxo pode ser calculado pela expressão: $E = d_L \cdot V_d \cdot g$, então,
$E = 1.000 \times 0,5 \times 10$
$E = 5.000$ N

c) Como o tronco está equilibrado, o peso é igual ao empuxo, portanto:
$P = E = 5.000$ N
Mas $P = m \cdot g$, assim a massa do tronco será $m = 5.000/10 = 500$ kg.

d) Finalmente, a densidade é a massa dividida pelo seu volume:

$$d = \frac{m}{v} = 500 \text{ kg / m}^3$$

3. a) $d = \dfrac{m}{v} = \dfrac{80 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 0,8 \text{ g / cm}^3$

b) Quando o objeto for mergulhado na gasolina, ele afundará, pois sua densidade é maior do que a da gasolina, ao passo que, se ele for mergulhado na água, vai boiar, pois sua densidade é menor do que a da água.

4. Um navio pode boiar graças ao ***empuxo,*** que é uma força vertical, dirigida para cima, que aparece quando o navio está na água e que é capaz de sustentar o peso do navio. Para poder boiar no mar, a densidade média do navio deve ser menor do que a densidade da água do mar.

AULA
22

Estou com febre?

PARA COMEÇAR

Triiiimmm!! Toca o despertador, é hora de acordar. Alberta rapidamente levanta e se prepara para sair de casa.

- Vamos, Gaspar, que já está na hora! Você vai se atrasar!

Gaspar se move na cama, afundando mais entre os lençóis:

- Acho que estou com febre... Hoje vou ficar na cama...

Alberta se aproxima. Põe a mão na testa de Gaspar e, depois, na sua. Repete a operação e arrisca um diagnóstico:

- Você está quentinho, mas não acho que tenha febre... Vamos deixar de onda!

O objetivo desta aula não é discutir o que é febre, tampouco as suas causas. Queremos discutir o que fazer para descobrir se estamos com febre, isto é, qual o aparelho usado para esse fim e que conhecimentos da física estão por trás do seu funcionamento.

É bem conhecido o fato de que o corpo humano mantém a sua temperatura em torno de 36ºC, salvo quando estamos com febre.

Quando alguém menciona a palavra **temperatura**, nós a compreendemos, mesmo sem jamais tê-la estudado. Por exemplo: quando a previsão do tempo afirma que "a temperatura estará em torno de 32ºC", sabemos que o dia será bem quente e que é bom vestir roupas leves! Em outras palavras, sabemos que a temperatura está relacionada a quente e frio.

Vamos voltar ao assunto da febre!

Fique ligado

Quando uma pessoa acha que está com febre, a primeira coisa que nos ocorre é colocar a mão na testa dela, ou em seu pescoço, e arriscar um diagnóstico. Às vezes também colocamos a mão na nossa própria testa, para fazer uma **comparação**.

Quando fazemos isso, podemos afirmar, no máximo, que a pessoa está mais ou menos quente que nós. Mas isso não basta para dizer se ela está com febre!

Gaspar acha que está com febre. Alberta acha que não. E aí, como resolver a questão?

Será o nosso tato um bom instrumento para **medir temperaturas**?

Vamos fazer uma experiência.

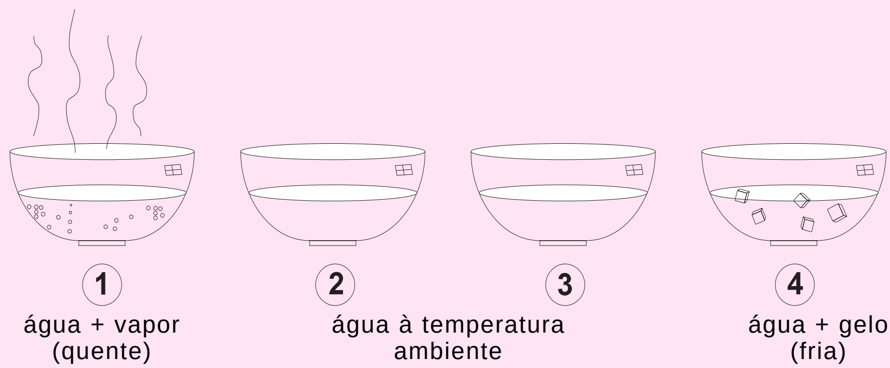
Testando o nosso tato...

Para esta atividade você vai precisar de quatro recipientes. Eles devem ser suficientemente grandes para conter água, gelo e a sua mão.

a) Coloque os recipientes 1, 2, 3 e 4 enfileirados sobre uma mesa, como indica a figura.

b) Aqueça um pouco de água e coloque no recipiente 1. Cuidado para não aquecer demais e se queimar!

c) Nos outros recipientes, coloque água da torneira. Acrescente gelo ao recipiente 4.



Agora estamos prontos para iniciar as observações.

d) Coloque a mão esquerda no recipiente 2 e a direita, no recipiente 3. Aguarde alguns instantes.

e) Mude a mão esquerda para o recipiente 1 (com água aquecida) e a direita para o recipiente 4 (com gelo). Aguarde alguns instantes.

f) Coloque as mãos onde elas estavam anteriormente (item d).

Agora responda: o que você sentiu?

Você deve ter tido a sensação de que a água do recipiente 2 está mais fria do que a água do recipiente 3. Mas elas estão à mesma temperatura, pois ambas foram recolhidas da torneira!

Como você pôde ver, o nosso tato nos engana e por isso nós podemos concluir que **o tato não é um bom instrumento para medir temperaturas**!

Equilíbrio: uma tendência natural

O que acontecerá se deixarmos os quatro recipientes da experiência acima sobre a mesa, por um longo período de tempo?

Quantas vezes ouvimos dizer: “Venha se sentar, a sopa já está na mesa, vai esfriar!” Quantas vezes conversamos distraidamente e, quando percebemos, a cerveja que está sobre a mesa ficou quente?

Isso ocorre pois, quando dois ou mais objetos estão em contato, suas temperaturas tendem a se igualar e, ao final de um certo tempo, os dois objetos terão a mesma temperatura.

Nessa situação, isto é, quando dois objetos estão à mesma temperatura, dizemos que eles estão em **equilíbrio térmico**.

A sopa ou a cerveja sobre a mesa estão em contato com o ar, que tem uma certa temperatura - chamada **temperatura ambiente**. Depois de certo tempo, todos estarão em **equilíbrio térmico**, à temperatura ambiente! A sopa, que estava mais quente que o ar, vai esfriar, e a cerveja, que estava mais fria, vai esquentar.

Medindo temperaturas

Já que não é possível descobrir se há febre usando apenas o tato, precisamos recorrer a um instrumento de medida mais preciso: o **termômetro**. O termômetro utilizado para medir a temperatura do corpo humano é conhecido como **termômetro clínico** (Figura 1). Seu princípio de funcionamento é semelhante ao de outros tipos de termômetro.

Esse termômetro é formado por um tubo de vidro oco no qual é desenhada uma escala: a **escala termométrica**. No interior desse tubo existe um outro tubo, muito fino, chamado de **tubo capilar**. O tubo capilar contém um líquido, em geral mercúrio (nos termômetros clínicos) ou álcool colorido (nos termômetros de parede usados para medir a temperatura ambiente).

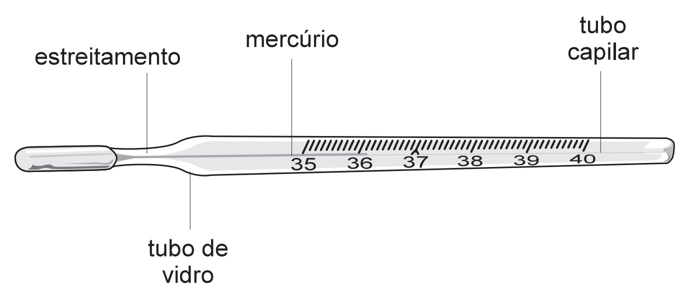


Figura 1

Quando colocamos a extremidade do termômetro clínico em contato com o corpo, o líquido no interior do tubo capilar se desloca de acordo com a temperatura do corpo.

É importante notar que, após colocar o termômetro sob o braço, precisamos esperar alguns minutos. Esse tempo é necessário para que se estabeleça o **equilíbrio térmico** entre o corpo e o termômetro. Assim, o termômetro vai indicar exatamente a temperatura do corpo. Para "ler" a temperatura, basta verificar a altura da coluna de mercúrio, utilizando a escala termométrica.

Podemos refletir agora sobre algumas questões importantes:

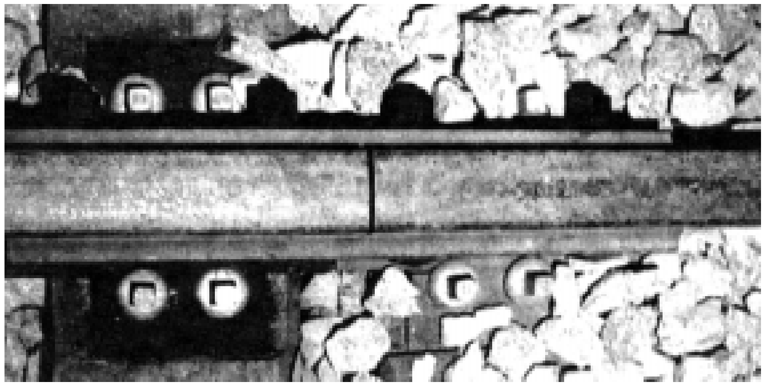
- Como funciona o termômetro, isto é, por que o líquido se desloca?
- Como se constróem as **escalas termométricas**?

O objetivo das seções seguintes é responder a essas duas questões.

Aquecendo objetos

O funcionamento do termômetro se baseia num fenômeno observado nas experiências: em geral, os objetos aumentam de tamanho quando são aquecidos. Este aumento de tamanho é chamado de **dilatação**. Por exemplo: nas construções que utilizam concreto armado, como pontes, estradas, calçadas ou mesmo edifícios, é comum deixar um pequeno espaço (as chamadas juntas de dilatação) entre as placas de concreto armado. A razão é simples: as placas estão expostas ao Sol e, quando aquecidas, dilatam-se. As juntas servem para impedir que ocorram rachaduras.

Outro exemplo é encontrado nos trilhos dos trens: entre as barras de ferro que formam os trilhos existem espaços. Eles permitem que as barras se dilatem sem se sobrepor uma à outra, como mostra a figura abaixo.



Mais um exemplo do nosso dia-a-dia: quando está dificil remover a tampa metálica de um frasco de vidro, basta aquecê-la levemente. Assim, ela se dilata e sai com facilidade. Mas resta agora uma dúvida:

Por que os objetos aumentam de tamanho quando aquecidos?

Para responder a essa questão, precisamos saber um pouco sobre a estrutura dos objetos. Não vamos aqui entrar em detalhes, pois este será o tema de uma outra aula. Por enquanto, basta saber que todos os objetos, independentemente do tipo de material de que são feitos, são formados por pequenas estruturas chamadas de **átomos.**

Sabemos que esses átomos estão em constante movimento.

Você já aprendeu que existe uma energia associada ao movimento de um objeto: a **energia cinética**. Aprendeu também que ela é maior quanto maior é a velocidade do objeto em movimento.

Ao ser aquecido, um objeto recebe energia, que é transferida aos seus átomos. Ganhando energia, os átomos que formam o objeto passam a se mover mais rapidamente. Nós já sabemos que, quando aquecemos um objeto, sua temperatura aumenta.

Isso nos faz pensar que a temperatura de um objeto está relacionada ao movimento de seus átomos. Assim chegamos a uma conclusão importante:

A temperatura de um objeto é uma grandeza que está associada ao movimento de seus átomos.

Tendo mais energia, os átomos tendem a se afastar mais uns dos outros. Conseqüentemente, a **distância média** entre eles é maior. Isso explica porque os objetos, quando aquecidos, aumentam de tamanho, isto é, dilatam-se.

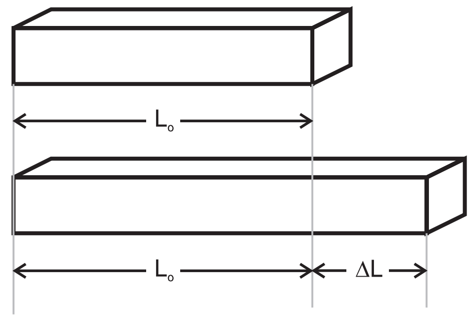
Então, aprendemos outro fato importante:

Dilatação é o aumento de tamanho de um objeto, quando ele é aquecido, em conseqüência do aumento da distância média entre os átomos que o formam.

Como calcular a dilatação de um objeto?

Vamos imaginar uma barra de ferro de trilho de trem. Suponha que ela tem, inicialmente, um comprimento L_0.

Ao ser aquecida, a barra aumenta de tamanho: aumentam seu comprimento, sua largura e sua altura. Mas, inicialmente, vamos analisar apenas a variação do **comprimento** da barra, que é bem maior do que a variação das outras dimensões, isto é, a largura e a altura. Veja a ilustração abaixo.



As experiências mostram que a **variação do comprimento** (ΔL) **é diretamente proporcional à variação da sua temperatura** (Δt) **e ao seu comprimento inicial** (L_0), isto é:

$$\Delta L \propto \Delta t$$
$$\Delta L \propto L_0$$

Matematicamente, podemos escrever da seguinte maneira:

$$\boxed{\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t}$$

onde α é a constante de proporcionalidade.

Portanto, a variação do comprimento de um objeto é **diretamente proporcional** à sua variação da temperatura.

As experiências mostram também que a **constante de proporcionalidade** (α) depende do tipo de material de que é feito o objeto. No caso da nossa barra, esse material é o ferro.

A constante de proporcionalidade (α) recebe o nome de **coeficiente de dilatação linear**, e seu valor pode ser calculado experimentalmente para cada tipo de material. Para isso, basta medir L_0, ΔL e Δt.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta t}$$

Unidade

Observe que ΔL e L_0 têm unidade de comprimento, que se cancela. Assim, resta a unidade do Δt, isto é, da temperatura.

Portanto, a unidade do coeficiente de dilatação linear é o inverso da unidade da temperatura, que veremos na próxima seção.

O que vimos não se aplica apenas ao comprimento de um objeto: serve também para as outras dimensões do objeto, isto é, a largura e a altura.

Em vez de falar na variação de cada uma das dimensões do objeto separadamente, podemos falar diretamente da variação de seu volume, isto é, da **dilatação volumétrica,** que matematicamente pode ser escrita como:

$$\boxed{\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta t}$$

onde γ é chamado de **coeficiente de dilatação volumétrica**, e seu valor é **três vezes** o coeficiente de dilatação linear, isto é, $\gamma = 3\alpha$.

Essas "leis" que descrevem a dilatação de sólidos servem também para os líquidos. A diferença é que os líquidos não têm forma definida: eles adquirem a forma do recipiente que os contém, que também podem se dilatar.

Agora é possível entender como funciona o termômetro: o líquido que está no interior do tubo capilar se dilata à medida que é aquecido; assim, a altura da coluna de líquido aumenta.

A variação da altura da coluna é diretamente proporcional à variação da temperatura, e esse fato é muito importante. Isto quer dizer que as dimensões dos objetos variam linearmente com a temperatura. Graças a esse fato, é possível construir os termômetros e suas escalas, como descreveremos a seguir.

O termômetro e sua escala

Quando medimos uma temperatura, o que fazemos, na realidade, é comparar a altura da coluna de líquido com uma escala. Por isso, a escala é muito importante.

Para construir uma escala é necessário estabelecer um padrão. Lembre-se de que na Aula 2 falamos sobre alguns exemplos de padrões: o **metro padrão** e o **quilograma padrão**. As escalas são construídas com base nos padrões.

A escala de temperatura adotada em quase todos os países do mundo, inclusive no Brasil, é chamada de **escala Celsius**, em homenagem ao sueco Anders Celsius, que a inventou.

Já sabemos que a altura da coluna de líquido varia de acordo com a temperatura: quanto maior a temperatura, maior a altura da coluna. Sabemos também que a altura varia linearmente com a temperatura.

A escala termométrica é formada por um conjunto de pontos, cada um associado a um número que corresponde ao valor da temperatura.

Então, para construir uma escala, é preciso determinar esses pontos e estabelecer a sua correspondência com o valor da temperatura.

A escala Celsius utiliza a temperatura da água para definir seus pontos. Ela é construída da seguinte maneira: inicialmente, são definidos dois pontos, o inferior e o superior.

Para determinar o ponto inferior da escala, coloca-se o termômetro numa mistura de água com gelo e aguarda-se o equilíbrio térmico (Figura 2). Neste momento, a coluna atinge uma determinada altura, onde se marca o primeiro ponto, definido como **zero grau Celsius,** que corresponde à temperatura de fusão do gelo (passagem do estado sólido para o líquido).

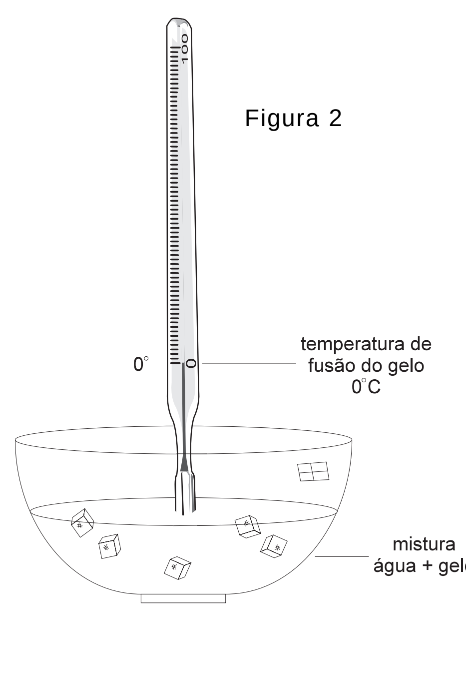


Figura 2

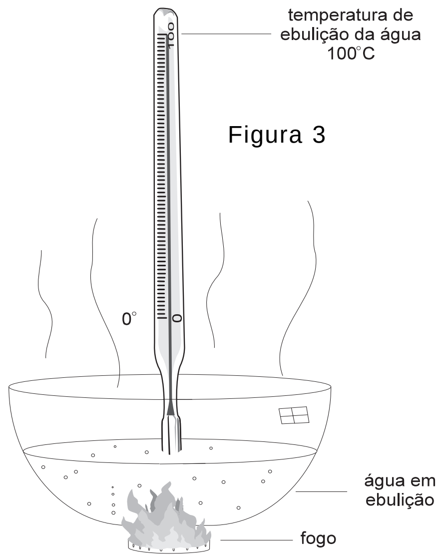


Figura 3

O ponto superior da escala é definido colocando-se o termômetro num recipiente com água em ebulição (fervendo). Quando o equilíbrio térmico é atingido, a coluna de líquido atinge uma altura que determina o ponto superior da escala. Esse ponto é definido como **100 graus Celsius,** que corresponde à temperatura de ebulição da água (Figura 3).

Em seguida, a escala é dividida em 100 partes iguais, de modo que cada uma corresponda a um grau Celsius. Por isso a escala Celsius é também chamada de escala centígrada (cem graus), e dizemos **graus Celsius** ou **graus centígrados** (Figura 4). Nessa escala, a temperatura normal do corpo é de aproximadamente 36°C.

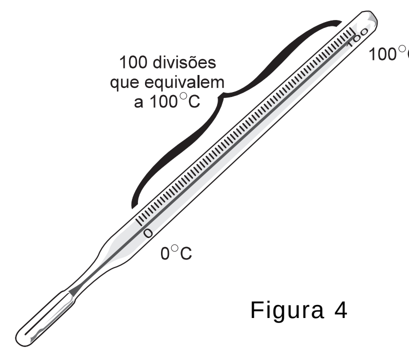


Figura 4

Gaspar pediu um termômetro emprestado a Maristela. Era um termômetro um pouco estranho. Nele estava escrito "graus F"; o menor valor indicado era 32°F e o maior, 212°F.

Gaspar colocou o termômetro embaixo do braço e esperou alguns minutos. Após esse período, verificou a altura da coluna de mercúrio: ela indicava 100 dos tais graus F.

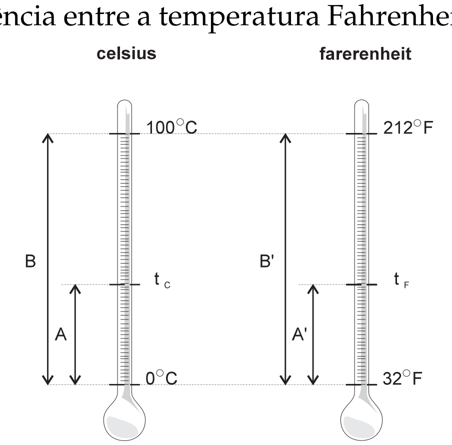
E agora? Gaspar, afinal, tinha febre ou não? Qual seria a relação entre os "graus F" e os já conhecidos graus Celsius? Tudo o que Gaspar sabia era que na escala Celsius, em condições normais, sua temperatura deveria estar em torno dos 36°C.

Gaspar telefonou para Maristela, pedindo explicações. E a moça explicou:

\- A tal escala F é pouco utilizada e se chama **escala Fahrenheit**, em homenagem ao seu inventor. Essa escala também utiliza a água para determinar seus pontos. Mas atribui à temperatura de fusão do gelo o valor 32°F (que corresponde a 0°C), e à temperatura de ebulição da água atribui o valor 212°F (que corresponde a 100°C).

É simples relacionar uma mesma temperatura medida nessas duas escalas, isto é, estabelecer a correspondência entre a temperatura Fahrenheit e a temperatura Celsius.

Observe este esquema:



Seja t_F a temperatura de Gaspar medida na escala Fahrenheit. Qual será a temperatura Celsius (t_C) correspondente?

Os segmentos A e A' são proporcionais, assim como B e B', de modo que podemos escrever:

$$\frac{A}{A'} = \frac{B}{B'}$$

$$\frac{(t_C - 0^\circ)}{(t_F - 32^\circ)} = \frac{(100^o - 0^o)}{(212^o - 32^o)}$$

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32^\circ)$$

Essa expressão relaciona a temperatura medida nas duas escala. Assim, conhecendo a temperatura de Gaspar, medida na escala Fahrenheit, podemos saber qual a sua temperatura em Celsius. Basta substituir o valor medido (100°F) na expressão acima. Assim, concluiremos que:

t_C é aproximadamente 37,8°C

Gaspar tinha razão. Estava realmente com febre!

Absolutamente zero?

Gaspar passou o dia na cama, com a questão da temperatura na cabeça. Pensou no seguinte:

- A temperatura de um objeto está associada ao movimento de seus átomos. Se baixarmos a temperatura do objeto, esse movimento diminui. Qual será a menor temperatura que um objeto pode ter? Será possível parar completamente seus átomos?

Gaspar foi investigar. Descobriu que sua pergunta foi o que deu origem a uma outra escala termométrica, chamada de **escala absoluta** ou **escala Kelvin,** em homenagem ao inglês Lord Kelvin.

Em grandes laboratórios científicos buscou-se a temperatura mínima que um corpo poderia ter. Cientistas concluíram que não é possível obter temperatura inferiores a 273°C negativos, isto é, - 273°C!

Essa temperatura é conhecida como **zero absoluto** ou **zero Kelvin**. Essa escala é adotada em laboratórios, mas não no nosso dia-a-dia, pois as temperaturas com que estamos habituados são bem maiores! Normalmente utilizamos um T maiúsculo para indicar temperaturas absolutas. Sua unidade é o Kelvin (K). A relação entre a temperatura absoluta e a temperatura Celsius é simples:

$$\boxed{T = t_C + 273}$$

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- a temperatura de um objeto está relacionada às nossas sensações de quente e frio;
- o nosso tato não é um bom instrumento para medir temperaturas;
- a temperatura de um objeto está associada ao movimento de seus átomos e que, quanto maior for a velocidade dos átomos, isto é, quanto mais agitados eles estiverem, maior será a temperatura do objeto;
- dilatação é o aumento das dimensões de um objeto, em conseqüência do aumento de sua temperatura, e que as dimensões variam linearmente com a temperatura;
- para medir temperaturas, utilizamos instrumentos chamados **termômetros**.
- o funcionamento dos termômetros se baseia no fenômeno da dilatação e na sua propriedade de linearidade;
- existem várias escalas termométricas, sendo a mais utilizada a escala Celsius;
- há correspondência entre as diferentes escalas (Kelvin, Celsius e Fahrenheit).

Mãos à obra

Exercício 1

Explique por que, quando queremos tomar uma bebida gelada, precisamos aguardar algum tempo depois de colocá-la na geladeira.

Exercício 2

Numa linha de trem, as barras de ferro de 1 metro de comprimento devem ser colocadas a uma distância D uma da outra para que, com a dilatação devida ao calor, elas não se sobreponham umas às outras. Suponha que durante um ano a temperatura das barras possa variar entre 10°C e 60°C. Considerando que o coeficiente de dilatação linear do ferro é $\mathbf{1{,}2 \cdot 10^{-5}\ ^{\circ}C^{-1}}$, calcule qual deve ser a distância mínima D entre as barras para que, com a dilatação, os trilhos não sejam danificados.

Exercício 3

Maristela mediu a temperatura de um líquido com dois termômetros: um utiliza a escala Celsius e o outro, a Fahrenheit. Surpreendentemente, ela obteve o mesmo valor, isto é, $t_C = t_F$. Descubra qual era a temperatura do tal líquido.

Exercício 4

Lembrando o conceito de densidade que discutimos na Aula 19, responda: o que acontece com a densidade de um objeto quando ele é aquecido?

Exercício 5

Gaspar estava realmente com febre: sua temperatura era de $t_F = 100°F$. Descubra qual é o valor normal da temperatura do corpo humano na escala Fahrenheit.

Exercício 6

Gaspar encheu o tanque de gasolina e deixou o carro estacionado sob o sol forte de um dia de verão. Ao retornar, verificou que o combustível havia vazado. Explique o que ocorreu.

AULA

23

Água no feijão, que chegou mais um!

PARA COMEÇAR

Sábado! Cristiana passou a manhã toda na cozinha, preparando uma feijoada! Roberto tinha convidado sua vizinha, Maristela, para o almoço.

Logo cedo, Cristiana perguntou a Roberto se ele tinha colocado as cervejas e os refrigerantes na geladeira. Ela estava preocupada porque, na última festa, Roberto se esquecera de colocar as bebidas para gelar.

Mas, dessa vez, Roberto se antecipou a Cristiana e logo cedo encheu a geladeira com muitas cervejas e refrigerantes!

Quase meio-dia. A campainha toca. Roberto vai atender a porta e, quando abre, toma um grande susto: o filho, Ernesto, entra correndo pela porta com mais três amigos.

– A gangue do Lobo veio almoçar!

Cristiana, que conhecia muito bem Ernesto e suas surpresas, logo gritou:

– Quantos são a mais?

Logo que soube que eram três, Cristiana rapidamente colocou mais água no feijão.

De novo a campainha! Roberto vai atender a porta, achando que era sua convidada, Maristela.

Quando abre a porta, Roberto toma mais um susto. Maristela estava com um casal!

– Salve, Roberto! Estes são Gaspar e Alberta, que vieram me visitar esta manhã. Como eu tinha este almoço aqui, achei que poderia convidá-los para almoçar conosco!

Roberto, que conhece a fama de distraída de Maristela, não tem dúvidas e grita:

– Cristiana, mais água no feijão!

Roberto convida todos a sentar na sala e pega uma cerveja na geladeira. Quando abre a porta, mais um susto. As cervejas ainda estavam **quentes**!

Calor

Fique ligado

Quente e frio são palavras normalmente usadas para expressar uma sensação. Associamos a palavra **quente** a situações em que um objeto está com temperatura alta. À palavra **frio** associamos a situações em que um objeto, ou mesmo a atmosfera, está com temperatura baixa.

Esse modo de falar sobre o "calor" de um corpo não é muito preciso: uma pessoa que vive na região sul do Brasil pode dizer que o verão do Nordeste é muito quente; já um morador do Nordeste diria que é muito agradável!

Quem está com a razão? Ambos, pois estão expressando uma sensação. Mas, em ciência, é necessário usar termos mais precisos.

Na Física, **calor** é uma forma de energia que está associada ao movimento das moléculas que constituem um objeto. Ou seja, uma cerveja quente ou fria tem calor. Quando dizemos que uma cerveja está com temperatura alta, queremos dizer que suas moléculas apresentam alto grau de agitação, que a energia cinética média dessas moléculas é grande – ou seja, que a quantidade de energia na cerveja é grande!

Dizemos também que a propagação do calor pode ser entendida simplesmente como a propagação da agitação molecular. Quando esquentamos o feijão numa panela, percebemos claramente que a superfície esquenta somente alguns minutos depois de termos colocado a panela no fogo. Isso acontece porque as moléculas no fundo da panela começam a se agitar primeiro, e demora um pouco até que essa agitação chegue à superfície.

Também é possível compreender o resfriamento de uma substância como a diminuição da agitação molecular. Por exemplo: quando colocamos uma cerveja na geladeira, nossa intenção é retirar parte de sua energia térmica, ou seja, diminuir a agitação molecular na cerveja.

Na próxima aula veremos como se processam as trocas de calor, ou seja, como ocorre a **condução do calor**.

Capacidade térmica

Cristiana, na cozinha, fica desesperada. Mais água no feijão?

Cozinheira de mão cheia, ela sabe que esquentar aquela enorme panela de feijão levaria, no mínimo, uma hora. Resolve então pegar outras duas panelas menores e esquentar uma quantidade menor de feijão em cada uma delas.

Maristela, que estava procurando Roberto para oferecer ajuda, vê o que Cristiana estava fazendo e fica bastante curiosa. Volta para a sala e começa a pensar no assunto:

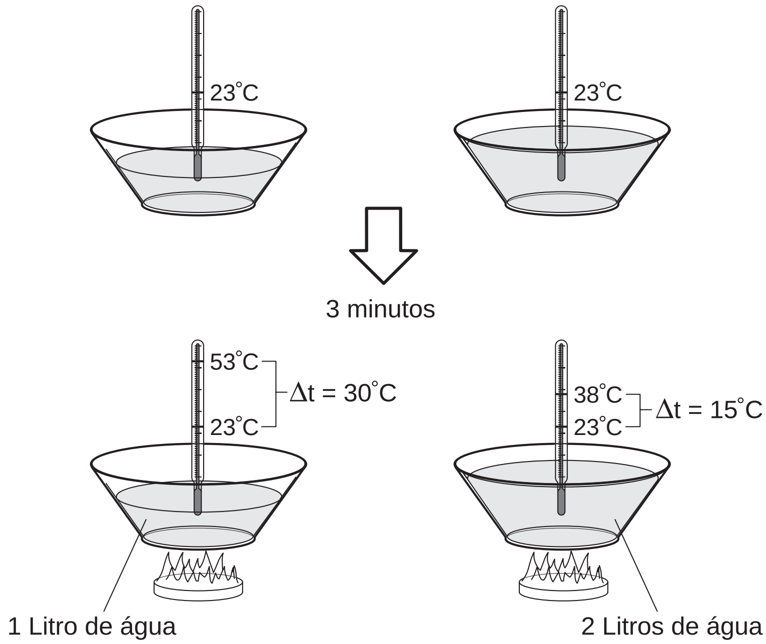
– É verdade! Quando coloco muita água para fazer café, ela demora mais tempo para esquentar do que quando coloco pouca água! Que dizer: se coloco um litro de água numa panela e meio litro de água em outra panela, e deixo as duas no fogo pelo mesmo período de tempo, provavelmente a que tem menos água deverá ter uma temperatura mais alta! **Será que isso é verdade**?

Enquanto Maristela pensava no assunto, Alberta já estava na cozinha, ajudando Cristiana. Gaspar e Roberto tinham saído para comprar gelo.

Maristela se levanta do sofá e vai até o quarto de Ernesto. Vê a gangue do Lobo e pergunta se eles sabiam onde havia um termômetro. Rapidamente Ernesto vai ao banheiro e traz dois termômetros. Maristela dá pulos de alegria. Era justamente o que ela estava precisando: dois termômetros!

Maristela corre para a cozinha, com a gangue do Lobo atrás. Nesse momento Cristiana e Alberta já estavam na sala, em plena conversa. Maristela entra na cozinha e pega duas panelas. Coloca um litro de água em uma e dois litros de água na outra. Mede a temperatura de cada uma e verifica que os termômetros estavam marcando 23º Celsius. Imediatamente, coloca as duas panelas no fogo e marca três minutos no relógio: com isso, garante que a quantidade de calor cedida pela chama do fogão seja a mesma para as duas panelas.

Ao final dos três minutos, Maristela mede novamente as temperaturas. Na panela com dois litros de água, o termômetro indicava 38°C; na panela com um litro de água, o outro termômetro indicava 53°C. Ou seja: a temperatura da primeira panela tinha variado 15°C; a da segunda panela variou 30°C.



Ao ver os resultados, Maristela lembra-se imediatamente do conceito que representa essa propriedade dos corpos.

É a **capacidade térmica**.

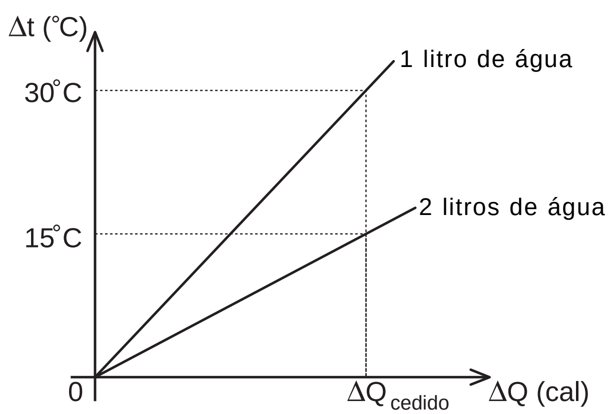
É claro que, para agitar as moléculas de dois litros de água, será necessária muito mais energia do que para agitar as moléculas de um litro de água. Podemos representar matematicamente essa dificuldade usando o conceito de capacidade térmica:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Com esta definição matemática podemos calcular o calor necessário que deve ser cedido a um corpo, se queremos que ele aumente sua temperatura de Dt, ou mesmo a quantidade de calor que deve ser retirada do corpo, se quisermos que sua temperatura diminua de Dt. Ou seja:

Capacidade térmica é a quantidade de calor necessária para variar de 1ºC a temperatura de um corpo.

No caso da experiência de Maristela, podemos expressar, por meio de um gráfico, o que ocorreu:



Podemos ver nesse gráfico que a panela com dois litros de água teve um aumento de temperatura duas vezes menor que o aumento de temperatura da panela com um litro de água.

Assim, rapidamente Maristela concluiu:

– Ah! É por isso que as cervejas não ficaram geladas: tinha muita cerveja dentro da geladeira e todas estavam quentes, assim demora mais para resfriar todas, ou seja, para retirar energia térmica de todas as cervejas!

Unidades do calor

Ernesto fica curioso com toda aquela confusão armada por Maristela, e pergunta:

– Como você sabe que foi dada a mesma quantidade de calor para as duas panelas?

Maristela responde que, se a chama do gás fosse constante e tivesse a mesma intensidade, ela podia considerar que a quantidade de calor transmitida para as duas panelas tinha sido a mesma.

Como o calor é uma forma de energia, sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o **joule** (J), mas é comum usarmos outra unidade de calor, a **caloria** (cal), que tem a seguinte equivalência com o joule:

$$1 \text{ cal} = 4{,}18 \text{ J}$$

Uma caloria é definida como a quantidade de calor necessária para elevar, em 1ºC, um grama de água!

O calor específico

Maristela volta para sala, satisfeita com suas conclusões, quando ouve Cristiana comentar com Alberta, a caminho da cozinha, que a panela de cobre esquenta a comida muito mais rápido do que a panela de alumínio. Maristela não acredita: achava que já tinha a conclusão final sobre o assunto.

Nesse momento, Ernesto, que estava atrás de Maristela, dá um palpite.

– Se você sabe que uma caloria é a quantidade de calor necessária para elevar, em 1ºC, um grama de água, pode saber quanta energia foi fornecida para as panelas!

Era exatamente o elemento que faltava! Maristela puxa seu caderninho e começa a fazer anotações:

→ Se a densidade da água é 1 kg/l, então um litro de água tem uma massa de 1 kg, ou seja, 1.000 gramas.

→ Se a variação de temperatura em um litro de água foi de 30 ºC, podemos fazer o seguinte raciocínio: a capacidade térmica de um litro de água é a quantidade de calor que um litro de água recebe para ter determinada variação de temperatura!

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

→ Se dividirmos a capacidade térmica pela massa de água:

$$\frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t}$$

temos a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de cada grama de água de 1°C, e isso eu sei quanto vale!!!

$$\frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t} = \frac{1\ \text{cal}}{1\text{g} \cdot 1^\circ\text{C}} = 1\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$$

Assim, podemos escrever que:

$$\Delta Q = m \cdot \Delta t \cdot 1\ \text{cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\Delta Q = 1000\text{g} \cdot 30^\circ\text{C} \cdot 1\ \text{cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\Delta Q = 30000\ \text{cal} = 30\ \text{Kcal}$$

Essa foi a energia térmica cedida à panela com um litro de água!

→ No caso da panela com os dois litros de água, temos que:

$$\frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t}$$

$$1\ \text{cal}/1^\circ\text{C} \cdot 1\text{g} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t}$$

Assim, podemos escrever que:

$$\Delta Q = m \cdot \Delta t \cdot 1\ \text{cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\Delta Q = 2000\text{g} \cdot 15^\circ\text{C} \cdot 1\ \text{cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\Delta Q = 30000\ \text{cal} = 30\ \text{Kcal}$$

que é exatamente o mesmo resultado, ou seja, a mesma quantidade de energia térmica foi dada às duas panelas!

Mas o que isso tem a ver com as panelas de diferentes materiais?

Será que, se tivermos a mesma massa de água e óleo, e fornecermos a mesma quantidade de calor para cada uma, as duas substâncias "esquentarão" no mesmo tempo? Sabemos que não! Essa conclusão vem do fato de que cada material tem uma estrutura própria. E é devido a essa diferença que a panela de cobre esquenta mais rápido do que a de alumínio. A essa **propriedade** dos corpos chamamos de **calor específico**.

Calor específico é a quantidade de calor necessária para que um grama de uma substância aumente sua temperatura em 1º Celsius.

Podemos escrever o calor específico em termos da capacidade térmica, ou seja:

$$c = \frac{C}{m}$$

O calor específico **é uma propriedade específica de cada substância**, como podemos ver na tabela abaixo:

CALORES ESPECÍFICOS			
SUBSTÂNCIA	CALOR ESPECÍFICO (cal/g °C)	SUBSTÂNCIA	CALOR ESPECÍFICO (cal/g °C)
		Gelo	0,55
Água	1,00	Latão	0,094
Alumínio	0,22	Mercúrio	0,033
Carbono	0,12	Prata	0,056
Chumbo	0,031	Tungstênio	0,032
Cobre	0,093	Vapor d'água	0,50
Ferro	0,11	Vidro	0,20

Podemos também calcular o calor cedido ou retirado de um corpo se soubermos o valor da sua massa, de seu calor específico e da variação de temperatura:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

Voltando às panelas

Maristela, então, conclui que, se as panelas de cobre e de alumínio têm a mesma massa, essa grandeza – o calor específico – nos mostra que o alumínio necessita de 0,22 cal para elevar em um grau Celsius cada grama da panela, enquanto o cobre necessita de apenas 0,093 cal para isso. Por isso, a panela de cobre, com uma mesma quantidade de calor, aumenta sua temperatura de modo mais rápido!

Maristela, enfim, fica satisfeita com suas conclusões. Ernesto e a gangue do Lobo voltaram para o quarto e continuaram a bagunça, enquanto Cristiana e Alberta estavam na cozinha, às gargalhadas, como se fossem amigas íntimas de muitos anos.

A campainha toca. Entram Roberto e Gaspar, com caras muito desanimadas. Maristela pergunta o que aconteceu. Eles explicam que tinham ido comprar gelo para gelar as cervejas, já que a geladeira não estava dando conta do serviço. Mas, em vez de comprar gelo em barra, resolveram comprar gelo picado, colocando-o na mala do carro. Quando chegaram ao prédio e abriram a mala, o gelo havia derretido quase todo!

Maristela imediatamente fala:

- Se vocês tivessem comprado o gelo em barra, ele demoraria mais a derreter!

Nesse momento, Cristiana e Alberta voltam da cozinha, tomando cerveja. Roberto e Gaspar ficam chocados! Cristiana então explica que tinha colocado algumas cervejas no congelador, e elas já estavam geladas.

Foi o suficiente para começar o almoço.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que os conceitos de "quente" e "frio" não são adequados nem precisos para expressar uma medida de temperatura;
- que calor é uma forma de energia que está relacionada à "agitação" molecular da matéria;
- o conceito de capacidade térmica:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

que mede a quantidade de calor que deve ser fornecida ou retirada de um corpo para que sua temperatura aumente ou diminua em 1° Celsius;

- o conceito de calor específico:

$$c = \frac{C}{m}$$

que mede a quantidade de calor necessária para aumentar ou diminuir em 1° Celsius a temperatura de um grama de uma substância. É uma propriedade específica das substâncias.

Exercício 1

Explique por que uma pedra de gelo derrete mais lentamente que a mesma quantidade de gelo moído.

Exercício 2

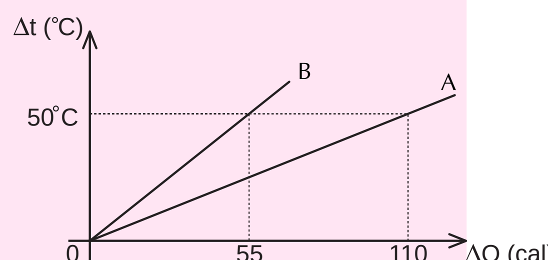
Uma geladeira que está cheia de alimentos e recipientes, que já estão com temperatura baixa, consome menos energia. Explique essa afirmação.

Exercício 3

Normalmente, o motor de um automóvel trabalha a uma temperatura de 90ºC. Em média, o volume de um radiador é de 3 litros. Calcule a quantidade de calor absorvida pela massa de água pura que foi colocada a uma temperatura ambiente de 20ºC. Supondo que o dono do carro colocasse um aditivo na água e que o calor específico desta mistura fosse 1,1 cal/g ºC, calcule novamente a quantidade de calor absorvida pelo conjunto, desprezando a alteração da massa.

Exercício 4

No gráfico ao lado, vemos como varia a temperatura de dois blocos de metal de mesma massa (10 g). Com auxílio da tabela desta aula, identifique os metais A e B.



Exercício 5

Um bloco de cobre, cuja massa é de 100 gramas, é aquecido de modo que sua temperatura varia de 20°C até 70°C. Qual foi a quantidade de calor cedida ao bloco, em joules?

Exercício 6

No processo de pasteurização do leite, são aquecidos aproximadamente 200 kg de leite, elevando-se sua temperatura de 20°C para 140°C. Essa temperatura é mantida por três segundos e, em seguida, o leite é resfriado rapidamente. Calcule a capacidade térmica do leite, supondo que seu calor específico seja de 0,97 cal/g ºC .

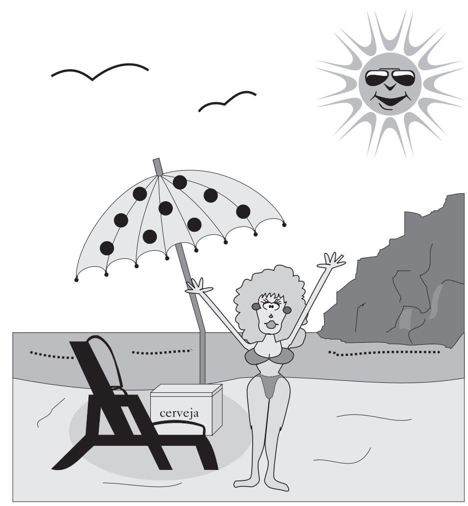
AULA

24

A brisa do mar está ótima!

Mais um fim de semana. Cristiana e Roberto vão à praia e convidam Maristela para tomar um pouco de ar fresco e de sol, e tirar o mofo!

É verão e o sol já está bem quente. Mas essa turma vai bem preparada: levam guarda-sol, chapéu, protetor solar, óculos escuros, chinelos e, é claro, uma cervejinha bem gelada, acomodada entre grandes pedras de gelo no interior de um isopor.



Ao chegar à praia, Maristela advertiu:

- É melhor vocês calçarem os chinelos. Caso contrário, correm o risco de queimar a sola dos pés. A esta hora, a areia está muito quente, não brinquem com isso!

De fato, a areia estava muito quente, e bastou dar o primeiro passo para que o casal seguisse o conselho da experiente vizinha!

Já sabemos que, quando os objetos estão em contato, depois de um certo tempo eles terão a mesma temperatura, isto é, eles atingem o equilíbrio térmico: um dos objetos cede energia térmica (calor) e o outro recebe, de modo que, no equilíbrio térmico, a energia térmica e a temperatura dos dois objetos serão iguais.

Mas como é que a energia térmica se move? Como ela passa de um objeto para outro? Em outras palavras, como é que o calor se propaga?

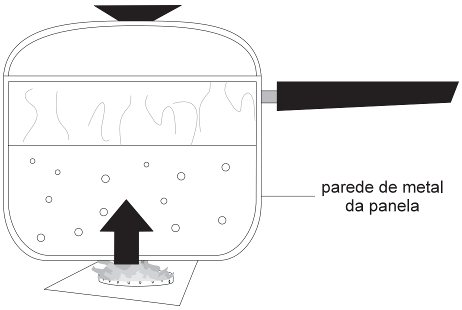
Descalço? Nem pensar!

Ao colocar o pé na areia quente, Cristiana “viu estrelas”!

- Uau! Essa areia está mesmo quente, acho que queimei o pé!

Cristiana queimou o pé por uma razão simples: a temperatura do pé estava mais baixa que a temperatura da areia. Quando Cristiana colocou o pé na areia, parte da energia térmica contida na areia passou para seu pé, que sofreu um aumento rápido de temperatura, daí a sensação de queimadura.

Esse modo de propagação de energia térmica é chamado de **condução**, e ocorre sempre que dois corpos de diferentes temperaturas são colocados em contato. Essa é uma maneira muito comum de propagação de calor, que ocorre freqüentemente no nosso dia-a-dia.



Por exemplo: quando colocamos uma panela com água para aquecer, a chama do fogo (lembre-se do feijão da Aula 23!) fornece energia térmica para o metal da panela. O metal, por sua vez, conduz o calor para o interior da panela, aquecendo a água que lá se encontra. Materiais como o metal, que conduzem o calor, isto é, que permitem a sua passagem, são chamados de **condutores térmicos**.

Portanto, a condução ocorre quando dois materiais de diferentes temperaturas estão em contato. Outro exemplo é o resfriamento da própria água, quando ela é tirada do fogo: sua energia térmica é aos poucos transferida para o ar que está ao seu redor, aquecendo-o.

Existem certos tipos de materiais que dificultam a passagem do calor: esses materiais são chamados de **isolantes térmicos**.

O isopor, no qual Cristiana colocou a cerveja, é um material isolante. Ele dificulta a passagem do calor de fora para dentro. Desse modo, o ar no interior do isopor (que está frio, por causa do gelo) permanece resfriado por determinado período, mantendo fria a cerveja.

Pela mesma razão, o cabo das panelas é feito de material isolante, que evita a passagem do calor do metal da panela para a nossa mão.

Sabemos que, quanto mais quente um material, mais os seus átomos vibram. O calor (energia térmica) é transferido por meio dessas vibrações. Então, para que haja condução de calor é preciso que existam átomos, e, portanto, um meio material!

Condução é uma forma de propagação de calor que necessita de um meio material para ocorrer.

Vermelha, feito um pimentão

Chinelos nos pés, cervejinha na mão. Papo vai, papo vem, e aquele dia agradável foi passando.

Maristela tem a pele muito branca e, por isso, ficou o tempo todo debaixo do guarda-sol. Assim mesmo, no final do dia, ela estava vermelha feito um pimentão! Como isso aconteceu?

Antes de responder a essa pergunta, há outra que precisamos discutir.

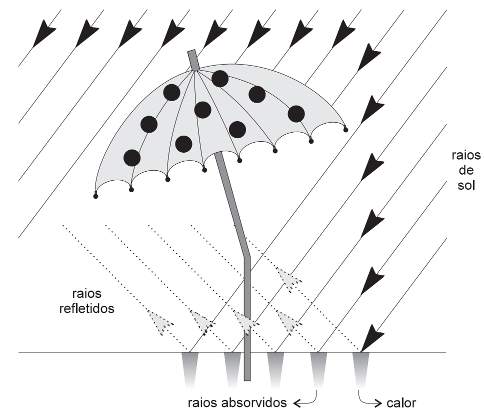
Sabemos que a energia que ilumina nosso dia e nos aquece (bronzeia!) vem do Sol. Mas como essa energia chega até nós?

No espaço entre a Terra e o Sol existe muito pouca matéria, quase nada. Dizemos que nesse espaço existe o **vácuo**, isto é, o vazio - um grande espaço vazio... Se não há átomos (matéria), não pode haver condução de calor. Então, como é que a energia térmica do Sol chega até nós?

Existe uma segunda forma de propagação de calor que é chamada de **radiação**: nesse caso, a energia térmica se propaga sem a necessidade de um meio material.

Assim, os raios de Sol "caminham" pelo espaço carregando energia. Ao incidir sobre a areia, esses raios podem ser absorvidos, cedendo energia para os átomos da areia, esquentando-a.

Esses raios podem também ser refletidos e, por exemplo, atingir a pessoa que está embaixo do guarda-sol. Desse modo, transferem energia para os átomos da pessoa, fazendo com que ela fique vermelha! Foi o que aconteceu com Maristela.



Ao final da tarde, uma brisa refrescante...

Finalmente o Sol se pôs. Maristela já não agüentava mais tanta claridade! Quando já estava escuro, começou a soprar uma leve brisa em direção ao mar.

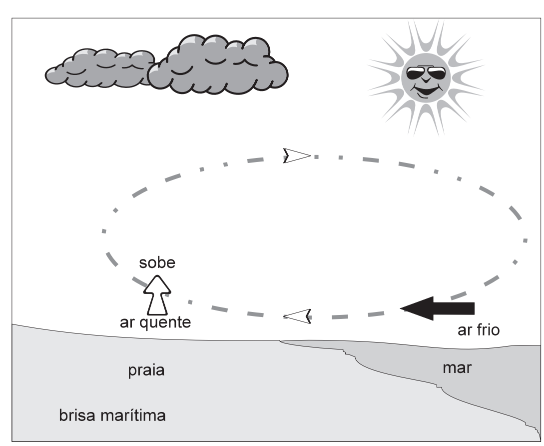
- Vocês estão sentindo o vento? Acho que o tempo vai mudar...
- Não vai não, Cristiana! Essa é apenas uma brisa terrestre - afirmou Maristela.

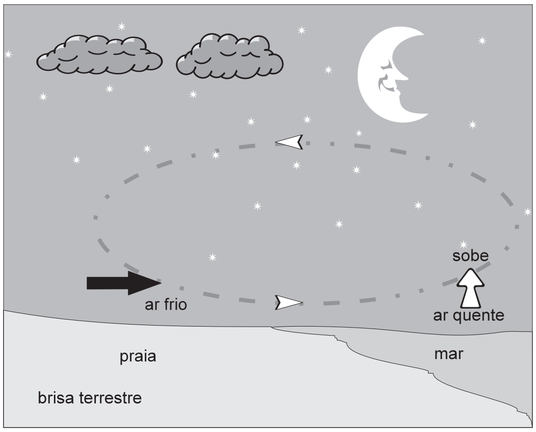
E explicou:

- O calor específico da areia é menor que o da água. Isso significa que, para variar sua temperatura é preciso fornecer menos calor do que para variar a temperatura da água (para que ocorra a mesma variação de temperatura). Além disso, a areia é um material mau condutor: veja que, um pouco mais abaixo, ela está fresquinha... Isso porque o calor não é conduzido para as camadas inferiores. Já a água é transparente e permite que os raios solares cheguem até camadas mais profundas do mar. Com isso a areia esquenta mais, e mais depressa do que a água. Também perde calor com mais facilidade e esfria mais rapidamente. Durante o dia, a praia e o mar recebem calor do Sol na mesma quantidade. Mas a areia se aquece mais rapidamente. Por isso, a camada de ar que está sobre ela, por condução, fica mais quente do que a camada de ar que está sobre o mar.

Você já aprendeu que, de modo geral, quando um corpo é aquecido, ele se dilata. Com o ar ocorre o mesmo: ele se expande e ocupa um volume maior. Por isso, fica menos denso e sobe. No caso do ar frio, ele fica mais denso e desce.

Assim, o ar que está sobre a areia sobe e "abre um espaço" que é rapidamente ocupado pelo ar mais frio, aquele que está sobre o mar. Forma-se assim uma corrente de ar que chamamos de "brisa marítima", pois sopra do mar para a terra.

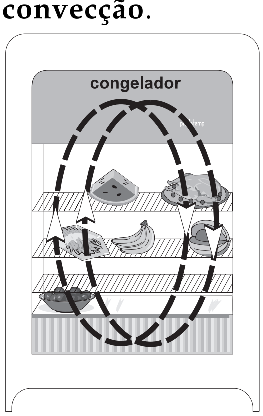




Depois que o Sol se põe, a água e a areia deixam de receber calor e começam a esfriar. Mas a areia esfria rapidamente (à noite ela fica gelada!), e a água do mar demora a esfriar. Por isso, à noite, o mar fica quentinho.

O ar que está sobre o mar fica mais quente do que o ar que está sobre a areia. Mais aquecido, fica menos denso e sobe. Assim, o ar que está sobre a areia se desloca em direção ao mar: é a brisa terrestre.

Esta é uma terceira forma de propagação de calor conhecida como **convecção**. Para ocorrer convecção é preciso que exista matéria, e que "suas partes" estejam a diferentes temperaturas, de modo que haja deslocamento de matéria, que, ao se deslocar, conduz o calor. Esses deslocamentos são chamados **correntes de convecção**.

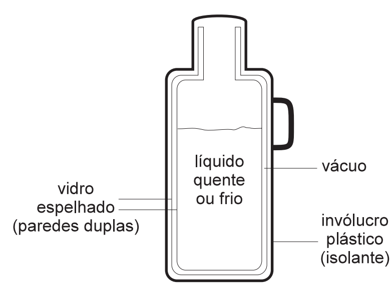


A convecção ocorre até que seja atingido o equilíbrio térmico, isto é, quando todas as partes estiverem à mesma temperatura. Por causa da convecção o congelador é colocado na parte superior da geladeira e os aparelhos de ar refrigerado devem ficar na parte superior dos cômodos. Na parte superior, o ar é resfriado, torna-se mais denso e desce, empurrando para cima o ar que está mais quente. Este encontra o congelador, é resfriado e desce. O processo continua até que seja atingido o equilíbrio térmico, isto é, até que todo o ar esteja à mesma temperatura.

Três em um!

Existe um aparelho capaz de manter a temperatura de líquidos, por um bom tempo: **a garrafa térmica.**

Ela é capaz de manter um líquido quente ou frio, graças à combinação de três fatores: ela evita a condução, a radiação e a convecção de calor. Observe, ao lado, o esquema de uma garrafa térmica.



Abaixo do invólucro plástico existe uma garrafa formada por duas camadas de vidro. Entre as duas camadas quase não existe ar (vácuo). Sem ar não existem átomos, ou moléculas, de modo que se evita a propagação de calor por **condução**.

Além disso, a superfície do vidro é espelhada, interna e externamente. Desse modo, quando há líquido quente no interior da garrafa, o calor que seria irradiado para fora é refletido para dentro; caso o líquido seja frio, o calor de fora não penetra na garrafa, pois é refletido pela superfície do vidro. Isso evita a propagação de calor por **radiação**. E todas as partes do líquido dentro da garrafa estarão à mesma temperatura, de modo que também não ocorre **convecção**.

Por isso, é possível conservar líquidos no interior de uma garrafa térmica, por um bom tempo, praticamente à temperatura em que foi colocado, pois ela diminui ao máximo as trocas de calor entre o líquido e o meio ambiente.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- o calor pode se propagar de três formas: por condução, por convecção e por radiação;
- para haver condução ou convecção de calor é necessária a presença de um meio material, o que não ocorre com a radiação;
- existem certos tipos de material que permitem a passagem de calor: são os chamados **condutores térmicos**; outros impedem ou dificultam a passagem do calor: são os chamados **isolantes térmicos**.

Mãos à obra

Exercício 1
Ao anoitecer, a temperatura ambiente baixou bastante. Cristiana começou a sentir frio e colocou seu agasalho. Por que ela fez isso? É correto afirmar que os “agasalhos nos aquecem”?

Exercício 2
Chegando em casa, Roberto ficou à vontade: tirou os sapatos e ligou a televisão. Foi descalço até a cozinha fazer um lanche. Ao pisar no chão da cozinha sentiu um “frio” subir pela espinha! Correu para o tapete e, lá, teve uma agradável sensação: o frio passou! Explique por que isso acontece, lembrando que ambos, o chão e o tapete, estão em equilíbrio térmico, isto é, à mesma temperatura (a do ambiente).
Dica: o mesmo fenômeno ocorre quando tocamos a parte metálica e o cabo de uma panela.

Exercício 3
Observe ao seu redor, na sua casa, no trabalho, na rua, e procure objetos (ou materiais) que sejam isolantes e outros que sejam condutores de calor. Cite alguns exemplos.

Exercício 4
Explique por que as prateleiras das geladeiras não são placas inteiras, mas sim grades.

AULA
25

Ernesto entra numa fria!

PARA COMEÇAR

Segunda-feira, 6 horas da tarde, Cristiana e Roberto ainda não haviam chegado do trabalho. Mas Ernesto, filho do casal, já tinha voltado da escola. Chamou a gangue do Lobo para beber um refrigerante em sua casa.

Ernesto colocou refrigerante em copos para os amigos. Mas, quando foi encher o próprio copo, o refrigerante acabou. Ernesto ficou furioso, mas fingiu que nada tinha acontecido e encheu seu copo com água e gelo. Foi para a sala, onde a televisão já estava ligada, e serviu os amigos.

Para impressioná-los, Ernesto pegou um termômetro para mexer o gelo em seu copo. Mas teve uma decepção: a gangue do Lobo não tirava os olhos da televisão. Chateado, ele começou a prestar atenção ao que ocorria com o termômetro.

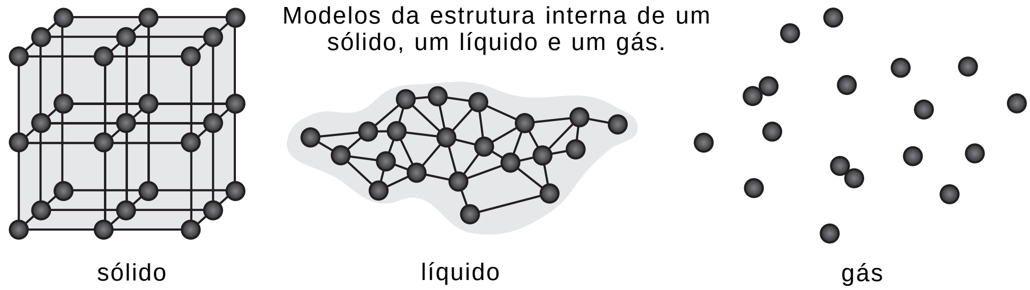
Inicialmente, a observação confirmou sua expectativa: a marca da temperatura no termômetro estava baixando, ou seja, a temperatura da água estava diminuindo. Por alguns instantes Ernesto se distraiu com a televisão, enquanto mexia o gelo na água com o termômetro. Quando voltou a observar a marca do termômetro, percebeu que ela estava bem perto de zero grau Celsius. Alguns minutos mais tarde, voltou a observar o termômetro e a marca não tinha se alterado! Ernesto achou curioso que a temperatura não tivesse baixado mais. Tentou falar aos amigos sobre esse curioso fenômeno, mas não recebeu nenhuma atenção.

Ernesto não deu bola para o resto da turma e começou a se perguntar: "Por que a temperatura da água não continua a diminuir?"

Estrutura da matéria

Fique ligado

Desde a Antigüidade, os gregos já se perguntavam de que era feita a matéria. Demócrito, por exemplo, acreditava que a matéria era feita de pequenas partes indivisíveis, que chamou de átomos. Só no início do século XX é que essa "hipótese atômica" foi confirmada experimentalmente. Ou seja, descobriu-se, por meio de experiências científicas, que a matéria é realmente feita de átomos. Depois disso, modelos que descreviam a organização desses átomos no interior da matéria começaram a ser desenvolvidos. A figura da próxima página mostra uma das formas de representar a estrutura atômica da matéria nas diversas fases.



Modelos da estrutura interna de um sólido, um líquido e um gás.

Os pontos redondos representam os átomos; os traços representam as ligações entre eles. Podemos ver que, no modelo de cristal (sólido), todos os átomos estão organizados de forma que cada átomo está ligado a seus vizinhos. No estado líquido a estrutura está mais desorganizada, os átomos não estão ligados de forma tão rígida quanto no cristal. Finalmente, no gás não há mais uma estrutura bem definida, e as ligações entre os átomos ocorrem em número muito pequeno.

Mudança de estado

Já sabemos que, quando fornecemos calor a um corpo, sua temperatura aumenta. Esse aumento de temperatura está associado ao aumento da energia cinética média das partículas que constituem o corpo, ou seja, a energia cinética dessas partículas aumenta quando fornecemos calor ao corpo.

Na Aula 23 definimos o conceito de calor específico, que nos revela quanto calor é necessário para elevar em um grau Celsius a temperatura de um grama de determinado material. Sabemos, por exemplo, que, para a temperatura de um grama de água (líquida) subir um grau Celsius, é preciso fornecer-lhe 1 cal, de modo que:

$$c_{\text{água}} = 1 \text{ cal/g °C}$$

que é o calor específico da água ($c_{\text{água}}$). Sabemos também que é necessária 0,55 cal para que a temperatura de um grama de gelo suba 1ºC, isto é:

$$c_{\text{gelo}} = 0{,}55 \text{ cal/g °C}$$

O que não sabemos, ainda, é a quantidade de calor necessária para transformar um grama de gelo a zero grau Celsius em um grama de água a zero grau Celsius!

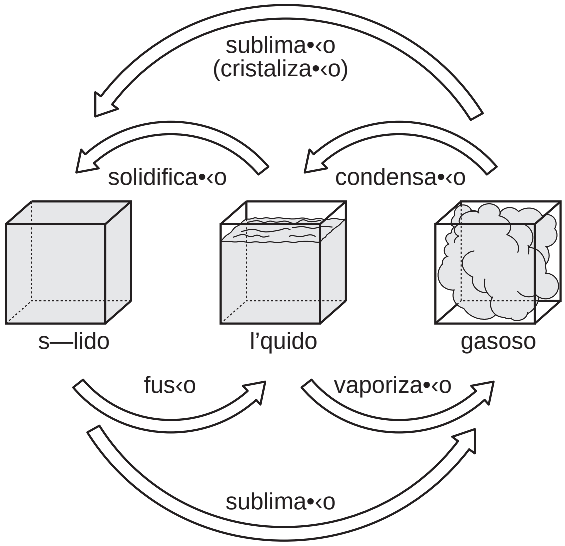
Até agora, sabemos apenas a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma substância num mesmo **estado** ou **fase**.

Chamamos de **estado** de uma substância o seu estado físico, que pode ser sólido, líquido ou gasoso.

Chamamos de **mudança de estado** a passagem de um estado físico para outro.

Por exemplo: quando o gelo derrete e se transforma em água líquida, dizemos que sofreu uma mudança de fase, à qual chamamos de **fusão**. Da mesma forma, quando transformamos uma quantidade de água (líquida) em gelo, temos uma mudança de fase, à qual chamamos de **solidificação**.

Quando a água se transforma em vapor, chamamos essa mudança de estado de **vaporização**.



Cada substância tem seus pontos de fusão e de vaporização bem definidos, ou seja, cada substância muda de estado numa determinada temperatura, a uma determinada pressão.

Calor latente

Ernesto estava tão animado com sua observação que não teve duvidas: foi para cozinha e resolveu fazer um teste.

Pegou uma panela pequena, pesou e colocou nela 100 gramas de gelo e juntou 100 ml de água, até quase cobrir os cubos de gelo. Mexeu bem, até que o termômetro marcasse perto de 0°C. Colocou a panela no fogão, com fogo bem baixo, e foi anotando, a cada minuto, o valor da temperatura indicado pelo termômetro.

Ficou assustado e achou que o termômetro estava quebrado, pois obteve os seguintes resultados:

TEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)
0	0,1
1	0,2
2	0,1
3	0,2
4	0,9
5	2,8

Mas, a partir do quinto minuto, Ernesto percebeu que todo gelo havia derretido. Então, a temperatura da água começou a subir.

Confiante, Ernesto chegou à seguinte conclusão: enquanto havia gelo na água, sua temperatura não variou. Mas, quando todo o gelo derreteu, a temperatura começou a aumentar.

Como é possível que, quando cedemos calor ao conjunto água-gelo, a temperatura não varie? Para compreender esse fenômeno, precisamos analisar a estrutura da matéria.

Para fundir o gelo é necessário aumentar a energia cinética média das moléculas (conjunto de átomos). Mas, quando chegamos à temperatura de mudança de fase, precisamos de energia para quebrar a ligação entre as moléculas. Isso significa que a **energia que está sendo fornecida ao gelo é, em sua maior parte, usada para quebrar as ligações químicas entre as moléculas**, e não para aumentar a energia cinética média delas!

O conceito de calor latente é usado para representar esse fenômeno.

Calor latente (L) é a quantidade de calor necessária para fazer uma certa massa *m* de uma substância mudar de fase sem alterar a sua temperatura.

Esse conceito pode ser definido matematicamente como:

$$L = \frac{\Delta Q}{m}$$

Abaixo temos o valor do calor latente para diversas substâncias e a temperatura na qual ocorre a mudança de estado.

CALOR LATENTE DE FUSÃO		
PONTOS DE FUSÃO OBTIDOS À PRESSÃO DE **1 atm**		
SUBSTÂNCIA	TEMPERATURA DE FUSÃO (ºC)	CALOR LATENTE DE FUSÃO (cal/g)
Água	0	80
Álcool etílico	–115	25
Chumbo	327	5,8
Enxofre	119	13
Mercúrio	–39	2,8
Nitrogênio	–210	6,1
Platina	1775	27
Prata	961	21

CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO		
PONTOS DE EBULIÇÃO OBTIDOS À PRESSÃO DE **1 atm**		
SUBSTÂNCIA	TEMPERATURA DE EBULIÇÃO (ºC)	CALOR LATENTE DE EBULIÇÃO (cal/g)
Água	100	540
Álcool etílico	78	204
Bromo	59	44
Hélio	–269	6
Iodo	184	244
Mercúrio	357	65
Nitrogênio	–169	48

Como podemos observar, essas tabelas foram construídas medindo-se as temperaturas em situação em que a pressão vale 1 atmosfera. Na próxima aula, veremos a influência da pressão sobre os pontos de mudança de estado das substâncias.

Passo a passo

1. Se considerarmos somente os 100 gramas de gelo, podemos calcular quanto calor seria necessário para que se tornassem 100 gramas de água. Basta olhar na tabela e ver que o calor latente de fusão do gelo é:

$$L_{fusão} = 80 \text{ cal/g}$$

Assim, o calor necessário será:

$$\Delta Q = m \cdot L$$
$$\Delta Q = 100g \cdot 80 \text{ cal/g} = 8000 \text{ cal}$$

Só o gelo precisaria de 8000 calorias para derreter. Sabemos que Ernesto usou mais energia térmica do que calculamos, pois em parte ela se perdeu pela parede da panela para a atmosfera. Isto justifica em parte porque o valor da temperatura variou um pouco acima de zero grau na tabela em que Ernesto anotou suas medidas.

Isolamento térmico

Já sabemos que dois corpos com diferentes temperaturas trocam calor. E, se estão isolados do ambiente em volta, só trocarão calor entre si até que atinjam o equilíbrio térmico, isto é, até que ambos estejam com a mesma temperatura!

Na experiência de Ernesto, o sistema não está isolado do ambiente, ou seja, a água está em contato com a panela, que por sua vez está em contato com a atmosfera. Parte do calor cedido pela chama de gás se perde diretamente na atmosfera, e outra parte do calor cedido é transmitida para o alumínio da panela. O calor cedido para a panela é conduzido, em parte, para o sistema água-gelo. O restante vai para a atmosfera.

Para isolar um sistema é necessário que ele seja envolvido por um material isolante, isto é, por um mau condutor de calor, a exemplo do isopor. Com isso, garantimos que não haverá trocas de energia entre o sistema que estamos querendo estudar e o ambiente externo a ele. Chamamos esses recipientes isolantes de **calorímetros**.

Conservação de energia

Ao isolar um sistema, podemos calcular quanta energia é necessária para que uma substância mude de fase, ou mesmo para analisar qual foi a troca de energia térmica entre duas substâncias.

Por exemplo: se misturarmos 100 g de água a 20°C e 100 g de água a 80°C num calorímetro, podemos calcular qual será a temperatura final da mistura, ou seja, a temperatura de equilíbrio térmico.

Como o sistema está isolado, todo calor cedido pela água que está a uma temperatura mais alta será recebido pela água que está a temperatura mais baixa. Em outras palavras, a quantidade de calor cedida será igual e de sinal contrário à quantidade de calor recebido, ou seja:

$$\Delta Q_{\text{cedido}} = -\Delta Q_{\text{recebido}}$$

Assim, podemos escrever a conservação de energia da seguinte forma:

$$\boxed{\Delta Q_{\text{cedido}} + \Delta Q_{\text{recebido}} = 0}$$

Na Aula 23 vimos que:

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$
$$\Delta Q = m \cdot c \cdot (t_f - t_i)$$

Essa é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma substância de calor específico **c** e massa **m** de $\mathbf{t_i}$ para $\mathbf{t_f}$.

Passo a passo

2. Como quem cede energia térmica é o corpo com maior temperatura, podemos escrever:

$$\Delta Q_{cedido} = 100 \cdot 1 \cdot (t_f - 80)$$

E, como quem recebe a energia térmica é o corpo de menor temperatura, temos que:

$$\Delta Q_{recebido} = 100 \cdot 1 \cdot (t_f - 20)$$

Usando, então, a forma da conservação da energia

$$100.1.(t_f - 80) + 100.1.(t_f - 20) = 0$$

temos uma equação com uma incógnita que é a temperatura final, ou seja, a temperatura de equilíbrio térmico:

$$100 \cdot t_f - 8000 + 100 \cdot t_f - 2000 = 0$$

$$200 \cdot t_f = 10000$$

$$t_f = 50°C$$

50ºC será a temperatura de equilíbrio térmico!

3. Outro exemplo que envolve mudanças de fase ocorre quando colocamos 100 g de gelo a –10°C dentro de 200 g de água a 80°C. Podemos nos perguntar: qual será a temperatura de equilíbrio térmico?
Provavelmente todo o gelo vai derreter (fusão) e, no final, a mistura estará à mesma temperatura (t_f), ou seja, o calor cedido pela água quente deverá ser necessário para:

- aumentar a temperatura do gelo de –10°C para 0°C:

$$\Delta Q_1 = m_{gelo} \cdot c_{gelo} \cdot [0 - (-10)]$$

- provocar a mudança de fase dos 100 g de gelo para 100 g de água (calor latente de fusão):

$$\Delta Q_2 = m_{gelo} \cdot L_{gelo}$$

- e elevar a temperatura desses 100 g de água a 0ºC até a temperatura final de equilíbrio térmico (t_f):

$$\Delta Q_3 = m_{gelo} \cdot c_{água} \cdot (t_f - 0)$$

Podemos escrever a conservação de energia como:

$$\Delta Q_{cedido} + \Delta Q_{recebido} = 0$$

Como quem cede calor é o corpo com temperatura mais alta:

$$\Delta Q_{cedido} = 200 \cdot 1 \cdot (t_f - 80)$$

Quem recebe calor é o gelo, e a quantidade total de calor recebido é:

$$\Delta Q_{recebido} = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$$

$$\Delta Q_{recebido} = m_{gelo} \cdot c_{gelo} \cdot 10 + m_{gelo} \cdot L_{gelo} + m_{gelo} \cdot c_{água} \cdot (t_f - 0)$$

$$\Delta Q_{recebido} = 100 \cdot 0{,}5 \cdot 10 + 100 \cdot 80 + 100 \cdot 1 \cdot (t_f - 0) = 500 + 8000 + 100\, t_f$$

$$\Delta Q_{recebido} = 8500 + 100\, t_f$$

Usando a conservação de energia:

$$200 \cdot 1 \cdot (t_f - 80) + 8500 + 100\, t_f = 0$$

$$200\, t_f - 16000 + 8500 + 100\, t_f = 0$$

$$300\, t_f = 7500$$

$$t_f = 25°C$$

25ºC é a temperatura de equilíbrio térmico do sistema!

Enquanto Ernesto estava entretido com suas experiências na cozinha, a gangue do Lobo continuava em frente à televisão, como se o resto do mundo não existisse. Nesse momento chegam Cristiana e Roberto. Encontram aquela confusão na sala, refrigerante para todo lado e, na cozinha, uma tremenda bagunça, panelas espalhadas, todas as fôrmas de gelo vazias e Ernesto, todo molhado, sentado no chão da cozinha, mexendo, com um termômetro, gelo e água numa panela!

Foi então que aconteceu uma "mudança de estado" dentro da casa: a gangue do Lobo saiu rapidinho pela porta e Ernesto foi direto para o quarto... de castigo! Mas, no caminho para o quarto, ainda gritava:

– A água e o gelo, juntos, não mudaram de temperatura até que o gelo derretesse todo!!!

Mas Cristiana não deu ouvidos...

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- podemos representar a estrutura da matéria como átomos ligados entre si;
- uma mudança de estado ocorre quando uma substância muda de uma fase para outra (sólida, líquida ou gasosa);
- a temperatura de uma substância que está mudando de fase não varia, pois a maior parte da energia térmica cedida ao corpo é utilizada para quebrar as ligações químicas entre as moléculas, e não para aumentar a agitação molecular;
- calor latente (L) é a quantidade de energia necessária para que uma substância de massa m mude de estado ($L = \Delta Q/m$);
- podemos usar a conservação de energia para calcular a temperatura final de equilíbrio térmico entre corpos que foram colocados em contato com diferentes temperaturas.

Exercício 1

Calcule a quantidade de calor necessária para que um litro de água a 100ºC se torne vapor a 100ºC. Lembre-se de que a densidade da água é $d_{\text{água}}$ = 1kg/l (utilize a tabela de temperaturas de ebulição).

Exercício 2

Quantas calorias 10g de água a 0ºC devem perder para se transformar em gelo a 0ºC?

Exercício 3

Um ferreiro quer esfriar um bloco de ferro de 100 g que está a uma temperatura de 200ºC. Qual será a temperatura final (equilíbrio térmico), se o ferreiro mergulhar o bloco em um litro de água que está a 20ºC? Considere que não há perdas de energia para o ambiente. Lembre-se de que o calor específico do ferro é igual c_{ferro} = 0,11cal/g ºC.

Exercício 4

Cristiana resolveu fazer gelo, já que Ernesto tinha acabado com todo o gelo da casa. Colocou um litro de água a 20ºC no congelador. Calcule a quantidade de energia térmica que deve ser retirada da água para que ela se torne gelo a – 20ºC.

AULA

26

Hoje, a torcida está “esquentada”!

PARA COMEÇAR

É domingo. Fim de tarde, dia de futebol. Gaspar e Maristela foram ao jogo no estádio. A fila era muito grande, mas os dois, torcedores fanáticos, não desistiram. Multidão imensa, verdadeiro tumulto, grande empurra-empurra. Os portões do estádio ainda estavam fechados e mais gente chegava. Gaspar começou a ficar nervoso. Maristela, com seu jeito desligado, nem percebia que os torcedores estavam cada vez mais agitados.

Então, Gaspar disse: – Isso aqui está parecendo uma panela de pressão!

Nesse momento, os portões se abriram, e foi aquela correria. Quem estava mais perto da entrada pegou os melhores lugares. Maristela e Gaspar estavam mais atrás. Finalmente, começaram a andar. A sensação de “aperto” foi diminuindo. Em pouco tempo eles estavam bem aliviados com a redução da “pressão”. Todos conseguiram se sentar, pois o estádio era grande e tinha lugar sobrando para todos. Isso deixou a torcida bastante calma e animada para o jogo.

De repente, Maristela se levanta, com os olhos arregalados, e grita:

– Nós somos como as moléculas de um gás!!!

Gaspar não acreditou no que viu e ouviu. Rapidamente, puxou Maristela para fazê-la sentar-se novamente. Mas já era tarde: as gozações começaram a vir de todos os lugares

Maristela não teve dúvidas: puxou seu caderninho de anotações e começou a escrever: “Panela de pressão, alívio de pressão, diminuir agitação...”

O jogo começou. Maristela voltou ao seu estado de torcedora convicta, gritando e reclamando do juiz. Ela e Gaspar saíram satisfeitos do estádio, com a vitória do seu time e voltaram para casa. Gaspar deu carona a Maristela, que o convidou para tomar um refresco em sua casa. Gaspar aceitou imediatamente.

Quando chegaram à casa de Maristela, Gaspar finalmente perguntou sobre o grito que Maristela tinha dado no estádio:

– O que você quis dizer quando nos chamou de moléculas de um gás?

O modelo atômico da matéria

Fique ligado

Como vimos na aula passada, podemos representar a matéria como um conjunto de átomos. A maneira pela qual os átomos se ligam uns aos outros caracteriza os estados em que essa matéria se encontra, isto é, sólido, líquido ou gasoso. Vimos também que todas as substâncias mudam de estado numa determinada temperatura.

A água, por exemplo, quando se encontra sob pressão de 1 atm (atmosfera), tem temperatura de fusão a 0ºC e de ebulição a 100ºC.

Na Aula 22, estudamos o comportamento de sólidos e líquidos quando aquecidos. Sabemos que a maioria dos materiais se dilata, quando aquecida, e se contrai, quando resfriada.

Nesta aula estudaremos o comportamento dos gases, quando são aquecidos ou resfriados

Os gases

Maristela começou a explicar a Gaspar a analogia que estava fazendo quando comparou os torcedores às moléculas de um gás. Levou Gaspar até a cozinha, colocou uma panela de pressão vazia no fogão e começou a aquecê-la:

– Veja bem: o modelo que fazemos de um gás é o de um conjunto de moléculas (ou átomos) que tem ligações muito fracas entre si, e grandes velocidades. O que ocorre quando fechamos uma panela de pressão apenas com ar dentro e a colocamos no fogo é que, ao fornecer calor (energia térmica) às moléculas, elas se agitam mais rapidamente (aumento de temperatura) e se chocam mais intensamente contra a parede da panela (aumento de pressão). À medida que fornecemos calor, a pressão aumenta até ser suficiente para levantar a válvula de segurança da panela.

– Dessa forma, o gás começa a escapar pela válvula. Isso ocorre porque a pressão externa à panela é menor que a pressão no seu interior, e isto permite que o gás escape do interior da panela, e impede que a pressão aumente ainda mais.

– Com a torcida se deu quase a mesma coisa. O "calor", nesse caso, é a impaciência das pessoas que começam a ficar irritadas pelo fato de o portão do estádio não abrir. A agitação entre as pessoas vai aumentando de tal forma que, se não abrem o portão, a multidão "explode". O mesmo ocorre como a panela de pressão: se não tivesse a válvula de segurança, ela explodiria.

– Muitas pessoas colocam a panela de pressão debaixo da torneira d'água para que ela esfrie mais rápido e possa ser aberta sem risco. Isso porque, quando o gás é resfriado, a agitação molecular diminui até que não seja mais suficiente para levantar a válvula de segurança.

Neste momento, Gaspar interrompe Maristela e diz:

– A gente pode dizer, então, que a pressão é diretamente proporcional à temperatura?

– Exatamente! – gritou Maristela. – Sempre que aumentamos a temperatura de um gás que está num recipiente rígido, isto é, que não muda de volume, sua pressão irá aumentar! Matematicamente podemos escrever que:

$$P \propto T$$

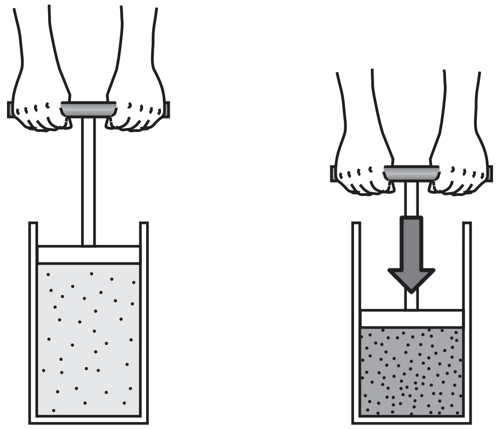
ou seja, a pressão é diretamente proporcional à temperatura.

Relação P-V

Gaspar se animou.

– Nossa sorte foi que o estádio era grande, pois mesmo com a torcida agitada não houve muitos problemas. Se o estádio fosse menor, certamente seria bem pior!

– Sem dúvida! Se o estádio fosse menor não teríamos tantos lugares, e a agitação pela disputa de cadeiras seria grande. Com os gases acontece quase o mesmo fenômeno. Ou seja: se pegamos um cilindro com um gás dentro e com temperatura constante, isto é, com a mesma agitação molecular, e começamos a comprimi-lo, diminuindo seu volume, conseqüentemente a pressão vai aumentar, pois o numero de moléculas que vão se chocar num espaço menor será maior. Veja este desenho...



Quando comprimimos o gás, seu volume diminui.

– Da mesma forma, – disse Gaspar – se o estádio fosse muito grande praticamente não haveria problema entre as torcidas, pois sobraria espaço!

– Claro! A respeito do gás poderíamos dizer quase a mesma coisa. Se deixamos o gás se expandir com temperatura constante, a pressão vai diminuir, ou seja, as moléculas vão ter bastante espaço para se mover, e mais raramente vão se chocar contra as paredes do cilindro.

Gaspar continuou, com ar de quem já estava dominando o assunto:

– Então, podemos dizer que o volume do gás é inversamente proporcional à sua pressão!

Maristela quase não acreditou no que o amigo havia dito! Fantástico! Era exatamente o que ocorria, e ela rapidamente anotou no seu caderninho:

$$P \propto \frac{1}{V}$$

Gaspar, pelo jeito, estava numa noite inspirada. Depois de um gole de refresco, disse:

– Mas, Maristela, imagine que estivéssemos no estádio e que as pessoas estivessem igualmente agitadas, mas que o número de pessoas fosse muito maior. Nesse caso, poderíamos dizer que a pressão aumenta?

– Você, hoje, está afiado! Sem dúvida você está correto, mas **tome muito cuidado com as comparações**, pois estamos usando as pessoas num estádio de futebol só como uma comparação. Na verdade, as pessoas não formam um gás. Por isso, quando você usa a palavra “pressão”, tem de lembrar que esse conceito está bem definido para os fenômenos da natureza, mas não está bem definido para os fenômenos da sociedade humana!

Gaspar acenou com a cabeça e continuou:

– Tudo bem, mas imagine um gás num recipiente fechado, à temperatura constante. Se aumentarmos o número de moléculas dentro do recipiente, sua pressão não irá aumentar?

– Sem dúvida! – respondeu Maristela. – E, assim, podemos dizer que a pressão também é diretamente proporcional ao número de moléculas que estão presentes naquele volume de gás, ou seja, podemos escrever que:

$$P \propto n$$

Lei dos gases

Finalmente, Maristela colocou na mesma folha de papel todas as conclusões tiradas:

$$P \propto T$$

$$P \propto \frac{1}{V}$$

$$P \propto n$$

Se a pressão é proporcional a cada um dos termos acima, ela é proporcional ao produto de todos eles, ou seja:

$$P \propto \frac{nT}{V}$$

A proporcionalidade pode se tornar um modelo matemático, ou seja, podemos reescrever essa expressão como:

$$P = R\frac{nT}{V}$$

onde **R** é uma constante de proporcionalidade, que pode ser medida! Podemos finalmente reescrever essa equação como:

$$\frac{PV}{T} = nR$$

Essa expressão é muito importante, pois nos permite fazer algumas previsões!

Equação de estado de um gás ideal

Na expressão acima, o número de moléculas **n** é representado pelo número de moles do gás. Sabe-se, por experiências, que **1 mol** de qualquer gás contém:

$$n_0 = 6{,}02 \cdot 10^{23} \text{ moléculas do gás}$$

Esse valor é chamado de **número de Avogadro**. A unidade **mol** serve para representar o número de moléculas de um gás, de forma simples, em vez de se usar números enormes como o número de Avogadro.

A constante **R** pode ser obtida experimentalmente. Por exemplo: um mol de qualquer gás, a uma temperatura de 0ºC, ou seja, a 273 Kelvin, a uma pressão de 1 atm, ocupará o volume de 22,4 litros. Essa condição do gás é chamada de **CNTP**, isto é, **condições normais de temperatura e pressão**, que é uma convenção.

Com essas informações, podemos calcular a constante **R**:

$$R = \frac{PV}{nT}$$

$$R = \frac{1\text{atm} \cdot 22{,}4\ \ell}{1\text{mol} \cdot 273\text{K}}$$

$$R = 0{,}082\frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Essa constante é chamada de **constante universal dos gases**. Isto significa que ela tem o mesmo valor para todos os gases da natureza.

Transformações gasosas: como prevê-las?

Depois que começou a entender o comportamento os gases, Gaspar deu asas à imaginação e começou a usar a equação de estado dos gases em várias situações diferentes.

– Então podemos prever como vai se comportar a temperatura, a pressão ou o volume de um gás depois que ele foi aquecido, ou resfriado, ou, ainda, comprimido!

– É verdade. Suponha que um gás num recipiente fechado sofra uma variação nas suas condições. Podemos escrever que, inicialmente:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR$$

E, depois da transformação, escrevemos:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = nR$$

Como **n** é constante, pois o recipiente está fechado e não entra nem sai gás, podemos escrever que:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Assim, dados a pressão, a temperatura e o volume do gás no estado 1 e a temperatura e a pressão no estado 2, podemos calcular qual será o volume no estado 2, isto é, após a transformação. De modo geral, para um gás que está num estado inicial (i) e que sofre uma transformação e altera seu estado para um estado final (f), podemos escrever:

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f}$$

Três tipos de transformações gasosas podem ser expressas com a equação acima.

- **Isotérmica** é a transformação que ocorre à temperatura constante, ou seja, $\mathbf{T_i = T_f}$. Podemos expressá-la do seguinte modo:

$$P_i V_i = P_f V_f$$

- **Isobárica** é a transformação em que a pressão se mantém constante, ou seja, $\mathbf{P_i = P_f}$. Podemos escrever:

$$\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_f}{T_f}$$

- **Isovolumétrica** é a transformação em que o volume é constante, $\mathbf{V_i = V_f}$. Podemos então escrever:

$$\frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f}$$

- Há ainda outra forma de transformação gasosa, que chamamos de **transformação adiabática**. Esse tipo de transformação ocorre quando o gás sai do seu estado inicial e vai para o seu estado final sem que hajam trocas de calor com o ambiente que o cerca.

Gaspar, satisfeito por compreender várias coisas sobre os gases, acabou seu refresco e disse que precisava ir para casa, pois Alberta devia estar preocupada.

Quando Gaspar chegou em casa, Alberta estava uma fúria.

– Como você não avisa aonde vai depois do jogo? Achei que tinha se perdido na multidão!

Gaspar explicou a situação. Isso acalmou um pouco Alberta.

– Vi na televisão como a torcida estava inflamada antes do jogo. A entrada do estádio parecia um caldeirão. Pelo menos abriram os portões antes que a multidão provocasse um estrago. Já imaginou o trabalho que ia dar?

Alberta foi dormir, mas Gaspar ficou curioso com a observação de Alberta e logo pensou: “Será que um gás realiza trabalho?”

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- a hipótese atômica da matéria, ou seja, a hipótese de que a matéria é constituída de átomos;
- as relações entre pressão, volume e temperatura nas transformações gasosas;
- como trabalhar com a equação de estado de um gás ideal (ou seja, de um modelo de gás);
- os tipos de transformações de gases que existem: isobárica, isotérmica, isovolumétrica e adiabática.

Mãos à obra

Exercício 1

Em testes com pneus, as fábricas verificam qual é a variação de pressão que ocorre após uma viagem. No início de uma dessas viagens, por exemplo, o pneu foi calibrado com uma pressão de 30 lb/pol^2, a uma temperatura de 27ºC . Ao final da viagem a temperatura do pneu é 57ºC.

Supondo que a variação do volume do pneu seja desprezível, responda:

a) que tipo de transformação ocorreu com o ar dentro do pneu;

b) qual será a pressão do ar no pneu ao final da viagem? (Cuidado com a unidade da temperatura!)

Exercício 2

Numa fábrica de válvulas, um técnico suspeita de vazamento numa delas, provavelmente devido a um ajuste mal feito no êmbolo, que permite a saída do gás. Para testar sua hipótese, tomou algumas medidas. Primeiro, verificou o estado inicial do gás no interior da válvula. A pressão era de 70cmHg e seu volume era de 20 cm^3. Quando o gás chegava ao novo estado, com a mesma temperatura, tinha uma pressão de 120 cmHg e volume de 10 cm^3. Verifique a hipótese do técnico, e diga se ela estava correta.

Exercício 3

Um mergulhador solta uma bolha de ar, cujo volume é de 2,5 cm^3, a uma profundidade de 30 metros. Pode-se considerar desprezível a variação da temperatura da água, ou seja, podemos considerar que a bolha e a água têm temperatura constante e que estão em equilíbrio térmico. À medida que a bolha sobe, a pressão diminui (lembre-se de que a cada dez metros de profundidade, aproximadamente, a pressão aumenta 1 atm; na superfície, a pressão atmosférica é de 1 atm). Calcule o volume da bolha ao atingir a superfície.

Exercício 4

Calcule o número de moléculas de um gás contido num recipiente de 44,8 litros, a 27ºC de temperatura e pressão de 1 atm. (Sugestão: primeiro calcule o número de moles do gás, depois use a relação entre um mol e o número de Avogadro).

AULA

27

Águas passadas não movem moinho!

PARA COMEÇAR

Foi uma semana de trabalho bastante dura, mas finalmente chega a sexta-feira. Gaspar chama a amiga Maristela e os novos amigos, Roberto e Cristiana, para jantar em sua casa.

Alberta, que gosta de receber amigos, preparou uma boa refeição. Carne assada com batatas, um verdadeiro quitute.

Às oito horas chegam os convidados, todos juntos: Maristela, Cristiana e Roberto, que deixaram Ernesto com a mãe de Roberto.

Gaspar recebeu os convidados, que logo lhe deram uma má notícia.

– O pneu do seu carro está vazio! – disse Roberto. Gaspar ficou bastante chateado, pois pretendia sair bem cedo para a praia no dia seguinte.

Maristela deu a solução:

– Vamos até o posto de gasolina no carro de Roberto e consertamos o pneu. Afinal, o jantar não está pronto!

Alberta concordou na hora, pois também queria sair cedo no dia seguinte. E foram os três até o posto de gasolina.

Lá, o borracheiro rapidamente achou o furo e selou o pneu. Mas havia um problema: a bomba de ar comprimido estava quebrada e ele só tinha uma bomba manual, parecida com as de encher pneus de bicicleta.

Sem outro jeito, o borracheiro começou a bombear ar, manualmente, para dentro do pneu do carro.

Depois de cinco minutos já estava cansado, obrigando Gaspar, Roberto e Maristela a fazer um rodízio para bombear o ar para dentro do pneu.

Quando chegou a vez de Roberto, ele fez uma observação:

– Nossa! Como a bomba de ar está quente! Parece que foi colocada no fogo!

Nesse momento Gaspar e Maristela olharam um para o outro, como se tivessem tido o mesmo pensamento.

– Santo gás! – gritou Maristela, seguida pelo grito de Gaspar: – É o trabalho!

Roberto e o borracheiro ficaram paralisados: não estavam entendendo nada. Maristela pegou seu caderninho e começou a anotar algumas idéias.

Fique ligado

A energia interna de um gás

Já estudamos que o aumento da temperatura de um gás está associado ao aumento da velocidade média de suas moléculas, ou seja, ao aumento da energia cinética média das moléculas.

Mas, para saber a **energia total** desse gás, não basta levar em consideração a energia cinética de translação das moléculas: é preciso considerar as outras formas de energia que as moléculas possuem. Além de ir de um lado para o outro (translação), as moléculas podem girar. Nesse caso, elas têm uma energia cinética **de rotação**. Também se deve levar em conta a energia de ligação entre os átomos que formam as moléculas. A soma de todas essas energia recebe o nome de **energia interna** do gás (**U**).

Levando sempre em consideração a energia interna do gás não precisamos mais nos preocupar com cada um dos tipos de energia das moléculas, pois a energia interna representa a soma de todos os tipos de energia que as moléculas podem ter.

Então, se a energia interna inclui a energia cinética, ao variar a temperatura do gás, varia também sua energia interna. Observe o quadro abaixo:

RELAÇÃO ENTRE T_1 E T_2	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA	VARIAÇÃO DE ENERGIA INTERNA	ENERGIA INTERNA
$T_2 > T_1$	$\Delta T > 0$	$\Delta U > 0$	AUMENTA
$T_2 < T_1$	$\Delta T < 0$	$\Delta U < 0$	AUMENTA
$T_2 = T_1$	$\Delta T = 0$	$\Delta U > 0$	NÃO VARIA

O trabalho de um gás

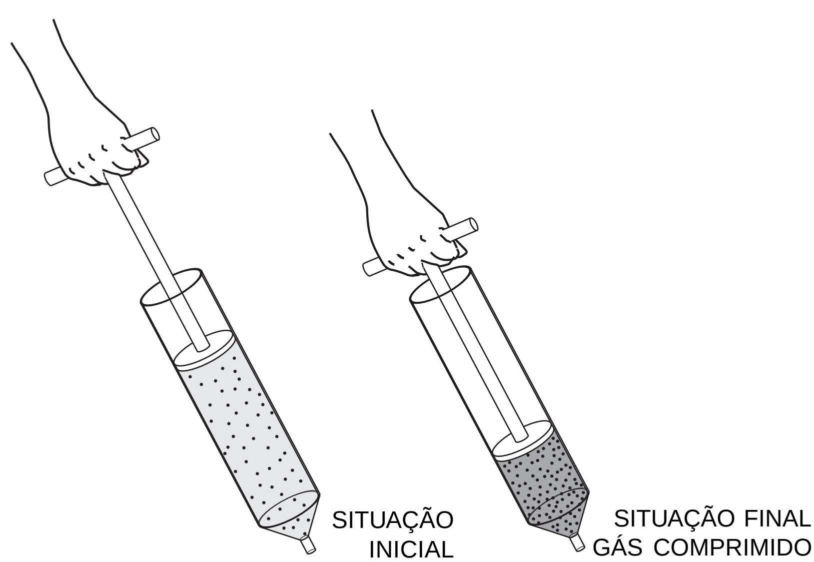
Gaspar passou a semana fazendo a si mesmo uma pergunta: "Como o gás realiza trabalho?" Desde o jogo de futebol da semana anterior ele andava com isso na cabeça. Estava aprendendo com Maristela e já tinha seu próprio caderninho, no qual fazia anotações.

Lembrando do que aconteceu à bomba de ar, teve uma idéia de como o gás produz trabalho.

Escreveu a equação de estado dos gases perfeitos e percebeu que, quando um gás com um número de moles constante recebe calor, sua tendência é de expandir-se. Assim, variam seu volume, sua pressão e sua temperatura, segundo a relação:

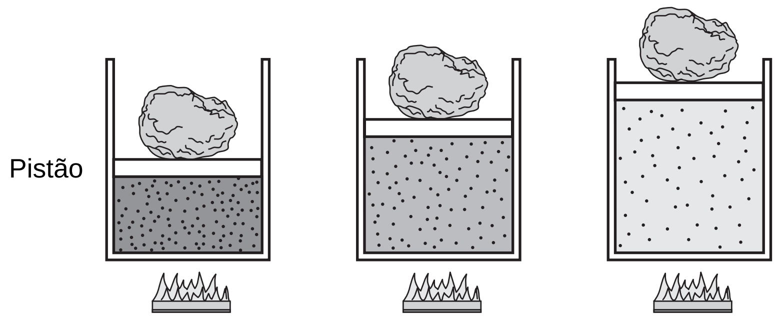
$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f}$$

Gaspar fez um desenho simplificado do pistão da bomba de ar do borracheiro.



"Se o gás, quando recebe calor, se expande, ele pode realizar um trabalho", pensou Gaspar, já fazendo outro desenho.

O gás recebe calor que é transmitido às suas moléculas. Com isso a velocidade das moléculas aumenta, de modo que elas buscarão mais espaço para se movimentar (lembre-se da dilatação, Aula 22). Para conseguir isso, o gás terá de empurrar o pistão, aplicando uma força sobre o mesmo! Logo, o gás é capaz de realizar trabalho!



Quando fornecemos calor ao gás ele se expande, podendo realizar trabalho

– Claro! – gritou Gaspar. – Se cedemos calor para o gás, sua energia interna aumenta, assim como sua temperatura, sua pressão e seu volume! E o trabalho realizado poderá ser o de levantar um objeto, como por exemplo o pistão, uma pedra, ou mesmo a válvula de segurança da panela de pressão!

– Mas o que está acontecendo com a bomba de encher pneu é exatamente o contrário! – concluiu. – Roberto está realizando um trabalho sobre o gás, comprimindo-o. Esse trabalho está aumentando a energia interna do gás; com isso, sua temperatura também está aumentando! É fácil perceber o aumento da temperatura, pois a bomba ficou quente!

Mas isso tudo era demais para Gaspar. Ele sentou num pneu que estava no chão e, com os olhos arregalados, perguntou a Maristela:

– Trabalho pode virar calor, calor pode virar trabalho. Isso quer dizer que calor e trabalho são a mesma coisa?

Primeira lei da termodinâmica

– É, amigo Gaspar, você realmente está se tornando um perguntador de primeira! – disse Maristela.

André, o borracheiro, tinha se apresentado para Roberto. Os dois haviam desistido de esperar Gaspar e Maristela, sentaram no bar ao lado do posto e decidiram tomar uma cerveja enquanto a discussão se prolongava.

– Gaspar, você chegou ao ponto central do que chamamos de **termodinâmica**, que é o estudo de como os corpos trocam calor entre si. Essa pergunta que você está fazendo é a mesma que vários cientistas do século passado fizeram, ou seja: **qual é a equivalência entre calor e trabalho?**

– Foi um inglês chamado James Prescout Joule quem respondeu a essa pergunta, fazendo uma experiência que ficou muito famosa. É a chamada **experiência de Joule**. Ele mediu a energia necessária para aumentar 1ºC a temperatura de um grama de água.

– Já sei. 4,18 joules!

– Exatamente – respondeu Maristela. – Uma versão moderna da experiência de Joule seria esquentar o café num liquidificador. É óbvio que ele não tinha liquidificador, mas tinha um aparelho com o qual podia medir o trabalho realizado por pás que giravam dentro d'água. Joule relacionou o valor desse trabalho com o calor cedido, medindo a variação de temperatura da água e obtendo o valor que você acabou de dizer, 4,18 joules!

Na verdade, essa equivalência representa uma forma de expressar a **conservação de energia**, ou seja: a energia cedida pelas pás à água se transforma em energia interna da água! Quando as pás se movem, realizam um trabalho sobre o líquido. Isso provoca o aumento da energia interna do líquido. Ou seja, observamos que o trabalho se transforma em energia interna, da mesma forma que o calor cedido a um gás provoca sua expansão, podendo então se transformar em trabalho!

Gaspar ficou pensativo.

– Podemos, então, usar o calor para realizar um trabalho, ou seja, basta uma pequena quantidade de calor para realizar muito trabalho!

– Calma, você já está exagerando! Veja, não é possível usar toda a energia térmica cedida, pois parte dela é usada para aumentar a energia interna do gás. A outra parte é utilizada para realizar trabalho! - respondeu Maristela, escrevendo no seu caderninho:

$$\boxed{\Delta Q = \Delta U + \tau}$$

– Essa equação expressa a **primeira lei da termodinâmica**. Ela mostra que o calor cedido a um gás (ΔQ) é usado em parte para aumentar a energia interna desse gás (ΔU). Outra parte é usada para realizar um trabalho (τ)."

– Isso quer dizer que **nem todo calor pode se transformar em trabalho**, ou seja, **existe um limite na transformação de calor em trabalho**? – perguntou Gaspar.

– Gaspar, meu caro! Isso que você disse, em forma de pergunta, é a **segunda lei da termodinâmica**!

Segunda lei da termodinâmica

Gaspar estava satisfeito com sua conclusão. Maristela então disse que muitos já haviam feito a mesma observação, sem dar a ela o nome de segunda lei da termodinâmica.

– Essa lei tem o seguinte significado: **há um limite na transformação de calor em trabalho. É possível transformar todo trabalho em calor, mas não é possível transformar todo calor em trabalho!**

– Você quer dizer que, quando usamos calor para gerar trabalho, nem sempre aproveitamos totalmente a energia térmica?

– Exatamente! Parte dessa energia se transforma em energia inutilizável, que acaba dispersa no ambiente. Lembre-se do exemplo do automóvel. A energia química que o combustível possui só é utilizada **em parte** para movimentar o automóvel. O resto se perde em energia térmica ou sonora, que são irrecuperáveis!!

Outra forma de expressar a segunda lei é dizer que **o calor só se transfere espontaneamente de corpos de maior temperatura para os de menor temperatura**. Isso significa que o frio que sai de nossa geladeira, quando está aberta, não vai retornar espontaneamente para dentro dela. O mesmo ocorre num dia frio: quando deixamos a janela aberta, dificilmente o calor que estiver fora da casa vai entrar espontaneamente para nos aquecer!

– Maristela, o que você está querendo me dizer é que essas transformações são **irreversíveis**?

Ovo frito não gera galinha!

Foi um cientista chamado R. Clausius quem, pela primeira, vez deu forma matemática à segunda lei da termodinâmica. Para isso ele criou uma nova grandeza, um novo conceito que pudesse expressar esse limite da transformação de calor em trabalho. Clausius deu a essa grandeza o nome de **entropia**, cuja variação pode ser expressa matematicamente como:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Vê-se que a unidade da entropia é Joule dividido por Kelvin (J/K).

A entropia é uma forma de calcular, no caso de sistemas gasosos, se a transformação que ocorreu com o gás é reversível ou não.

Por exemplo: quando pegamos uma seringa (sem agulha), tapamos o orifício menor e, em seguida, pressionamos o êmbolo de forma muito leve, percebemos que o ar (que é um gás) no interior da seringa sofre uma pequena compressão. Mas, ao soltarmos o êmbolo, ele volta à situação inicial, isto é, o gás volta às mesmas condições de volume, temperatura e pressão. Nessa transformação reversível, dizemos que a variação da entropia do sistema foi nula, pois não houve dissipação de energia. Ou seja: nenhuma parte da energia do sistema se transformou em energia irrecuperável.

Se apertarmos fortemente o êmbolo, de modo que o gás seja muito comprimido, podemos sentir seu aquecimento. Isso significa que a temperatura do gás aumentou. Como a seringa não é um isolante térmico, parte do calor do gás se perde na atmosfera, conduzido pelas paredes da seringa. Quando soltamos o êmbolo, parte da energia do sistema já se perdeu de forma irrecuperável, de modo que o gás não volta exatamente às condições iniciais. Dizemos então que **a entropia do sistema aumentou**.

De volta à borracharia

Roberto e o borracheiro André voltaram do bar. Gaspar e Maristela ainda estavam falando sobre transformações gasosas, irreversibilidade e entropia. Roberto, ao ouvir toda aquela discussão, disse:

– Acho que Alberta e Cristiana devem estar num estado irreversível de irritação profunda pela nossa demora. Sei que **não adianta chorar sobre o leite derramado**, ou mesmo que **águas passadas não movem moinho**, mas vamos nos apressar!

Gaspar levou um susto, pois Roberto pegara o espírito da conversa! Olhou o relógio e tomou outro susto, ao perceber que já estavam ali há mais de uma hora. Gaspar e Maristela guardaram seus caderninhos; a conta foi paga e todos se despediram de André.

Ao chegarem ao carro de Roberto, perceberam que os dois pneus da frente estavam furados. Roberto não acreditou! Gaspar e Maristela, empolgados com a discussão, não perderam tempo: foram tomar uma cerveja no bar, enquanto Roberto e André voltavam para consertar os dois pneus.

Foi quando Roberto pensou em voz alta:

– O ar sempre sai do pneu. Por que nunca entra no pneu? Isso facilitaria tanto a vida... Será possível essa transformação?

André não teve dúvidas:

– Tão possível quanto o café que eu tomo pela manhã se separar sozinho do leite!

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o conceito de energia interna de um gás (U);
- que um gás pode realizar trabalho (τ);
- que a primeira lei da termodinâmica representa a conservação da energia nas transformações gasosas;
- que existe uma equivalência entre o trabalho mecânico e a energia térmica (calor);
- que há um limite para a transformação de calor em trabalho;
- que esse limite é expresso pela segunda lei da termodinâmica;
- que à segunda lei da termodinâmica está associado o conceito de entropia (**S**), que determina se uma transformação gasosa é reversível ou irreversível.

Mão à obra

Exercício 1

Escreva a primeira lei da termodinâmica para o caso das transformações:

a) isotérmica ($\Delta T = 0$);

b) isovolumétrica ($\Delta V = 0$);

c) adiabática ($\Delta Q = 0$).

Escreva suas conclusões.

Exercício 2

Numa transformação isovolumétrica, um gás recebe uma quantidade de calor igual a 1.000 joules. Qual será a variação da energia interna desse gás e qual será o trabalho por ele realizado?

Exercício 3

Um farmacêutico está fazendo experiências com dois gases. O gás A sofre uma transformação isovolumétrica e o gás B sofre uma transformação isotérmica. Cada um dos gases recebeu uma quantidade de calor ΔQ. Escolha a alternativa que descreve corretamente como se deu a variação da energia interna de cada gás. Explique sua resposta.

ALTERNATIVA	GÁS A TRANSFORMAÇÃO ISOVOLUMÉTRICA	GÁS B TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA
a)	$\Delta U > 0$	$\Delta U < 0$
b)	$\Delta U < 0$	$\Delta U > 0$
c)	$\Delta U = 0$	$\Delta U > 0$
d)	$\Delta U > 0$	$\Delta U > 0$
e)	$\Delta U > 0$	$\Delta U = 0$

AULA

28

Dá um tempo, motor!

PARA COMEÇAR

Depois de passar quase a noite toda no borracheiro, Roberto voltou pra casa com Cristiana e Maristela, que ainda fazia anotações no seu caderno. O silêncio de Maristela despertou a curiosidade de Cristiana, que perguntou:

– Maristela, o que você tanto escreve nesse caderno?

– Na realidade, estou tentando compreender como podemos usar um gás para construir um motor que transforme a energia térmica em trabalho, ou mesmo em energia de movimento!

Cristiana, que já tinha escutado esse assunto durante todo o jantar na casa de Alberta e Gaspar, desistiu de continuar a conversa com Maristela. Roberto, por sua vez, se interessou pelo assunto, pois tinha pensado em fazer um curso de mecânica para não precisar mais levar o carro ao conserto e economizar um dinheirão. Ele perguntou para Maristela:

– Você já falou tanto na expansão de um gás realizando trabalho. Por que você não usa isso?

– Essa é a idéia! – disse Maristela. – Só que, para que um motor funcione continuamente, precisamos de uma quantidade enorme de gás, de forma que seria muito caro montar um recipiente que abrigasse todo esse volume!

Cristiana, que estava ouvindo a conversa, lembrou da panela de pressão e disse, com ar de entendida:

– Por que não usa uma panela de pressão? Se você conseguisse controlar o vapor que sai pela válvula de segurança, poderia usá-lo para alguma coisa.

Maristela quase não acreditou no que ouviu. Era a solução! Rapidamente, disse:

– Sem dúvida é uma boa idéia, mas usar uma panela de pressão para fazer um motor é muito perigoso! Mas, como a idéia é boa, pelo menos vamos fazer um pequeno projeto de máquina a vapor!

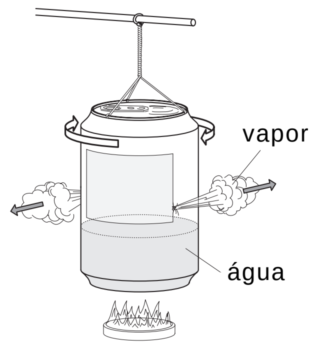
Fique ligado

Projetando a máquina a vapor

Sábado pela manhã, Roberto e Cristiana estavam na casa de Maristela. Como Ernesto tinha ido passar o fim de semana com a avó, o casal estava com o tempo mais livre.

Maristela pesquisou numa enciclopédia que tinha em casa e descobriu que a máquina a vapor é uma das máquinas mais antigas. Heron, um grego, já havia construído uma máquina a vapor. Só que, naquela época, ela não era usada como máquina, mas como curiosidade a ser observada.

– Eu construí um modelo da máquina de Heron com um material bem simples. Vejam aqui: quando esquentamos o fundo da lata, ela começa a se movimentar!

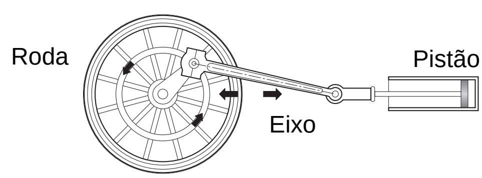


– É impressionante – falou Roberto –, poderíamos usar uma máquina dessas, um pouco maior, para puxar o jornal lá da portaria!

– Falou o preguiçoso! Assim você não vai emagrecer nunca! – observou Cristiana.

Maristela puxou, então, uma grande folha de papel, começou a desenhar e falou:

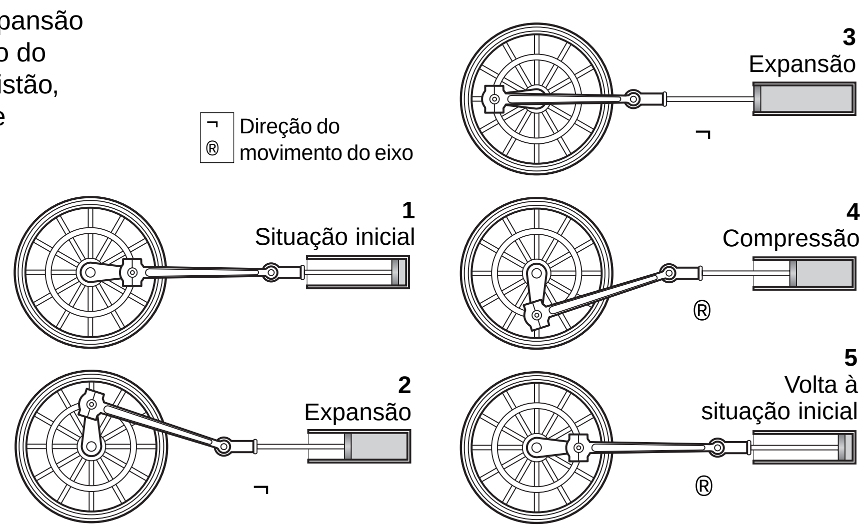
– Você tem razão, Roberto. Para puxar um peso como o de um jornal, a máquina teria de ser bem maior, ou pelo menos teria de ser uma máquina **mais eficiente**! Você já viu como é a roda de uma locomotiva? É mais ou menos assim:



– Também sabemos que um gás se expande quando aquecido. É o que acontece na panela de pressão, como nos lembrou ontem a Cristiana – completou Maristela.

– Exato! – disse Roberto. – Numa locomotiva, ao aquecermos o gás no interior do êmbolo ele se expande, empurrando o eixo que gira a roda um quarto de volta. Quando o gás se expande completamente, a roda gira meia volta. Quando o gás resfria, se contrai, diminuindo seu volume e puxando o eixo de volta, e fazendo com que a roda gire mais um quarto de volta. Finalmente, quando o gás está totalmente comprimido, o pistão e o eixo voltam à situação inicial.

Etapas de expansão e compressão do gás em um pistão, numa roda de locomotiva

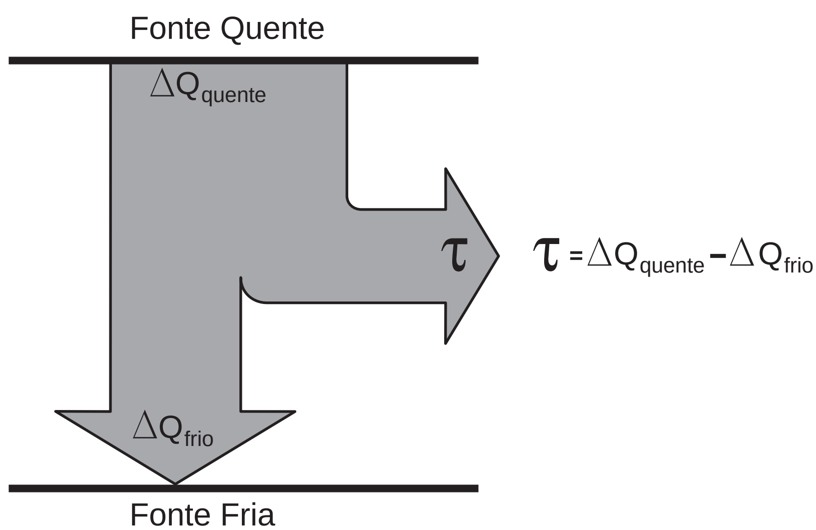


O rendimento de uma máquina

– É claro que queremos uma máquina eficiente, ou seja, que a energia que fornecemos a ela seja quase toda transformada em trabalho – disse seriamente Maristela. – Podemos até escrever de forma matemática o rendimento de uma máquina, como:

$$\eta = \frac{\tau}{\Delta Q_{quente}}$$

– Portanto, o rendimento é a razão entre o que é utilizado pela máquina (**energia útil**), ou seja, o trabalho (τ) realizado pela máquina, e o calor fornecido pela fonte quente (ΔQ_{quente}). Vamos fazer um esquema da máquina térmica.



Roberto, ao ver o esquema, comentou:

– Do jeito que está aí, o trabalho realizado pela máquina é igual à diferença entre o calor que entra na máquina (ΔQ_{quente}) e o calor que sai da máquina (ΔQ_{fria})! Veja só...

$$\tau = \Delta Q_{quente} - \Delta Q_{fria}$$

– Por que você não substitui essa equação na que Maristela escreveu? — disse Cristiana, completamente envolvida no assunto. Assim teremos uma relação entre o rendimento e as trocas de calor envolvidas:

$$\eta = \frac{\tau}{\Delta Q_{quente}} = \frac{\Delta Q_{quente} - \Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}} = 1 - \frac{\Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}}$$

– Fantástico! – gritou Maristela. – Agora fica fácil entender o rendimento! Prestem atenção: se todo calor cedido pela fonte quente for recebido pela fonte fria ($\Delta Q_{quente} = \Delta Q_{fria}$), significa que não vai sobrar nenhuma energia para realizar o trabalho (τ), e somente haverá uma troca de calor entre a fonte quente e a fonte fria, ou seja, a razão

$$\frac{\Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}} = 1$$

E o rendimento é nulo: $\eta = 1 - 1 = 0$

– Isso significa que a máquina não vai funcionar!

– É verdade! – falou Roberto. – A melhor situação é aquela em que a razão entre o calor que sai e o calor que entra é bem pequena! Nessa situação quase todo o calor cedido pela fonte quente irá se transformar em trabalho!

– Sem dúvida – aprovou Maristela. – Precisamos então de duas fontes térmicas com temperaturas bem diferentes para aumentar o rendimento da máquina térmica! Vamos dar uma olhada na minha enciclopédia!

A máquina a vapor e a segunda lei da termodinâmica

Uma das conseqüências da segunda lei da termodinâmica aplicada à construção de máquinas térmicas é o estabelecimento de uma fonte "quente" e de uma fonte "fria" para que se consiga obter trabalho da máquina.

Os motores utilizados lá pela metade do século XVIII eram construídos sem o conhecimento da teoria termodinâmica, que estava sendo elaborada na mesma época. James Watt foi a primeira pessoa a projetar uma máquina a vapor para realizar trabalho. Esse foi o princípio que levou à construção das locomotivas a vapor.

Outro cientista, Sadi Carnot, estabeleceu o limite da eficiência de uma máquina térmica, isto é, Carnot definiu como obter o máximo de trabalho com o mínimo de energia, criando assim o **ciclo de Carnot**. Esse ciclo nada mais é que uma receita de como construir um motor ideal. Na realidade, é um motor teórico, mas serve para nos dizer o que é possível contruir e o que não é!

Carnot demonstrou que a quantidade de calor cedida pela fonte quente é diretamente proporcional à sua temperatura, assim como a temperatura da fonte fria é diretamente proporcional à quantidade de calor recebida ao final da transformação, isto é:

$$\Delta Q_{\text{quente}} \propto T_{\text{quente}}$$

$$\Delta Q_{\text{fria}} \propto T_{\text{fria}}$$

O que nos permite escrever:

$$\frac{\Delta Q_{\text{fria}}}{\Delta Q_{\text{quente}}} = \frac{T_{\text{fria}}}{T_{\text{quente}}}$$

Ou, ainda, em termos do rendimento da máquina térmica:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{fria}}}{T_{\text{quente}}}$$

– É claro! – anunciou Maristela. – Se a fonte fria estivesse a uma temperatura de 0 Kelvin, todo calor da fonte quente se transformaria em trabalho e o rendimento seria de 100%, ou seja:

$$\eta = 1$$

– Mas 0 Kelvin, o zero absoluto, não pode ser alcançado! – disse Roberto. – Eu me lembro de você ter dito isso uma vez.

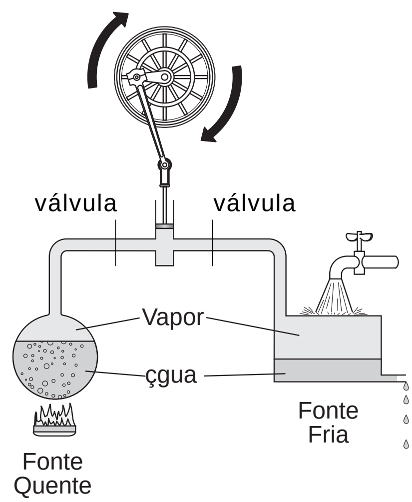
– É verdade! Isso significa que é impossível obter o rendimento igual a 1. Esse é o significado da segunda lei da termodinâmica. O calor passa espontaneamente do corpo quente para o corpo frio. Nessa passagem, podemos aproveitar para obter algum trabalho se tivermos uma máquina, mas há sempre uma parte de calor que vai para a fonte fria e não pode ser utilizada pela máquina térmica.

– Ah! Isso é o que chamam de processo irreversível – gritou Cristiana, que, apesar de calada até aquele momento, estava prestando muita atenção.

Enfim, a máquina

– Já sabemos que nossa máquina terá um rendimento menor que 1 – disse Maristela. – Sabemos que precisamos de uma fonte fria e de uma fonte quente para obter trabalho do gás, e sabemos também que, quanto maior a diferença de temperatura entre as duas fontes, maior será o rendimento da máquina térmica. Agora só falta o desenho final!

Maristela, então, pegou o papel e fez um desenho da sua máquina térmica movida a vapor:



Com o desenho, todos ficaram satisfeitos. Depois se entreolharam, até que Cristiana perguntou:

– Quem vai construir essa máquina?

Roberto ainda fez uma brincadeira:

– É... Acho que, para construir essa máquina, vamos ter de trabalhar muito mais do que ela!

Todos riram, mas ninguém disse que não construiria.

Aquecer é fácil, difícil é esfriar!

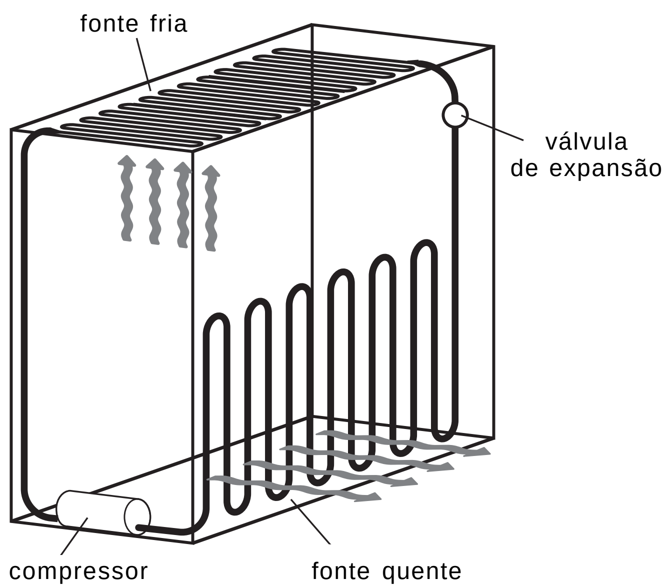
Uma das máquina mais utilizadas hoje em dia é o **refrigerador**. Sua invenção foi realmente de grande ajuda para as pessoas, que passaram a preservar seus alimentos por mais tempo.

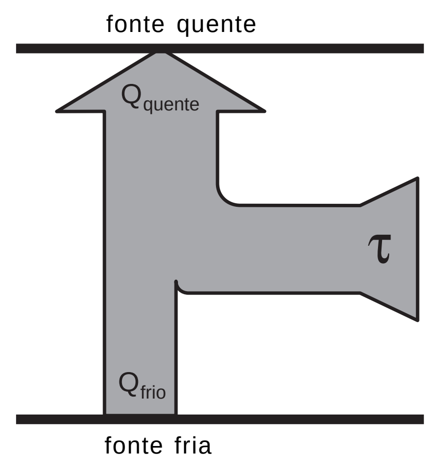
O refrigerador parte um princípio muito simples: se o calor não sai espontaneamente de um corpo frio para um corpo quente, nós vamos forçá-lo a sair! Em vez de o gás realizar trabalho, nós realizaremos trabalho sobre ele!

Como isso é feito? Trata-se de outro processo em que ocorrem transformações gasosas.

Sabemos que, quando expandimos um gás, sua pressão diminui, assim como sua temperatura. Por um cano fino que passa pelo interior da geladeira, um gás é solto e se expande a baixa pressão. Nessa expansão, a temperatura do gás diminui. Com isso, o gás retira calor do ambiente que está a sua volta, ou seja, do interior da geladeira. Um compressor que está na geladeira comprime o gás (freon, em geral) que se encontra numa câmara.

Você pode observar que atrás de sua geladeira existe outro cano, fino e comprido, por onde o gás sai do interior da geladeira. Ele libera o calor para a atmosfera, para novamente repetir o processo.





E como funciona?

O motor a gasolina é mais eficiente do que a máquina a vapor. Isso significa que a energia térmica cedida pela gasolina é maior.

Esse tipo de motor é chamado de **motor de quatro tempos**, pois segue basicamente as quatro etapas seguintes:

1. **Compressão**: uma mistura de gasolina e ar é injetada, pela válvula de admissão, no interior da câmara de combustão. Quando a válvula de admissão é fechada, o pistão sobe, comprimindo a mistura, o que aumenta sua pressão e temperatura.

2. **Ignição**: o dispositivo chamado **vela** solta uma faísca e inflama a mistura, que está extremamente comprimida, provocando uma explosão. Essa explosão gera gases residuais a uma pressão muito maior.

3. **Expansão**: com o aumento da pressão e da temperatura, os gases residuais da explosão se expandem rapidamente, impelindo o pistão para baixo.

4. **Exaustão**: neste momento, a válvula de escape está aberta e a de admissão está fechada, permitindo que os gases residuais saiam da câmara de combustão para que o ciclo se reinicie.

Vários tipos de motores foram construídos em busca de melhor rendimento, alguns com quatro cilindros, outros com seis. Mas, mesmo assim, o rendimento de motores a combustão ainda é muito baixo.

Depois de todo esse estudo, Cristiana, Roberto e Maristela resolveram almoçar na casa da mãe de Roberto, para ver como estava Ernesto. Quando Roberto tentou ligar o carro, esse não deu sinal de vida. Imediatamente, Cristiana disse:

– Está sem bateria...

E Maristela emendou:

– Sem bateria a vela não pode soltar a faísca. Por isso, a mistura de ar e gasolina não pode explodir!

Roberto ficou irritado.

– Pois bem. Já que a bateria não quer trabalhar, as duas sabidonas podem começar a empurrar o carro!

Maristela e Cristiana caíram na gargalhada e desceram para empurrar.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- como funciona uma máquina térmica;
- os princípios de uma máquina a vapor;
- que existe um limite máximo para a transformação de calor em trabalho;
- que esse limite pode ser mostrado pelo rendimento η da máquina;
- que é necessário uma fonte quente e uma fonte fria para que se possa obter trabalho de uma máquina térmica;
- que o limite do rendimento de uma máquina térmica está contido na expressão da segunda lei da termodinâmica;
- os princípios básicos de funcionamento de um refrigerador;
- os princípio básicos de funcionamento de um motor a gasolina de quatro tempos.

Mãos à obra

Exercício 1

Calcule o trabalho realizado pelo motor de geladeira que retira 1.000 cal do congelador e joga no ambiente 1.200 cal.

Exercício 2

Qual é o rendimento máximo de uma máquina térmica que opera entre a temperatura de 27ºC e 227ºC? (Dica: para usar a equação de rendimento, a temperatura deve estar em Kelvin)

Exercício 3

Um motor térmico realiza 20 ciclos por segundo. A cada segundo, ele retira 800 J da fonte quente e cede 500 J à fonte fria. Calcule:

a) o rendimento de cada ciclo;

b) a temperatura da fonte quente, sabendo que a fonte fria está a 27ºC.

AULA

29

Como uma onda no mar...

PARA COMEÇAR

Certa vez a turma passou férias numa pequena cidade do litoral. Maristela costumava ficar horas a fio admirando a imensidão azul do mar, refletindo sobre coisas da vida e, principalmente, sobre fenômenos que vinha observando diariamente na natureza.

Uma tarde, ela convidou Ernesto para dar uma volta. Subiram uma encosta e ficaram um bom tempo observando um tronco de árvore que boiava na superfície do mar. O tronco estava numa parte funda. As ondas passavam por ele e percorriam um longo caminho até encontrar a areia da praia.

Maristela e Ernesto fizeram observações cuidadosas e verificaram que, quando as ondas passavam pelo tronco, este subia e descia, mas não se aproximava nem se afastava da praia. Os dois ficaram em silêncio, até que Ernesto perguntou...

Fique ligado

– Afinal, o que é uma onda?

É a primeira dúvida que nos ocorre.

– Bem, Ernesto, sabemos que há uma onda porque a superfície do mar fica diferente, ela fica deformada. Além disso você pode observar dois fatos importantes: o primeiro é que essa deformação se desloca; o segundo é que o tronco sobe e desce, mas sua distância em relação à praia não muda (Figura 1).

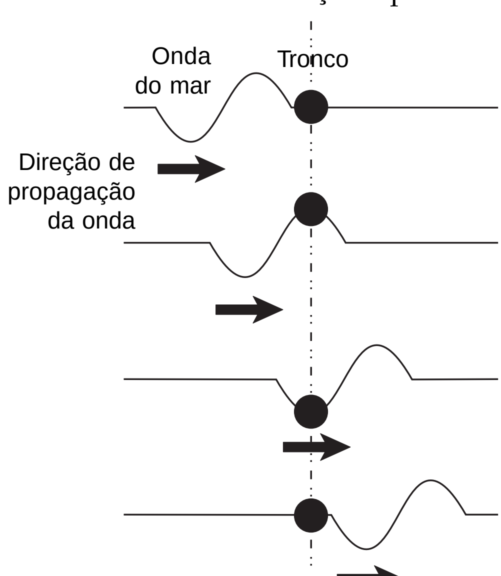


Figura 1

– Essas duas características nos ajudam a definir:

Onda é uma perturbação num meio material que se desloca de um ponto a outro.

Esse tipo de onda é chamado de **onda mecânica**, e sobre ela vamos falar nesta aula.

– Ernesto, é importante notar que a deformação (perturbação) passa sem que o material do meio se desloque. É possível verificar esse fato pelo movimento do tronco: ele sobe e desce, mas não se desloca horizontalmente, e a água também não se desloca.

Vamos explorar mais esse fato. Inicialmente, o tronco estava parado. À medida que a onda passa, ele se movimenta, isto é, ganha velocidade, subindo e descendo. Isso acontece porque a onda transferiu energia ao tronco. Assim, dizemos que:

Uma onda transfere energia de um ponto a outro do meio, sem que haja transporte de matéria.

– Existem vários exemplos de ondas à nossa volta. Por exemplo, uma toalha presa a um varal num dia de vento: as ondas provocadas pelo vento se propagam pelo tecido (meio material), mas as porções do tecido voltam às suas posições depois que as ondas passam.

Ernesto, começando a entender mais sobre o assunto, lembrou animado de outro exemplo:

– Ah! E quando eu arrumo a minha cama pela manhã: segurando o lençol, levanto e abaixo rapidamente o braço, forma-se uma perturbação que se propaga pelo tecido... isso é uma onda?

– Sim! Mas essa onda é produzida e acaba logo em seguida. Esse tipo de onda é chamado de **pulso**.

Um pulso é uma perturbação que se propaga por um meio. É, portanto, uma onda, mas de curta duração.

Ernesto, agora, estava mais curioso:

– Existem outros tipos de ondas, isto é, ondas que não sejam como os pulsos que terminam logo depois que começam?

– Existem, Ernesto. Pense, por exemplo, no movimento de um relógio, ou do Sol... São tipos de movimentos que se repetem depois de um certo tempo. Por exemplo: o ponteiro grande de um relógio volta à mesma posição a cada doze horas. O Sol nasce a cada dia, isto é, a cada 24 horas...

– Já sei! Doze horas é o **período** do ponteiro grande e 24 horas é o **período** do Sol – concluíu Ernesto com entusiasmo.

– Muito bem! Esses movimentos que se repetem após um certo tempo (período) recebem o nome de **movimentos periódicos**. Da mesma forma, uma série de pulsos que se repetem formam o que chamamos de **onda periódica**.

– E, nesse caso, – completou Ernesto – o movimento do material se repete, isto é, os pontos do meio se deslocam, voltam à posição original, e esse movimento se repete muitas vezes. Maristela, agora me surgiram duas dúvidas: as ondas do mar são periódicas? E o que determina o período de uma onda?

– Você está ficando muito esperto, Ernesto! Mas vamos com calma. Uma coisa de cada vez! O **período** é uma **característica da onda**. E o que determina o período é a **fonte**, isto é, o que produz a onda. Por exemplo: quando você arruma sua cama e produz um pulso ao levantar e abaixar a mão, a mão é a fonte, pois seu movimento produziu o pulso.

– Entendo. E o que produz a onda do mar? – perguntou Ernesto.

– Bem, esse é não é um assunto fácil, pois o processo de formação de ondas no oceano é complexo. Isto é, não é uma fonte única, como a sua mão, mas uma combinação de fatores que levam ao aparecimento dessas ondas. Vamos estudar os casos mais simples? Vamos até a minha casa brincar um pouco!

Produzindo e observando ondas

Na casa de Maristela, o estudo das ondas continuou.

– Uma maneira muito simples de estudar ondas mecânicas é utilizar uma corda com uma das extremidades presa.

– Ernesto, você será a fonte que produz as ondas. Segurando a outra extremidade da corda, levante e abaixe rapidamente a mão, como você faz com o lençol.

– Levantando a mão só uma vez eu produzo um pulso – disse Ernesto. – E se eu levantar e abaixar a mão continuamente?

– Vá em frente! Tente, experimente! É assim que aprendemos, é assim que se descobrem coisas novas! — incentivou Maristela.

– Veja, uma série de pulsos! Epa! Isso não é uma onda periódica?

– Sim! Observe que os pontos da corda sobem e descem sucessivamente. Temos, portanto um movimento periódico, uma onda periódica! Experimente movimentar sua mão mais rápido ou mais devagar. O que acontece?

– Os pontos da corda vão subir e descer mais rápido ou mais devagar, de acordo com a minha mão, que é a fonte que produz a onda. Exatamente como você disse lá na praia! – concluiu Ernesto. – Por isso esses pontos vão demorar mais ou menos para voltar ao mesmo lugar.

Então, podemos dizer que:

O período (T) é uma característica da onda e depende da fonte que a produz.

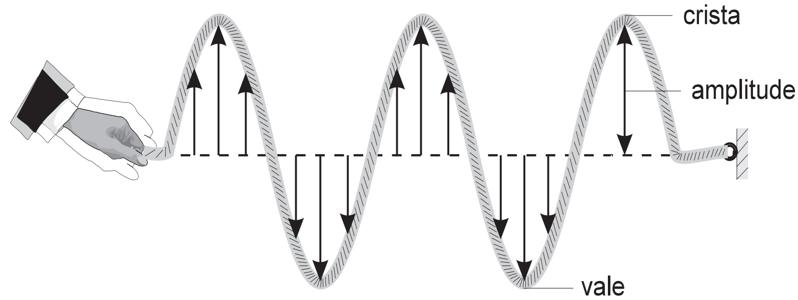
Dizemos que uma onda é periódica porque os pontos da corda, após um certo tempo (período), retornam à posição anterior. Esse movimento de ir e voltar ao ponto de partida recebe o nome de **ciclo**.

Maristela sugeriu:

– Para continuar a estudar as características da onda, vamos fazer um desenho, como se alguém, num dado momento, tirasse uma foto da corda.

A Figura 2 ilustra a corda de Ernesto num dado momento. Para facilitar seu estudo, desenhamos um par de eixos **x** e **y**. As setas indicam o deslocamento dos pontos da corda em relação à horizontal.

Figura 2



– Ernesto, uma onda é caracterizada por várias grandezas: uma delas é o período. Mas existem outras. Por exemplo, observe que existem pontos da corda que estão mais afastados da posição de equilíbrio (horizontal) do que os outros.

– Sim! E são vários! Alguns estão acima da horizontal e outros estão abaixo...

– Esses pontos têm um nome especial. Os que estão acima da posição de equilíbrio se chamam **cristas** da onda...

Ernesto interrompeu:

– Agora eu já sei por que, quando alguém está se dando bem no que faz, dizemos que ele está **na crista da onda**!

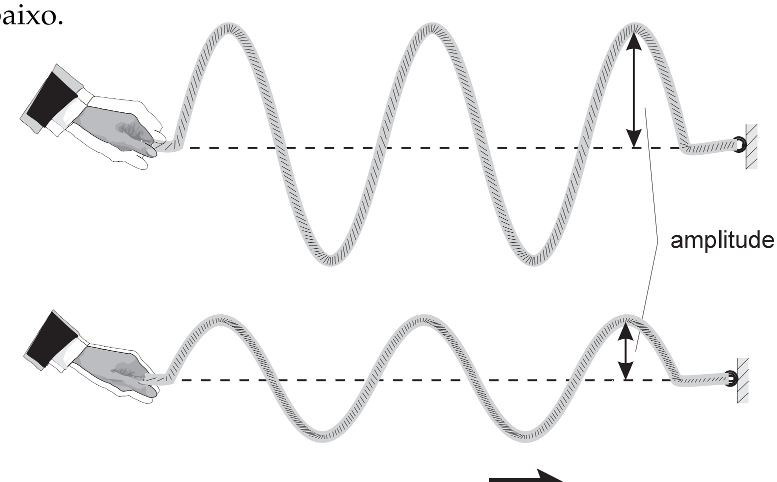
— Isso mesmo, Ernesto! Você percebe como as coisas do dia-a-dia e os fenômenos da natureza podem ser relacionados? Às vezes usamos uma mesma linguagem para expressar coisas diferentes, que no fundo são semelhantes. Fazendo essas ligações fica muito mais fácil entendê-las!

– E como se chamam os pontos que estão abaixo da posição de equilíbrio?

– **Vales** da onda – respondeu Maristela. – Os pontos que estão nas cristas e nos vales, como vimos, estão mais afastados da horizontal do que os outros. Essa distância máxima recebe o nome de **amplitude**.

– Então, a amplitude é outra característica da onda. Ela também está relacionada com a fonte?

– Perfeito, Ernesto! Experimente levantar e abaixar mais o braço, isto é, dê uma **amplitude** maior ao movimento do seu braço. Observe o resultado na figura abaixo.



Ernesto observou:

– As cristas ficam mais altas e os vales ficam mais fundos! Isso quer dizer que esses pontos, agora, estão mais afastados da horizontal, ou seja, a amplitude aumentou!

Portanto, dizemos que:

A amplitude (A) é uma característica da onda que depende da amplitude do movimento da fonte.

– Agora você pode brincar de produzir ondas e, com os conhecimentos que adquiriu, é capaz de produzir ondas com características diferentes, isto é, com diferentes períodos e amplitudes! – disse Maristela. – Enquanto isso, eu tiro uma soneca. Quando eu acordar, vamos à cidade para tomar sorvete!

Mas que ônibus demorado!

Maristela e Ernesto foram para o ponto esperar o ônibus que os levaria até o centro da cidade. Estavam lá havia uns vinte minutos e nada de o ônibus passar. Ernesto já estava impaciente e perguntou a um senhor:

– Por favor, o senhor saberia me dizer de quanto em quanto tempo esse ônibus passa aqui?

– Bom, filho, isso eu não posso responder, porque ele não tem um período certo. Só posso dizer que ele não passa com muita freqüência, não! Se estiver com muita pressa, é melhor ir a pé!

Ernesto olhou espantado para Maristela, menos pela possibilidade de ter que ir andando até a cidade, mais pela palavras que acabara de ouvir... Período? Freqüência? Após todas as discussões da tarde, as idéias estavam frescas na sua cabeça.

– Sim! – gritou Ernesto. – O período do ônibus é o tempo que ele leva para passar novamente por esse lugar. Quer dizer, é o tempo que ele leva para sair daqui, dar a volta pela cidade e retornar para dar mais outra volta! Certo?

– Certíssimo – afirmou Maristela, orgulhosa do rapaz.

– Mas, do modo como aquele senhor falou, período e freqüência devem estar relacionados! – arriscou Ernesto.

– Sim, vá em frente! – encorajou-o Maristela.

– Me ajude!

– Vamos lá: suponhamos que o período do ônibus seja de duas horas. Quantas vezes num dia (24 horas) esse ônibus passará por aqui?

– Ah, essa é fácil! Ele passará doze vezes num dia! – respondeu Ernesto, confiante.

– Então você sabe o que é freqüência: é o número de **ciclos** (neste caso, as doze voltas do ônibus) por unidade de tempo (neste caso, um dia ou 24 horas). Isso significa que a **freqüência** do ônibus é de doze voltas em 24 horas, ou, se preferir, meia volta a cada hora. Observe que o período é de duas horas e a freqüência é de uma volta a cada duas horas. Portanto: o período é o inverso da freqüência. E o mais interessante, Ernesto, é que isso tudo também vale para as nossas ondas!

– Maristela, vamos esquecer o sorvete e voltar para casa. Eu quero continuar com as experiências na corda!

Mais lento! Mais rápido!

Ernesto segurou a corda e começou a levantar e abaixar o braço cada vez mais rápido. Viu que a corda obedecia aos seus movimentos. Quanto mais rápido era o movimento da sua mão, mais rápido os pontos da corda subiam e desciam.

Sua conclusão foi:

A freqüência (f) é uma característica da onda, e é igual à freqüência da fonte que a produz.

– Vamos fazer um cálculo! – sugeriu Maristela. – Suponha que um ponto qualquer da corda sobe e desce quatro vezes a cada segundo. Portanto, sua freqüência é de quatro ciclos por segundo. Essa unidade **ciclos por segundo** recebe o nome de **hertz** (**Hz**). E qual é o seu período, que é o tempo que leva para realizar um ciclo? Basta fazer uma regra de três:

1 segundo ——— 4 ciclos
x segundos ——— 1 ciclo

Portanto, x = 0,25 segundos, isto é, T = 0,25 segundos, que é igual a $\frac{1}{4}$.

Com isso confirmamos que período é o inverso da freqüência:

$$T = \frac{1}{f}$$

É o movimento da mão (fonte) que provoca o surgimento da onda na corda. Portanto, é ele que determina as características da onda. A rapidez com que movemos a mão (a freqüência com que a fonte vibra) determina a freqüência e o período da onda. Sua amplitude depende de quanto levantamos e abaixamos a mão, isto é, da amplitude desse movimento.

Note, na Figura 2, que a onda se desloca ao longo da corda (direção indicada pelo eixo x), enquanto os pontos da corda se deslocam numa direção perpendicular a ela (indicada pelo eixo y). Devido a essa característica, esse tipo de onda é chamado de **onda transversal**. O nome transversal significa que o deslocamento dos pontos e o deslocamento da onda não têm a mesma direção. Existe outro tipo de onda, chamada **longitudinal**, que estudaremos na próxima aula.

Um, dois, três, já!

Ernesto fez a Maristela uma proposta muito estranha: uma competição entre pulsos! Sua idéia era a seguinte:

– Cada um de nós segura uma corda, que vai estar com a outra extremidade presa. Quando eu disser 'já' nós produzimos um pulso. O pulso que chegar primeiro na outra extremidade da corda ganha! – propôs o menino, animadíssimo.

– Aceito o desafio!

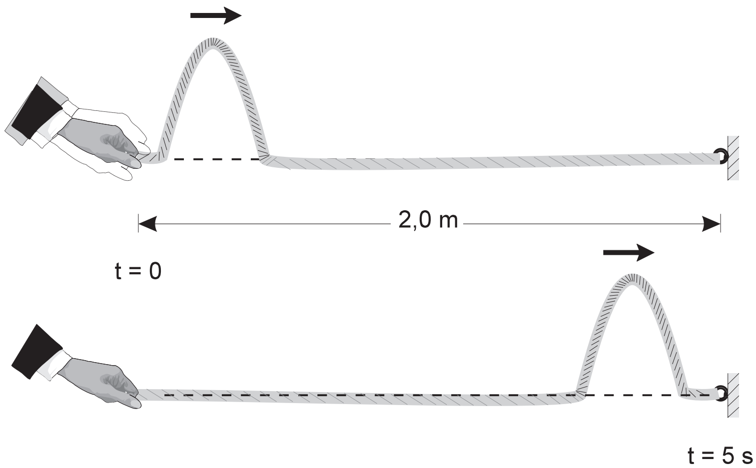
Eles então se prepararam e, ao sinal de Ernesto, produziram os pulsos...

Mas os pulsos chegaram praticamente juntos. Foi impossível conhecer o vencedor e, assim, os dois declararam o empate!

– Podemos fazer uma coisa interessante, Ernesto: vamos medir quanto tempo o pulso leva para percorrer a corda. Depois mediremos seu comprimento, para saber qual foi a distância percorrida pelo pulso. Assim calcularemos a **velocidade de propagação** do pulso! O que você acha?

Foi o que fizeram. Com um relógio, eles verificaram que o pulso demorou cinco segundos para percorrer os dez metros da corda (Figura 3).

Figura 3



Portanto, a velocidade de propagação do pulso foi de:

$$v = \frac{10{,}0\ \text{m}}{5\ \text{s}} = 2{,}0\ \text{m / s}$$

Isto é: em um segundo, o pulso percorreu uma distância de 2,0 metros.

A velocidade de propagação não é uma característica da onda, mas sim do meio no qual a onda se propaga. Na corda, por exemplo, ela vai depender da tensão aplicada à corda (isto é, de quanto ela está esticada) e da sua espessura.

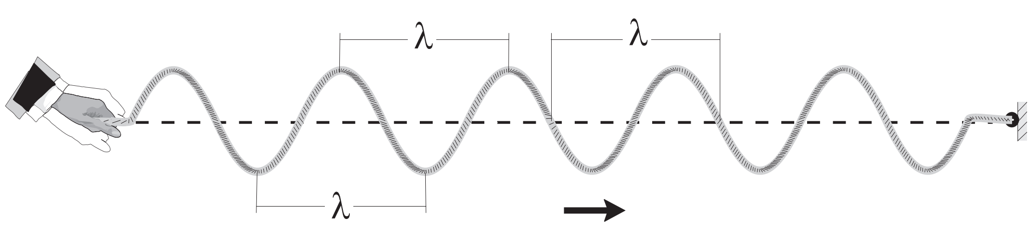
Uma pergunta que podemos fazer é: quanto é que o pulso caminha durante um período (T)? Pela definição de velocidade, temos:

$$v = \frac{\text{distância percorrida}}{T}$$

Ao se propagar em um meio, um pulso tem velocidade constante. Assim, a distância percorrida em determinado período também será constante. Por isso damos um nome especial a essa distância: **comprimento de onda**. Ela é representada pela letra grega **lambda** (λ). Portanto:

$$\lambda = v \cdot T$$

Já que se trata de uma distância, suas unidades são as de comprimento, isto é, metro, centímetro, milímetro etc. Observe a figura abaixo:



Ela representa uma série de pulsos produzidos por uma mesma fonte: é, portanto, uma onda periódica. Veja como o desenho se repete: uma crista e um vale, uma crista e um vale...

A distância indicada na figura pela letra λ equivale ao comprimento de onda. Observe que a distância entre dois vales ou entre duas cristas corresponde ao comprimento de onda. Portanto, o comprimento de onda pode ser obtido tanto pela equação (se conhecermos a velocidade de propagação e o período) como pelo gráfico.

Agora que já conhecemos o conceito de onda mecânica e as suas características... vamos voltar à praia!

Uma onda + uma onda = uma onda
Uma onda + uma onda = zero onda! (Como pode?)

No dia seguinte, Maristela e Ernesto voltaram à praia e foram andar até a encosta. O mar estava calmo. As ondas vinham bater de encontro à parede formada pelas rochas. Os dois observaram que, ao encontrar a parede, as ondas voltavam, isto é, eram refletidas.

Maristela e Ernesto começaram a observar o que acontecia com o tronco nesse caso:

– Ele sobe e desce, como antes! – observou Ernesto.

Num desses movimentos, o tronco subiu muito mais do que o de costume. Numa outra vez, não saiu do lugar!

– Preste atenção, Ernesto. Ao encontrar as rochas, a onda muda de sentido: como não pode seguir em frente, ela volta. Isso é o que chamamos de **reflexão**. Então, existem duas ondas: a que vem do fundo do mar e a que vai para o fundo do mar, depois de ter sido refletida pelas rochas. E aí está a chave do mistério! – exclamou Maristela.

– Continue! – pediu Ernesto

– As ondas são formadas por cristas e vales. As cristas levantam os pontos do meio e os vales abaixam esses pontos. Quando duas ondas se encontram, várias situações podem ocorrer. Duas, em especial: a crista de uma onda encontra a crista da outra e, neste caso, os vales também coincidem, ou a crista de uma encontra o vale da outra e vice-versa.

Ela continuou o raciocínio:

– Na primeira situação, isto é, quando o encontro é entre duas cristas, ambas levantam o meio naquele ponto, por isso ele sobe muito mais! Ao mesmo, tempo dois vales se encontram, tendendo a baixar o meio naquele ponto. Por isso o vale que resulta fica mais fundo! Por isso vimos o tronco subir muito mais! (Figura 4)

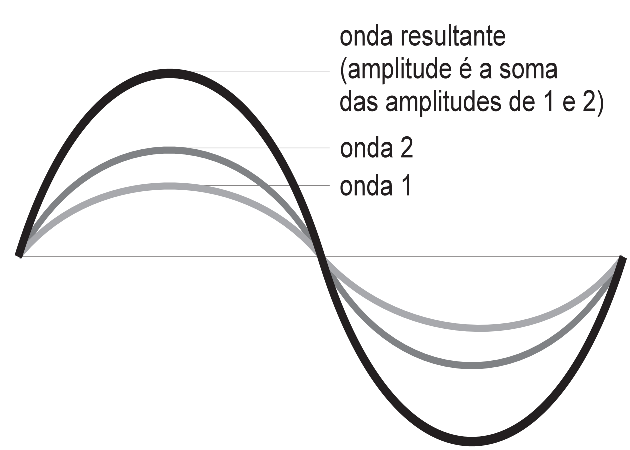


Figura 4

- Isso acontece porque, quando duas ou mais ondas se encontam, o efeito é uma **onda resultante**, cujas características dependem não só das características das ondas que se superpõe, mas também de como ocorre esse encontro.

- A outra situação ocorre quando o encontro é entre um vale e uma crista: um deles quer puxar os pontos para cima e o outro quer puxá-los para baixo. Se a amplitude das duas ondas for a mesma, o resultado que é não ocorre deslocamento, pois eles se cancelam e o meio não sobe e nem desce naquele ponto! Por isso não vimos o tronco se mover! (Figura 5)

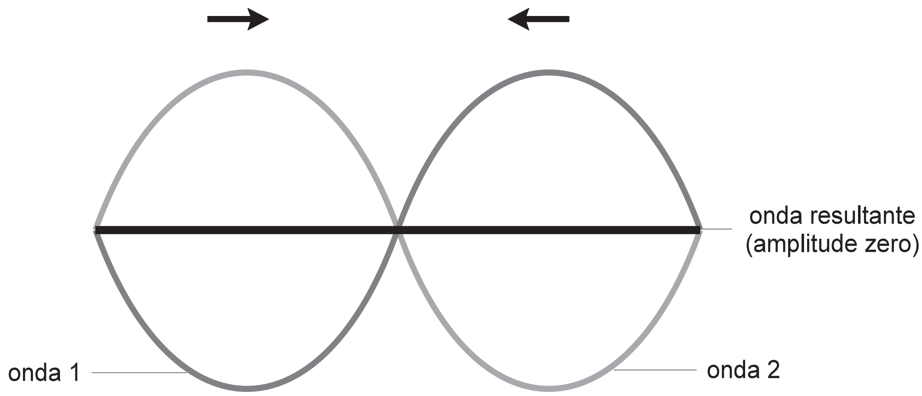


Figura 5

– Esse é um princípio que descreve o que acontece quando duas ou mais ondas se encontram e é conhecido como **princípio da superposição de ondas**.

Mas agora vamos, Ernesto. Já está ficando tarde e nós precisamos nos preparar para a seresta que vai acontecer lá em casa, hoje à noite!

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- **onda mecânica** é uma perturbação num meio material que se propaga de um ponto a outro do meio;

- as ondas podem ser de curta duração, isto é, acabar rapidamente: neste caso, chamam-se **pulsos**; quando a perturbação se repete, teremos uma **onda periódica**;

- as ondas são geradas por **fontes**; algumas características das ondas – como **período (T), amplitude (A)** e **freqüência (f)** – dependem da fonte;

- a **velocidade de propagação** (**v**) de um pulso é constante num meio, e depende das características desse meio; **v** é a distância percorrida pelo pulso numa unidade de tempo;

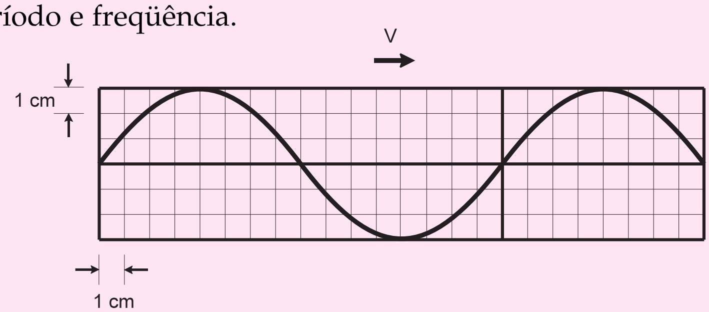
- outra característica das ondas é o seu **comprimento de onda** (λ), que é a distância percorrida pela onda durante um período (T);

- o **princípio da superposição de ondas** descreve o que acontece quando duas ou mais ondas se superpõe, isto é, se encontram.

Exercício 1

A figura abaixo mostra uma corda num dado momento. Sabe-se que ela se desloca com uma velocidade de 4cm/s. Com a ajuda da figura, sabendo que o lado de cada quadrado corresponde a 1 cm, determine:

a) a amplitude da onda;
b) o comprimento de onda;
c) seu período e freqüência.



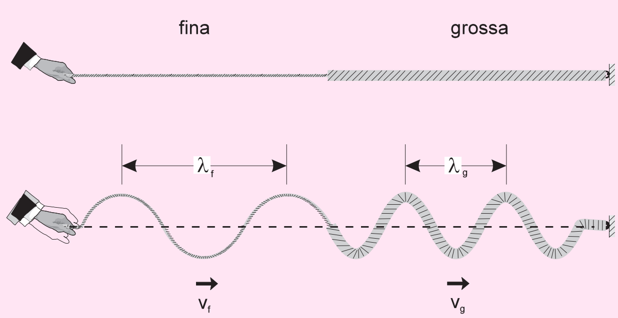
Exercício 2

Ernesto fez uma experiência num laguinho perto de sua casa. Agitando a mão na água ele produziu uma série de pulsos, isto é, uma onda periódica. Verificou que elas percorriam 200 cm em 4 segundos e que a distância entre duas cristas sucessivas era de 10 cm. Determine:

a) a velocidade de propagação da onda;
b) o comprimento de onda;
c) a freqüência com que Ernesto agitava a mão.

Exercício 3

Maristela e Ernesto amarraram dois pedaços de corda diferentes, uma fina e uma grossa, como mostra a figura a seguir.



Então, produziram pulsos, movimentando a mão para cima e para baixo duas vezes a cada segundo. Os pulsos eram produzidos num pedaço da corda e transmitidos ao outro. Eles anotaram os seguintes valores para as velocidades de propagação:

CORDA	VELOCIDADE
parte fina	v_f = 6 cm/s
parte grossa	v_g = 4 cm/s

Lembre-se de que a freqüência dos pulsos é a mesma da fonte. Responda:

a) qual o período da fonte (e dos pulsos na corda);
b) qual o comprimento de onda quando ela se propaga no meio mais fino e no meio mais grosso.
c) Escreva suas conclusões a partir dos resultados que você obteve.

Um papinho, um violão e a bendita construção!

PARA COMEÇAR

Após o passeio pela praia, Maristela e Ernesto voltaram para casa. Tomaram um banho e esperaram os amigos que iam chegar. O Sol já estava se pondo quando eles finalmente apareceram.

Eram dois seresteiros: Nelson tocava violão e Nestor tocava flauta. Não perderam tempo: prepararam um refresco e começaram a tocar. Tocaram várias canções, até bem tarde: afinal, estavam de férias!

Como não podia deixar de ser, Ernesto, que é um garoto muito interessado e curioso, quis saber mais sobre o som e sobre aqueles instrumentos... Como se produzia um som, ele já sabia.

- Basta bater um material no outro. Por exemplo, bater uma colher numa panela, deixar cair um jornal no chão. Ou bater uma porta. O indesejável pino metálico do despertador bate nas campânulas, nos tirando de manhã cedo do sono gostoso! Às vezes a bola de futebol atinge uma vidraça e é aquele barulhão, sem contar a gritaria do dono furioso da vidraça!

Figura 1

- O mesmo acontece quando vibramos a corda de um violão! - completou Nelson.
- E o que todos esses exemplos têm em comum? - indagou Nestor.
- É que todos esses materiais são duros... - arriscou Ernesto.
- Nem todos eles. A corda do violão, por exemplo, é feita de um material bem flexível! - observou Nelson, como quem conhece bem o seu instrumento. - Aliás, podemos deixar a corda mais esticada ou menos esticada, e isso determina que tipo de som será produzido quando a corda vibrar.
- É verdade... Então, o que eles têm em comum deve ser o fato de que todos vibram de alguma maneira. E, ao vibrar, produzem sons! - concluiu Ernesto.

O que é som?

Fique ligado

Há mais de dois séculos a questão do som vem agitando o homem. No século XVIII, algumas pessoas definiam o som como uma sensação, e diziam que, portanto, para existir, o som precisaria de um ouvinte, de alguém para escutá-lo. Quem defendia essa idéia eram os filósofos da época.

Os físicos, por outro lado, combatiam essa idéia, pois acreditavam que o som existia mesmo quando não havia ninguém para ouvi-lo.

Mas o que é o som?

Você já sabe que toda matéria no Universo é formada por átomos que se agrupam, formando moléculas. Já sabe também que as moléculas estão em constante movimento.

Ao bater com uma colher na superfície de uma panela, como no exemplo de Ernesto, estamos fornecendo energia para as moléculas do metal. Conseqüentemente, elas vibram mais intensamente (Figura 2). Uma vez que as moléculas do material estão ligadas umas às outras, essa vibração é transmitida de uma molécula à outra, atravessando assim o material. E isso nada mais é do que o som: uma vibração que se propaga num meio material.

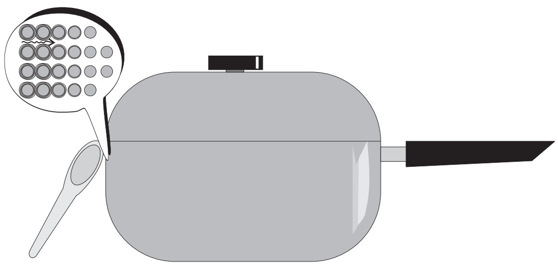


Figura 2

Isso nos faz lembrar as ondas que estudamos na aula passada. Será que o som é uma onda?

Antes de responder a essa pergunta, vamos pensar na questão dos filósofos do século XVIII, isto é, a sensação sonora que é a sensação que nos fornece o ouvido, órgão responsável pela audição, quando ouvimos um som.

Quando Cristiana diz: “Desligue a TV e venha para a mesa que a sopa vai esfriar”, aquelas palavras, isto é, aqueles sons, produzidos por suas cordas vocais, atravessaram o ar até atingir os ouvidos de Ernesto (Figura 3). Aí está uma dica importante: o ar.

Ao vibrar, as cordas vocais transmitem essa vibração às moléculas de ar que estão em contato com elas. Essa vibração é transmitida, de molécula em molécula, até atingir o nosso ouvido. O que acontece depois disso são vários processos que não iremos estudar neste curso. Basta saber que essas vibrações são transmitidas e interpretadas pelo cérebro, de modo que Ernesto capta a mensagem e vai sentar à mesa para tomar a sopa quentinha!

Figura 3

Nosso objetivo aqui é descrever o som fisicamente e estudar algumas grandezas que o caracterizam.

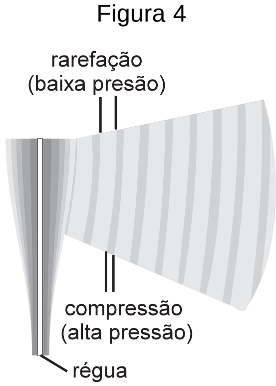
Um verdadeiro empurra-empurra

Você já deve ter tido a experiência de entrar num ambiente lotado de gente (um estádio, uma feira etc.). Imagine que as pessoas são moléculas. De repente, alguém começa a empurrar. A pessoa que está à frente empurra a seguinte, a seguinte empurra a outra e assim por diante: é aquele empurra-empurra. Uma pessoa **pressionando** a outra.

É isso o que ocorre com as moléculas de ar.

A figura ao lado mostra, esquematicamente, o que acontece quando vibramos um material - neste caso, uma régua (Figura 4). Poderia ser a corda de um violão, o metal de uma panela... Mesmo que não se possam ser observadas, as vibrações realmente ocorrem!

Figura 4



Quando a régua vibra, provoca o deslocamento das moléculas de ar que estão ao seu redor: elas vão para a frente e para trás, seguindo o movimento da régua.

Observe que existem regiões em que há um acúmulo de moléculas e outras regiões nas quais há um número menor de moléculas. Isso ocorre porque, quando a régua vai para o lado, ela empurra as moléculas, aumentando a densidade de moléculas. Portanto, a pressão fica maior.

A régua retorna à posição inicial, mas nem todas as moléculas voltam. Assim, surge uma região em que há menor número de moléculas, menor densidade do ar e menor pressão. A Figura 4 ilustra essas situações.

Nas regiões em que o ar está mais denso e a pressão é maior, dizemos que ocorre **compressão** (ar comprimido). Nas áreas em que o ar está menos denso e a pressão é menor dizemos que ocorre **rarefação** (ar rarefeito).

Como as vibrações da régua se repetem, o processo de **compressão** e **rarefação** do ar também se repete, propagando-se de um ponto a outro. Podemos dizer assim que as compressões e rarefações do ar se propagam como **ondas**.

Observe que as moléculas de ar (meio) se deslocam na **mesma direção** em que a onda se desloca, isto é, "ao longo" da onda. Esse tipo de onda recebe o nome de **onda longitudinal**. Portanto,

numa onda longitudinal, os pontos do meio se deslocam na mesma direção de propagação da onda

e

o som é uma onda longitudinal.

A velocidade do som

Já estava ficando meio tarde.

- A noite está muito agradável, mas nós precisamos ir embora para pegar o trem das onze e meia - disse Nelson.

Antes de sair, Nestor lembrou-se de uma cena que vira num filme de TV. Era um filme de bangue-bangue, com muitos bandidos, mocinhos, tiros para todos os lados, cavalos e coisas assim. Ele se lembrou de uma cena, em especial, que o deixara muito curioso.

- Os mocinhos estavam a cavalo perseguindo os bandidos, que estavam bem à frente. Durante a fuga, um dos bandidos se abaixou, encostou o ouvido no chão e disse: "Eles ainda estão bem longe!"

E Nestor confessou:

- Mas eu não entendi muito bem **por que** ele fez isso!

Vamos ver se conseguimos descobrir.

Como discutimos na seção anterior, o som é uma onda longitudinal, produzida por uma vibração e que se propaga num meio material.

Os mocinhos corriam em seus cavalos. A batida dos cascos faz com que o chão vibre: isso produz um som. Veja que o som **precisa de um meio para se propagar**, qualquer um. Portanto, ele pode se propagar tanto pelo ar como pelo chão!

A vibração se propaga pelas moléculas do meio. Isso quer dizer que quanto mais moléculas o meio tem, e quanto mais próximas elas estiverem umas das outras, mais facilmente o som irá se propagar.

Você percebe onde queremos chegar?

Aquele bandido era mesmo muito esperto. Sabia que o som produzido pelo trote dos cavalos chegaria até ele muito mais rápido pelo solo do que pelo ar. Assim, encostando o ouvido no chão, poderia saber se os mocinhos estavam por perto!

Portanto, **nos meios mais densos a velocidade de propagação do som é maior**. Nos meios menos densos, o som se propaga mais lentamente. Ela é, portanto, maior nos sólidos, menor nos líquidos e ainda menor nos meios gasosos. A tabela abaixo mostra a velocidade do som para diferentes tipos de meios materiais:

MEIO	VELOCIDADE (m/s)
ar (20ºC)	340
água	1.450
ferro	5.500
granito	6.000

Observe que no granito, que é um tipo de rocha, o som se propaga quase dezoito vezes mais rápido do que no ar!

Nas aulas anteriores nós aprendemos que quanto maior a temperatura de um material, mais agitadas estão as suas moléculas. Devido a essa grande agitação, o som pode ser transmitido com mais facilidade. Assim, a **velocidade de propagação do som também depende da temperatura do meio** no qual se propaga! A tabela abaixo mostra os valores da velocidade de propagação (**v**) do som no ar a diferentes temperaturas:

TEMPERATURA DO AR (ºC)	v (m/s)
0 (fusão do gelo)	326
20 (ambiente)	340
100 (ebulição da água)	379

Para os sons também valem as relações: $v = \lambda \cdot f$ ou $v = \dfrac{\lambda}{T}$

Uma outra forma de energia

Perto da casa de Maristela havia uma construção. Acabara de começar e ainda estava nas fundações. Para fazer as fundações utiliza-se o chamado bate-estacas, que nada mais é do que um objeto muito pesado (pêndulo) preso a um guindaste. O guindaste ergue o pêndulo a grande altura e o solta em seguida, de modo que, ao cair, o pêndulo empurra a estaca que se encontra no solo.

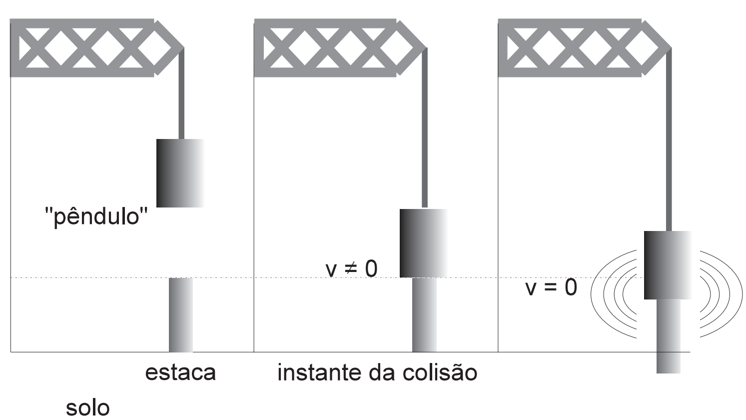


Figura 5

Quando erguido, o pêndulo ganha energia potencial gravitacional em relação ao solo e à estaca. Ao ser solto, perde altura e ganha velocidade. Nesse processo, sua energia potencial gravitacional se transforma em energia cinética.

Ao colidir com a estaca, o pêndulo transfere parte da sua energia à estaca, empurrando-a. Dessa maneira ela é enterrada no solo. Mas esse processo não é

elástico, isto é, durante a colisão, parte da energia se perde no ambiente. Na verdade, a **energia se transforma em outros tipos de energia**.

Quando o pêndulo colide com a estaca, ouve-se um barulhão, certo? Esse barulho nada mais é do que o resultado das vibrações produzidas pela colisão, isso é, parte da energia que se perde! Portanto, podemos concluir que

o som é uma forma de energia conhecida como energia sonora.

Na manhã seguinte à seresta, Maristela teve de se levantar muito cedo - não por causa da energia sonora do seu despertador, mas por causa da bendita construção!

Um bate-estaca incomoda muita gente. Dois bate-estacas incomodam muito mais!

Maristela acordou mal-humorada naquela manhã. Também, não era para menos: foi acordada, em plenas férias, por um barulhento bate-estacas!

Por que um bate-estacas incomoda tanto, e o canto de um passarinho não? Parece uma pergunta boba, mas vamos ver o que há por trás dela.

Vimos que o som é uma forma de energia que se propaga pelos meios materiais. Para ser ouvida, essa energia precisa ser transportada até nossos ouvidos. Como você já sabe, no interior do ouvido existe uma membrana muito sensível, o tímpano, que vibra quando atingida pela energia sonora.

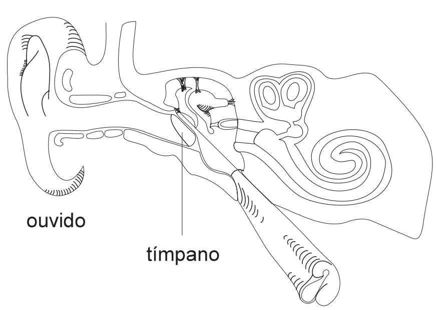


Figura 6

Se o som é muito forte, isto é, se a energia emitida pela fonte é grande, temos uma sensação desagradável no ouvido, pois a grande quantidade de energia transmitida exerce sobre o tímpano uma forte pressão (lembre-se da Aula 19!).

A energia sonora depende da vibração da fonte: quanto maior a vibração, maior a energia. Portanto,

a intensidade do som é maior quanto maior for a amplitude da onda.

Imagine a vibração das cordas vocais de um passarinho!

Agora dá pra entender por que um bate-estacas incomoda muita gente e um passarinho, não!

Para medir a intensidade sonora, que está relacionada à energia transportada pela onda sonora, utilizamos uma unidade conhecida como **bel**, em homenagem ao cientista inglês Graham Bell, que se dedicou ao estudo de questões relacionadas ao som, à fala e à audição e foi o inventor do tão útil telefone!

É muito comum a utilização de um submúltiplo do bel, o decibel (db), que é um décimo de bel, assim 10 db = 1 bel.

Apresentamos na tabela da página seguinte a intensidade aproximada de alguns sons comuns.

TIPO DE SOM	INTENSIDADE SONORA
limiar da audição	0 db
respiração normal	10 db
folhas balançadas pela brisa	20 db
TV ou rádio (fraco volume)	30 db
rua tranqüila à noite	40 db
conversa entre duas pessoas	60 db
tráfego intenso de automóveis	70 db
aspirador de pó	80 db
perfuratriz	100 db
buzina de automóvel	110 db
avião a hélice na decolagem	120 db
limiar para a dor	130 db
avião a jato na decolagem	140 db
foguete espacial	150 db

Os sons muito intensos são desagradáveis ao ouvido humano. Acima de 120 db o som pode ser percebido como uma sensação de cócega no ouvido. A partir de 130 db começa a sensação dolorosa.

É preciso tomar muito cuidado com a intensidade sonora à qual nos submetemos (e aos nossos tímpanos!): sons da ordem de 160 db podem causar surdez total devido a ruptura do tímpano ou a danos provocados em outras partes do ouvido.

Nas grandes cidades é comum falar em poluição sonora, devido aos altos níveis de ruídos produzidos pelas mais diversas fontes (tráfego intenso de automóveis, aviões e caminhões, buzinas, sirenes, construções etc.). Isso faz com que as pessoas percam ao longo dos anos sua capacidade auditiva.

Embora não percebam, pessoas expostas a ruídos intensos várias horas por dia, durante anos, correm o sério risco de perder permanentemente a audição por lesões no órgão auditivo. Mas não é só o ouvido que sofre com sons intensos: sofremos mentalmente, e também sofre o nosso coração.

Certas atividades exigem proteção no ouvido: o uso de tampões internos de espuma ou de borracha, protetores externos ou capacetes. Além disso, é necessário tomar medidas para diminuir os níveis de intensidade sonora dos ambientes.

Toda vibração produz um som?

Essa é uma pergunta que você pode estar se fazendo neste momento. “Se eu agitar a minha mão lentamente, não ouço som algum!”

É verdade. Agora experimente agitá-la com força, rapidamente e bem perto do ouvido. O que aconteceu?

Você deve ter sentido um ventinho no rosto: é o ar deslocado pela mão. Além disso, deve ter ouvido um som. Na verdade, a definição de som está associada à **sensação sonora**. Portanto,

**todo som é produzido por uma vibração,
mas nem toda vibração produz um som.**

Novamente a fonte entra em cena. Quando agitamos a mão lentamente, não somos capazes de produzir som algum. Mas, ao aumentar a velocidade desse movimento, produzimos um som.

Vamos recordar a aula passada: **quanto mais rápido é o movimento da fonte (mão), menor é o seu período e maior é a sua freqüência**! Vale também aqui a relação:

$$T = \frac{1}{f}$$

Assim podemos definir a **freqüência da onda sonora**, como fizemos com as ondas na corda.

Um som, para "ser" som, deve ser **audível pelo homem**. Para que isso ocorra, a freqüência deve estar acima de um certo um valor, que pode variar de pessoa para outra, mas gira em torno de 20 Hz. Sons que têm freqüências inferiores a essa são chamados **infra-sons**.

O homem só é capaz de ouvir sons até um certo valor de freqüência, que varia em torno de 20.000 Hz. Sons com freqüências maiores são chamados **ultra-sons**.

É importante notar que a definição de som se baseia na capacidade auditiva do homem. Essa capacidade varia entre os animais. Veja a tabela abaixo:

ANIMAL	MÍNIMA FREQÜÊNCIA (Hz)	MÁXIMA FREQÜÊNCIA (Hz)
rã	50	10.000
homem	20	20.000
cão	15	50.000
gato	60	65.000
morcego	1.000	120.000
mariposa	3.000	150.000

Abaixa esse rádio, Ernesto!

Foi o que pediu sua mãe, Cristiana. Mas sabem o que Ernesto fez? Colocou o rádio no chão. Engraçadinho, não?

Vamos ver adiante qual o significado da altura de um som. Não tem nada a ver com a distância entre o rádio e o chão!

O som possui algumas qualidades. Já falamos sobre **intensidade** e **freqüência**. De acordo com sua freqüência, um som pode ser classificado de **agudo** ou **grave**. Essa é a qualidade conhecida como **altura do som**.

Em geral as mulheres tem a voz **mais aguda**, isto é, emitem sons de **maior freqüência**. É comum utilizar o termo "fina" quando nos referimos à voz feminina. Os homens, por sua vez, têm a voz **mais grave**, emitem sons de **freqüência menor**. Dizemos que os homens têm voz "grossa".

Altura é a qualidade do som relacionada à sua freqüência. Sons com grandes freqüências são chamados de agudos e sons com baixa freqüência, de graves.

É preciso tomar cuidado com esses nomes, pois freqüentemente comete-se o erro de relacionar a altura do som com intensidade sonora, e não com a sua freqüência. Quando solicitamos a alguém para "abaixar o som", a rigor estamos pedindo à pessoa que diminua freqüência do som! Mas, na verdade, o que queremos é que seja diminuída a intensidade sonora, isto é, o volume. Por isso, o correto seria pedir para a pessoa diminuir o volume do rádio!

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que o som:

- é um tipo de **onda mecânica** e que, portanto, necessita de um **meio material** para ser produzido e se propagar;
- é produzido a partir das **vibrações** das moléculas (ou átomos) que formam o meio;
- é um tipo de onda chamada de **onda longitudinal**, porque a propagação da onda e as vibrações das moléculas do meio têm a mesma direção;
- se propaga com velocidades diferentes em diferentes meios: dependendo da sua densidade e da sua temperatura;
- é uma forma de energia (sonora) e uma de suas qualidades é a **intensidade sonora**, cuja unidade é o **bel**, que se relaciona com a amplitude da onda;
- é definido como tal de acordo com a capacidade auditiva do homem;
- é classificado em **agudo** e **grave** de acordo com a sua freqüência.

mãos à obra

Exercício 1

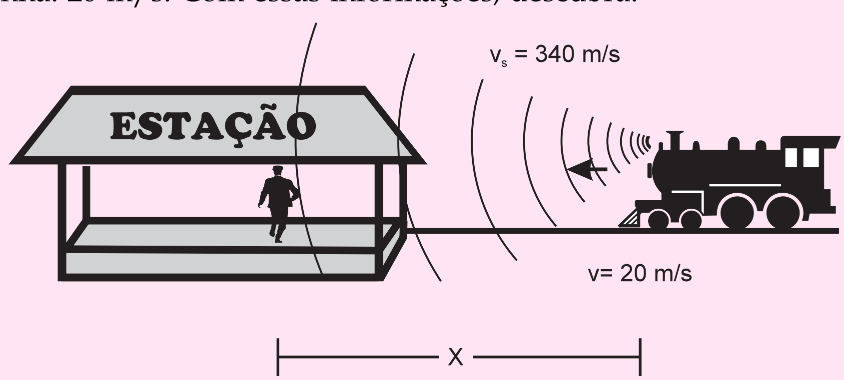
Qual é a diferença fundamental entre ondas longitudinais e ondas transversais (Aula 29)? O que elas têm em comum?

Exercício 2

Ernesto pegou o violão e emitiu um som. Segundo Nestor, o som emitido foi um lá, cuja freqüência é 440Hz. Considerando que a velocidade do som no ar é 340 m/s, determine o comprimento de onda do som emitido.

Exercício 3

Nelson e Nestor estavam na estação, esperando o trem que se aproximava. Ouviram o som do apito e, nesse instante, começam a contar quanto tempo, depois do apito, o trem demorou a chegar. Resultado: 170 segundos! Eles perguntaram ao maquinista, então, a que velocidade o trem vinha: 20 m/s. Com essas informações, descubra:



a) a que distância o trem se encontrava da estação quando apitou;
b) em quanto tempo o som do apito foi ouvido na estação (considere que a velocidade do som no ar é 340 m/s)

Exercício 4

O som se propaga no vácuo (ausência de matéria)? Explique a sua resposta.

AULA

31

Assim caminha a luz

Logo após o jantar, Roberto e Ernesto saem para dar uma volta.

– Olha, pai, como a Lua está grande! – diz Ernesto.

– É, aparentemente isso é verdade. Mas pegue essa moeda de 1 centavo, coloque-a entre dois dedos e aponte para a Lua. Você vai ver que a moeda pode cobrir a Lua toda.

Ernesto não acredita, mas faz a experiência. Por mais que estique o braço, a Lua permanece oculta.

– É verdade! A moeda barrou a luz da Lua.

– Luz da Lua que é do Sol! – diz Roberto.

– O quê?

– É, na realidade a Lua não tem luz própria. Ela reflete a luz do Sol. A Lua, o Sol e todos objetos que vemos são **fontes de luz**. Alguns têm luz própria, como o Sol, as estrelas, o filamento de uma lâmpada etc. Outros refletem essa luz. É o caso da Lua e de praticamente todos objetos que nos rodeiam.

Roberto e Ernesto voltam para casa e, ao entrar, Ernesto grita para a mãe:

– Acabo de ver a luz do Sol!

– O quê?

– Refletida na Lua, é claro!

Em linha reta...

Roberto pega dois pedaços de cartão e faz um furo em cada um, usando, para isso, um prego pequeno. Dá um dos cartões a Ernesto e diz:

– Tente tapar, com esse cartão, a luz que vem dessa lâmpada no teto.

Ernesto faz o que o pai pede e, imediatamente, responde:

– Ô, pai, a luz vai passar pelo buraquinho...

– É isso – diz o pai. – Mas, agora, tente com dois cartões

Ernesto se esforça até conseguir.

– Veja, pai! Quando eu ponho os dois furos bem na mesma direção, eu consigo ver a luz da lâmpada!

– É exatamente isso. Quando os dois furos, a lâmpada e o seu olho estiverem alinhados, você consegue ver a lâmpada porque **a luz caminha em linha reta**.

Os princípios da ótica geométrica

O que Roberto e Ernesto discutiam – o fato de a luz caminhar em linha reta – constitui um dos princípios da **ótica geométrica**. Quando a luz sai de uma fonte, como uma lâmpada, ela vai para todas direções, mas sempre caminhando em linha reta. Quando Ernesto segurou os dois cartões, direcionou-os para a lâmpada e conseguiu ver a luz, isso aconteceu porque um pouco da luz atravessou os dois furos que estavam alinhados com seu olho. Em ótica geométrica, essa luz que está passando pelos dois furos é denominada **feixe de luz**. Pode ser considerada, mesmo, como um **raio luminoso**. Cada raio luminoso seria, simplificando, cada direção na qual a luz é emitida.

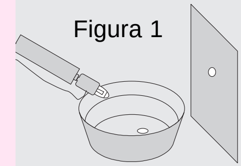
A ótica geométrica estuda o comportamento dos raios luminosos quando estes encontram diferentes materiais. Estuda, por exemplo, o que vai acontecer quando um feixe de luz atinge um espelho, ou quando passa por uma lente. Para explicar tais fenômenos, foi necessário criar um conjunto de regras que são os princípios da ótica geométrica.

Em nosso estudo, além da propagação retilínea da luz, vamos utilizar, freqüentemente, dois princípios: as leis da **reflexão** e da **refração**. Essas leis vão nos ajudar a compreender como os raios de luz têm sua trajetória modificada quando encontram pela frente um espelho, um bloco de vidro, uma lente etc... Esses objetos que modificam a trajetória dos raios luminosos são denominados **sistemas óticos**.

Vamos fazer um experimento que vai nos permitir entender um pouco das leis da reflexão e da refração. Para isso você vai necessitar de uma lâmpada de lanterna de 1,5 V, dessas que são chamadas pingo d'água. Elas têm uma espécie de lente na sua parte da frente. Vai precisar também de uma pilha e de um pedaço de fio para poder acender a lâmpada. Existem lanternas que já fazem tudo isso. Além disso, serão necessários uma bacia com água e um cartão.

Num ambiente escuro, dirija a lanterna contra a água dentro da bacia. Você notará uma pequena mancha luminosa no fundo da bacia. Se agora você colocar um pedaço de cartão, fora da bacia, numa posição semelhante à que está na Figura 1, você verá uma segunda mancha.

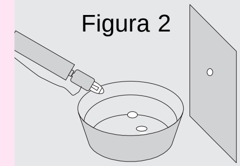
Figura 1



Temos aqui, ao mesmo tempo, dois fenômenos: a reflexão e a refração da luz. Parte da luz saiu da lanterna e chegou ao cartão sem penetrar na água. Essa é a luz refletida. Ela muda seu trajeto mas está sempre andando no ar. Outra parte muda sua direção penetrando em um novo meio, a água. Essa passagem da luz, de um meio que é transparente (no nosso caso, o ar) para um segundo meio transparente (a água) é chamada refração.

Um fato interessante, neste experimento, é que não podemos ver a luz da lanterna. A lanterna não está dirigida para nossos olhos, então não podemos ver sua luz. É claro que, indiretamente, vamos ver, pois a luz que sai da lanterna bate no fundo da bacia e forma uma mancha luminosa que podemos enxergar. O mesmo vai acontecer com a luz que bate no cartão.

Figura 2



Mas como saber que percurso a luz percorreu? Qual o trajeto percorrido pelo feixe que não conseguimos enxergar? Para resolver esse problema, precisamos saber onde a luz está tocando a água. Vamos então sujar um pouco a água. Isso pode ser feito colocando-se um pouco de pó de giz, ou farinha, na superfície da água. Ficaremos então com uma situação análoga à da Figura 2.

Nessa situação, podemos saber exatamente onde chega o feixe que vem da lanterna, que é denominado **feixe incidente**, o feixe que bate na água e chega ao cartão, que é chamado **feixe refletido** e, finalmente, o feixe que penetra na água: o **feixe refratado**. Se, em vez de falarmos em feixes luminosos, usarmos o termo raios luminosos, ficaríamos com uma situação semelhante à da Figura 3. O ponto I, onde o raio incidente toca a água, é chamado **ponto de incidência**.

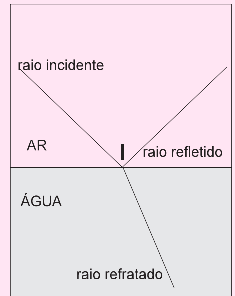


Figura 3

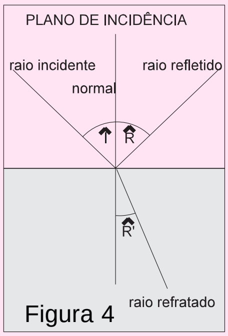


Figura 4

Para completar o estudo das duas leis, precisamos de mais alguns conceitos. Nós vamos precisar medir os ângulos que fazem os raios incidentes, refletidos e refratados. Para isso, temos de traçar uma perpendicular à superfície da água, que passe pelo ponto de incidência. Essa perpendicular é chamada **normal** (Figura 4).

O raio incidente e a normal definem um plano que é chamado **plano de incidência.** A normal é que vai nos servir de referência para a medida dos ângulos.

Agora já podemos falar das leis:

Leis da reflexão

1. O raio refletido está no plano de incidência.
2. O raio refletido forma, com a normal, um ângulo igual ao que a normal forma com o raio incidente.

$$\hat{I} = \hat{R}$$

Leis da refração

1. O raio refratado está no plano de incidência.
2. Se chamarmos de $\hat{I}$ o ângulo de incidência e de $\hat{R}'$ o ângulo de refração, teremos:

$$\frac{\text{sen}\,\hat{I}}{\text{sen}\,\hat{R}'} = \text{constante que depende dos meios}$$

Uma parte dessas leis que pode trazer alguma dúvida é a segunda lei da refração . No fundo, ela está dizendo que um raio luminoso, ao passar do ar para a água, é desviado de uma certa maneira. Se passasse do ar para o vidro, teria um desvio diferente. Mas tudo isso será objeto de mais estudos posteriormente.

O que estamos vendo?

Quando olhamos um lápis, somos capazes de vê-lo porque ele é, como afirmamos, uma fonte de luz. A luz não é própria do lápis. Provavelmente, ela veio do Sol, bateu nas paredes de nossa casa, foi refletida por elas, bateu no lápis, foi refletida e chegou aos nossos olhos, permitindo que pudéssemos ver o lápis. Isso, é claro, se estivermos observando o lápis durante o dia. Durante a noite, o processo é parecido, mas a luz, agora, é a de uma lâmpada.

Portanto, podemos ver os objetos quando eles são capazes de enviar luz aos nossos olhos. Em ótica geométrica, esses objetos que são fontes de luz são denominados **objetos reais**. Mas nós somos capazes de ver outras coisas.

Coloque o lápis dentro de um copo de vidro contendo água e observe o que aparece dentro do copo (Figura 5).

Parecem existir dois lápis: um acima da água e outro mergulhado nela, o que dá a impressão de que o lápis está quebrado dentro da água. Esse "segundo" lápis aparece assim porque a luz emitida pelo lápis passou pela água e pelo vidro do copo, sofrendo refração.

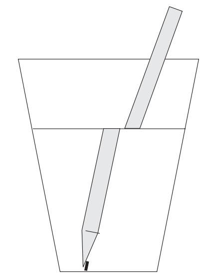


Figura 5

Ao passar pela água, os raios luminosos emitidos pelo lápis sofrem desvios e chegam aos nossos olhos dando-nos a impressão de que o lápis está em outra posição e tem tamanho diferente. Essa parte do lápis que vemos distorcida é o que denominamos, em ótica geométrica, a **imagem** do lápis formada pela refração da luz ao passar pela água e pelo vidro do copo.

Vamos supor que a luz que parte de um objeto incida num sistema ótico - uma lente, por exemplo. Essa lente vai formar uma imagem do objeto. A ótica geométrica vai determinar as características dessa imagem: se ela está mais próxima ou mais distante que o objeto, se é maior que o objeto etc. Já que, para nossos olhos, tanto faz ver o objeto ou sua imagem, podemos usar os sistemas óticos como uma extensão de nossa visão. Assim como uma alavanca nos permite aumentar a força de nossos braços, os sistemas óticos podem ampliar nosso sentido da visão. Daí a importância de seu estudo.

Conseqüências da propagação retilínea da luz

Sombras e penumbras

Existem alguns fatos que são conseqüência imediata do princípio da propagação retilínea da luz: a formação de sombras sobre um objeto e as sombras que esse objeto é capaz de projetar.

Se, com auxílio de uma pequena lâmpada, iluminarmos uma bola de futebol dentro de um quarto escuro (ver Figura 6), vamos constatar o aparecimento de uma sombra da bola projetada na parede e também de uma região de sombra sobre a bola.

A luz parte da lâmpada L e se propaga em todas direções. Incide sobre a bola, deixando uma parte da mesma iluminada. A região da bola que está do lado oposto à lâmpada fica escura. Se a luz fosse capaz de realizar curvas durante seu trajeto, poderíamos ver iluminadas regiões da bola que estão do lado oposto à lâmpada. Mas isso, evidentemente, não acontece.

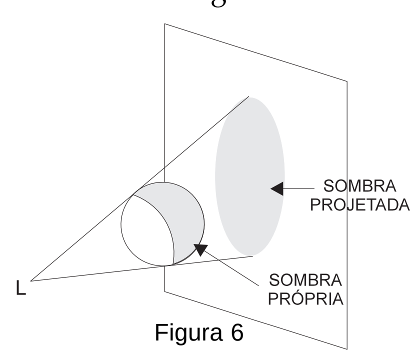


Figura 6

Se, por outro lado, a lâmpada utilizada fosse de maiores dimensões, poderíamos apreciar, além das sombras, a formação de penumbra. A penumbra é uma região parcialmente iluminada.

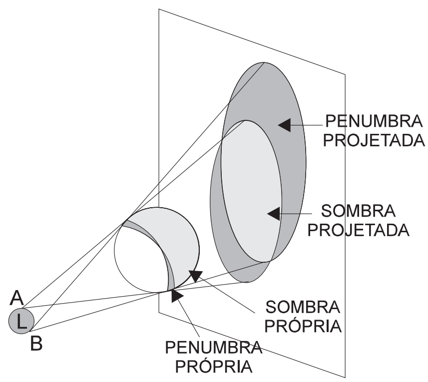


Figura 7

Veja a Figura 7. Podemos imaginar que a lâmpada L é formada por pequenas lâmpadas: A,B, C... Uma dessas pequenas lâmpadas imaginárias (A, por exemplo) vai projetar na parede e formar sobre a bola uma sombra. Outra pequena lâmpada imaginária (B) vai também formar e projetar suas sombras. Então, sobre a parede, vão existir regiões que A e B iluminam, regiões iluminadas somente por A ou somente por B (região da penumbra), e regiões que nem A nem B iluminam (região da sombra).

Eclipses

O mesmo fenômeno que ocorre na formação das sombras e penumbras dos objetos aparece nos eclipses do Sol e da Lua. Num eclipse do Sol, quem faz o papel da parede do exemplo anterior é a Terra (Figura 8). O Sol faz o papel da lâmpada e a Lua faz o papel da bola de futebol.

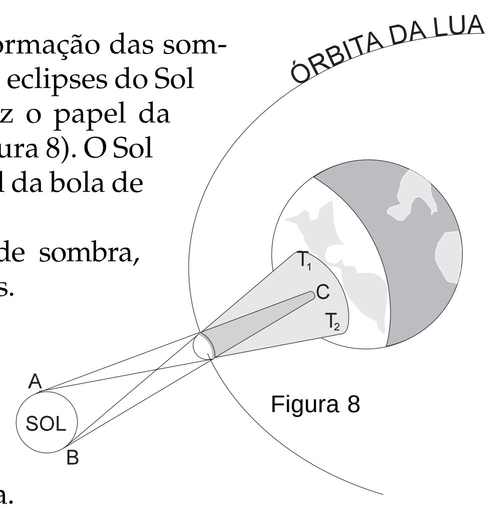


Figura 8

Sobre a Terra vão aparecer regiões de sombra, regiões de penumbra e regiões iluminadas. As pessoas da Terra que estiverem na região T_1 não conseguem receber os raios luminosos da parte B do Sol, mas conseguem ver a parte A do Sol. Elas estão vendo o Sol parcialmente encoberto pela Lua. Elas estão na região de penumbra.

Da mesma maneira, as pessoas que estiverem na região T_2 da Terra não conseguem ver A, mas vêem B. Elas também estão numa região de penumbra.

Finalmente, quem estiver em C não consegue ver nenhum ponto do Sol. Para essas pessoas, o eclipse é total.

Os eclipses da Lua são explicados de maneira semelhante. Fazendo sempre a comparação com o exemplo da bola de futebol, nesse caso a Terra será a bola, a Lua será a parede e a lâmpada continua sendo o Sol (Figura 9).

A Lua, no seu movimento ao redor da Terra, atravessará regiões nas quais sofrerá eclipses parciais ou totais.

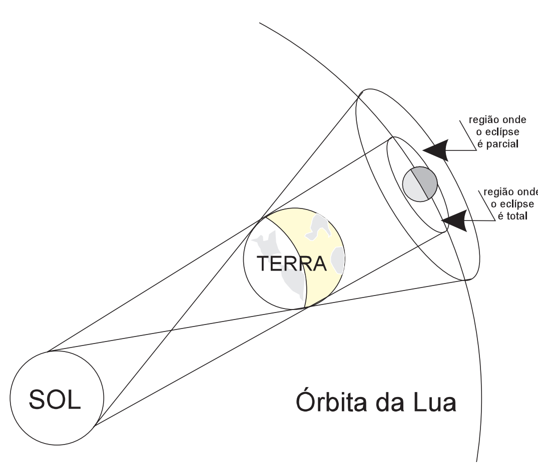


Figura 9

A câmara escura

É uma caixa dentro da qual podemos projetar a imagem de um objeto sobre uma folha de papel. Seu funcionamento baseia-se no princípio da propagação retilínea da luz. Você pode construir uma câmara escura com uma caixa de sapatos, papel vegetal, um pedacinho de papel de alumínio, guache preto ou tinta preta, uma agulha de costura, cola e fita adesiva. Inicialmente, pinte de preto a parte interna da caixa. Em seguida, faça dois furos com um diâmetro de um lápis comum na parte central das faces menores da caixa (Figura 10).

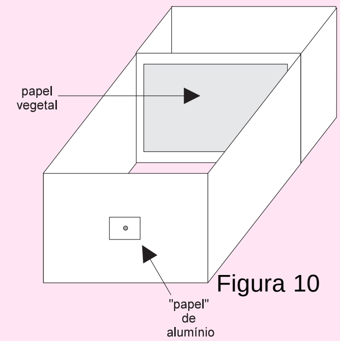


Figura 10

Na parte central da caixa é colado o papel vegetal (que pode ser substituído por papel branco sobre o qual se tenha passado óleo de cozinha; assim o papel fica translúcido, ou seja, meio transparente).

Um dos furos é coberto por papel de alumínio. Em seguida, com uma agulha, faça outro furo no alumínio (um furo dentro do outro). Para terminar, basta tapar bem a caixa e vedar bem a entrada de luz pela tampa, utilizando a fita adesiva.

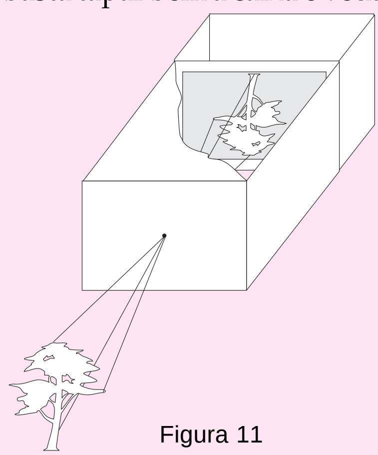


Figura 11

Se apontarmos a caixa (o lado que tem o papel de alumínio) para um objeto bem claro, notaremos, pelo outro furo, que sobre o papel vegetal será projetada uma imagem do objeto que estamos tentando ver. O interessante desse experimento é que a imagem está invertida (Figura 11). Isso acontece porque a luz caminha em linha reta. Um raio de luz que sai da parte inferior do objeto, após passar pelo furinho no papel de alumínio, baterá na parte superior do papel vegetal. Isto é: o que está em cima vai para baixo, o que está à esquerda vai para a direita e vice versa.

Passo a passo

1. Uma lâmpada pequena está a 20 cm de um disco de 10 cm de diâmetro e projeta sombra sobre um anteparo situado a 80 cm, como mostra a figura. Qual o diâmetro da sombra formada no anteparo?

Os triângulos FAB e FA′B′ são semelhantes, então teremos:

$$\frac{AB}{FC} = \frac{A'B'}{FC'}$$

$$\frac{10\,cm}{20\,cm} = \frac{A'B'}{80\,cm}$$

$$A'B' = 40\,cm$$

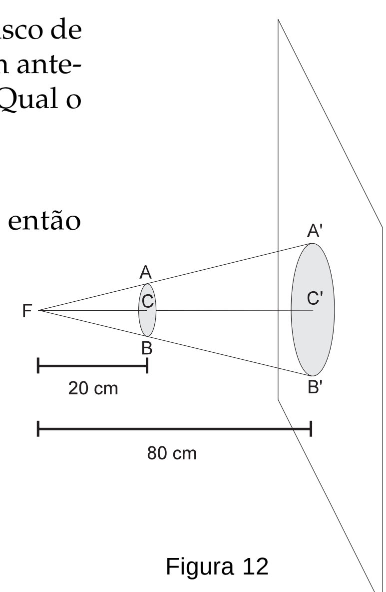


Figura 12

2. Suponha que, no problema anterior, a fonte fosse um disco luminoso de 4 cm de diâmetro. Quais seriam os raios da sombra e da penumbra projetadas no mesmo anteparo?

Na figura, os triângulos ABD e DGH são semelhantes. Portanto, suas bases são proporcionais às suas alturas. Então:

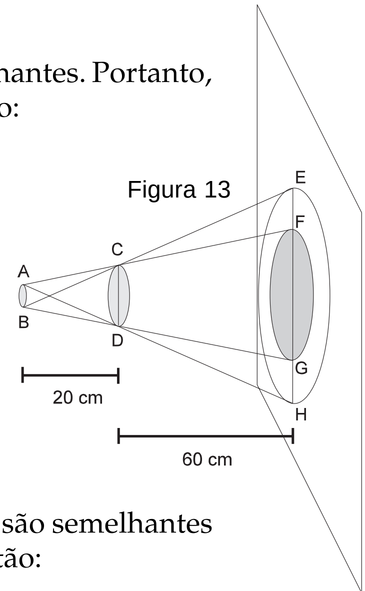


Figura 13

$$\frac{AB}{20\,\text{cm}} = \frac{GH}{60\,\text{cm}}$$

$$\frac{4\text{cm}}{20\,\text{cm}} = \frac{GH}{60\,\text{cm}} \quad \text{então,}$$

GH = 12cm

Da mesma maneira, os triângulos ACD e AFH são semelhantes e suas bases são proporcionais às suas alturas. Então:

$$\frac{CD}{20\,\text{cm}} = \frac{FH}{80\,\text{cm}}$$

$$\frac{10\,\text{cm}}{20\,\text{cm}} = \frac{FH}{80\,\text{cm}} \quad \text{então,}$$

FH = 40cm

O diâmetro da sombra é FG = FH – GH = 28 cm.
O diâmetro da penumbra é EH = FH + EF. Como EF = GH, teremos:

EH = 52 cm.

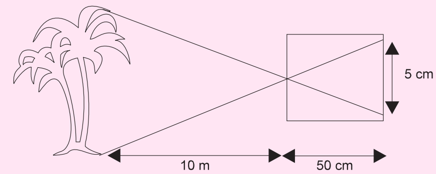
PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- que a luz anda em linha reta;
- que a luz pode sofrer refrações e reflexões;
- que podemos explicar as sombras dos objetos e os eclipses usando o princípio da propagação retilínea da luz;
- a construir uma câmara escura.

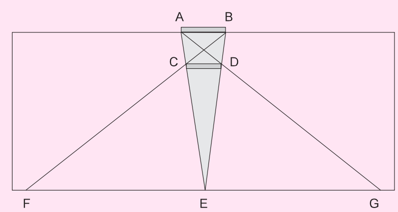
Exercício 1

Uma câmara escura tem profundidade de 50 cm. Ela é dirigida para uma árvore a uma distância de 10 m. Uma projeção de 5 cm de altura forma-se no fundo da caixa. Qual a altura da árvore?



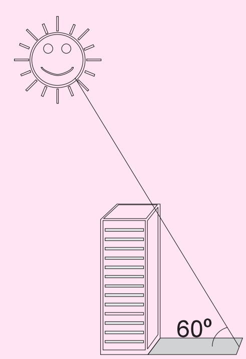
Exercício 2

Um lustre circular de 40 cm de diâmetro está embutido no teto de uma sala de 3 m de altura. Queremos colocar, abaixo do mesmo, um disco opaco de 36 cm, de modo que a sombra do mesmo fique reduzida a um ponto. A que altura deve ser colocado esse disco? Qual o diâmetro da penumbra nessa situação?



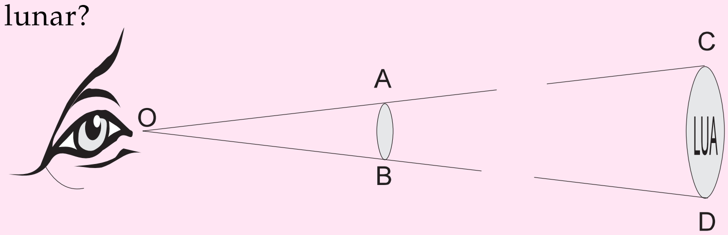
Exercício 3

Um prédio tem 40 m de altura. Calcular o tamanho de sua sombra sabendo-se que a direção do Sol forma um ângulo de 60º com o horizonte.



Exercício 4

A moeda de 5 centavos tem 2 cm de diâmetro. A Lua tem 3 mil km de diâmetro e sua distância da Terra é 380 mil km (valores aproximados). A que distância devemos colocar a moeda para que ela cubra totalmente o disco lunar?



AULA

33

Atira mais em cima!

O pessoal está reunido na casa de Gaspar e Alberta. O almoço acabou e todos conversam em torno da mesa.

– Eu soube que você está interessado em ótica – diz Gaspar a Ernesto. – Então vou mostrar uma coisa interessante.

Gaspar pega um copo de plástico e coloca uma moeda no fundo. Faz um canudo com uma folha de papel e o prende no gargalo de uma garrafa. Ao mesmo tempo, diz para Ernesto:

– Coloque esta garrafa diante do copo de maneira que você, olhando pelo canudo, não possa ver a moeda no fundo do copo, mas quase!

Ernesto faz o que Gaspar pediu e pergunta:

– E daí? Não aconteceu nada! (Figura 1)

– Certo! – diz Gaspar. – Mas, agora, vou colocar água no copo lentamente, para que a moeda não mude de lugar. Enquanto isso, você fica observando pelo canudo.

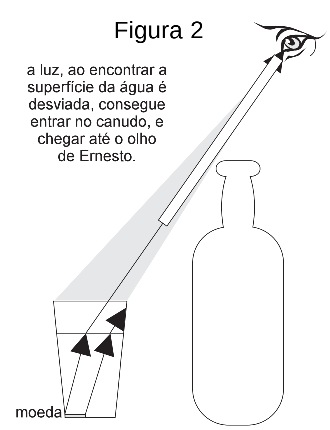
Figura 1

À medida que Gaspar vai colocando água dentro do copo, Ernesto começa a falar:

– Ih, estou começando a ver o fundo do copo! Olha lá a moeda! Estou vendo a moeda! Agora não estou entendendo mais nada! A luz não está andando em linha reta? Eu já fiz um experimento para provar que a luz anda em linha reta e agora parece que estou provando que ela não anda! Dessa vez ela não está andando em linha reta?

– É verdade – diz Gaspar. – Aqui a luz não está andando **uma vez** em linha reta. Ela está andando duas vezes em linha reta. Uma vez na água e outra vez no ar. O princípio da propagação retilínea diz que **em um meio transparente** a luz anda em linha reta. Nesse caso, a luz parece não estar andando em linha reta, pois temos **um par de meios**: a água e o ar!

Figura 2



Cada par entorta de uma maneira

Roberto e Cristiana aproximam-se, curiosos. Gaspar, sentindo-se prestigiado, pega um papel, desenha os dois esquemas da figuras 3a e 3b e começa a explicar, com ar de professor:

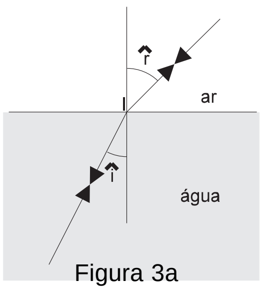


Figura 3a

– A luz sai da água e, ao atravessar a superfície que separa a água do ar, é desviada (Figura 3a). Para cada ângulo de incidência $\hat{i}$ temos um ângulo de refração $\hat{r}$. Se aumentarmos o ângulo de incidência, vamos aumentar o ângulo de refração. Mas sempre vai valer sempre a lei da refração.

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \text{constante}$$

– Essa constante é chamada índice de refração do segundo meio com relação ao primeiro. No caso de a luz estar passando da água (primeiro meio) para o ar (segundo meio), o índice de refração vale $\frac{3}{4}$. Então o índice de refração do ar com relação à água vale $\frac{3}{4}$. Se a luz estivesse passando do ar para a água, a constante iria valer $\frac{4}{3}$, ou seja, o inverso de $\frac{3}{4}$.

– Quando um raio luminoso passa do ar para a água, ele se aproxima da normal. Diremos então que a água é **mais refringente** do que o ar. Quando passa da água para o ar, o raio luminoso se afasta da normal. Se o raio luminoso incidir perpendicularmente à superfície, ele não vai sofrer desvio algum. Mesmo assim, a lei da refração continua valendo.

– Em geral o índice de refração é representado pela letra n. Para indicar se o índice é o da água com relação ao ar ou vice versa, escrevemos:

$$n_{\text{ar, água}} = \frac{3}{4} \quad \text{e} \quad n_{\text{água, ar}} = \frac{4}{3}$$

– A lei da refração para um raio luminoso que passe de um meio 1 para um meio 2 ficará com o seguinte aspecto:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = n_{2,1}$$

– Note que o índice de refração que aparece é o do segundo meio com relação ao primeiro.

Mas, se a luz estivesse passando de um bloco de vidro em direção ao ar (Figura 3b), ou do ar para o vidro, esses valores seriam aproximadamente $\frac{2}{3}$ e $\frac{3}{2}$. Ou seja, para cada par de meios que a luz atravessa, temos um índice de refração.

E Gaspar termina:

– Comparando esses dois desenhos que fiz, dá para ver que, mesmo que os ângulos de incidência sejam iguais, os ângulos de refração podem ser diferentes se o par de meios for diferente. Cada par entorta de uma maneira. E tenho dito!

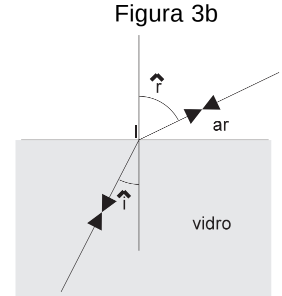
Os presentes aplaudem.

– É, eu tinha estudado um pouco para poder responder a todas perguntas que o Ernesto pudesse fazer e, agora, ele nem está aqui. Parece que saiu com o Maristela.

– E eu vou ter de saber todos os valores de índices de refração para saber como a luz se comporta em cada caso? – pergunta Roberto, interessado.

– Vai! Mas não é preciso decorar isso. Ninguém sabe o índice de refração de todas substâncias. Para isso exixtem tabelas.

Figura 3b



Deu zebra!

Roberto pede os esquemas para Gaspar e começa a analisá-los. Ao mesmo tempo, Gaspar vai fazendo um novo desenho.

– Veja, quando a luz sai da água e vai para o ar, o ângulo de incidência é menor que o ângulo de refração. Quando eu vou aumentando o ângulo de incidência, o ângulo de refração aumenta ainda mais. Vai chegar uma hora em que o ângulo de refração vai valer 90º, e o ângulo de incidência é menor que 90º. Se eu aumentar o ângulo de incidência, como para esse raio 4, o que vai acontecer?

– Ih! Deu zebra! Não tenho idéia! – diz Gaspar.

Nesse instante chegam Ernesto e Maristela, que tinham repetido o experimento da moeda dentro do copo. Roberto explica a situação e pergunta:

– Você sabe como vai ser refratado esse raio? Parece que ele vai acabar voltando para dentro da água.

– É isso mesmo! Ele volta para dentro da água! – diz Maristela. – E, como está voltando para o mesmo meio do qual saiu, trata-se de um raio refletido e que vai seguir as leis da reflexão. Mais ainda: como nenhuma parte da luz é refratada, trata-se de uma **reflexão total**. Toda luz é refletida! Esse fenômeno aparece nas fibras óticas que são utilizadas para transmissão de informações. A luz penetra na fibra ótica e não consegue sair, pois é constantemente refletida pelas paredes da fibra. Enquanto nas transmissões comuns as informações são transportadas por meio de impulsos elétricos, nas fibras óticas usa-se a luz como meio de transporte das informações (ver Figura 4b).

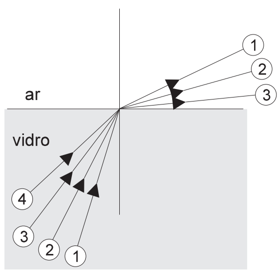


Figura 4a

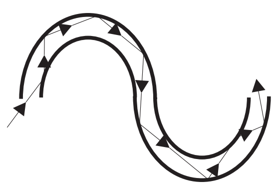


Figura 4b

Ângulo limite

Vamos considerar raios luminosos como aqueles que Roberto desenhou (ver Figura 5). Vai existir um raio luminoso que entra com um ângulo λ e sai com um ângulo de refração igual a 90º. Outros raios que incidam com ângulos maiores, serão refletidos. Esse ângulo λ é chamado **ângulo limite de incidência**, pois, a partir dele, não teremos mais raios refratados.

Podemos calcular o valor do ângulo limite para o caso no qual a luz passa do vidro para a água. Sabemos que o índice de refração do ar com relação ao vidro vale $\frac{2}{3}$. Então, utilizando a lei da refração para o caso da Figura 5, teremos:

$$\frac{\text{sen }\lambda}{\text{sen }90^\circ} = n_{\text{ar, navio}} = \frac{2}{3}$$

$$\frac{\text{sen }\lambda}{1} = \frac{2}{3}$$

$$\text{sen }\lambda = \frac{2}{3}$$

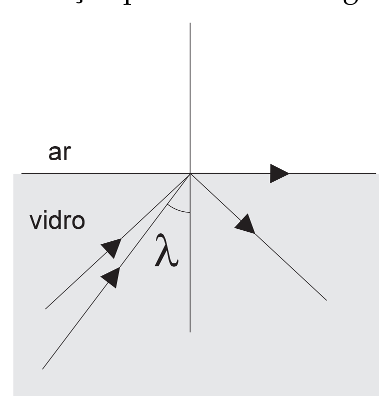


Figura 5

Procurando numa tabela ou usando uma calculadora, podemos ver que o ângulo que tem seno igual a $\frac{2}{3}$ vale aproximadamente 42º. E esse é o **ângulo limite** para o caso da luz que passa do vidro para a água.

O dióptro plano

Agora já estamos em condições de explicar o que aconteceu com a moeda que estava dentro do copo e, aparentemente, subiu. Os raios luminosos, ao passar de um meio para outro, sofrem desvios. Dessa maneira, se tivermos um objeto dentro d'água, os raios luminosos que são emitidos por ele vão ter suas trajetórias modificadas ao passar da água para o ar, formando uma imagem num ponto diferente daquele em que se situa o objeto. Um conjunto de dois meios separados por uma superfície plana, como a água dentro do copo e o ar, é chamado de **dióptro plano.**

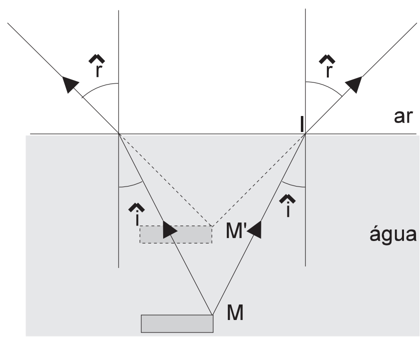


Figura 6a

Vamos tentar explicar como é formada a imagem da moeda dentro do copo. Se considerarmos dois raios luminosos que partem de um ponto M da moeda, podemos dizer que esse ponto M é um ponto objeto (Figura 6a).

Onde estará o ponto imagem? Ora, os raios luminosos, ao atingir a superfície da água, sofrem refração, mudando de direção. Para um observador do lado de fora, os raios parecem estar vindo de um ponto M'. Esse ponto é a imagem de M.

A posição dessa imagem depende de que ponto estamos olhando. Isto é: dependendo de como olharmos, ela vai parecer mais ou menos elevada. Se olharmos numa direção aproximadamente perpendicular à superfície da água, vai existir uma relação entre a distância do objeto e a distância da imagem. Essa relação é:

$$\frac{\text{distância da imagem até a superfície}}{\text{distância do objeto até a superfície}} = n_{2,1} = n_{\text{ar, água}}$$

Por exemplo, vamos supor que a moeda está no fundo do copo e que a água atinja a altura de 12 cm. A que altura alguém que observe a moeda numa direção aproximadamente perpendicular vai vê-la?

Vamos ter:

$$\frac{x}{12\text{ cm}} = \frac{3}{4}$$

$$x = 9\text{cm}$$

Então, a moeda vai ser vista a uma distância de 9 cm.

Nós construímos a imagem da moeda do mesmo tamanho que a moeda propriamente dita. Isso é um fato e podemos prová-lo facilmente, obtendo a posição do ponto situado do lado oposto da moeda. A água não aumenta o tamanho de um objeto mergulhado nela, mas aproxima esse objeto de quem está olhando, dando assim a impressão de que ele é maior.

Roberto, Gaspar e Ernesto foram fazer uma visita ao Mundo Submarino, o aquário da cidade.

– Olhem esses peixes – diz Roberto. – Assim como a moeda dentro do copo, eles devem estar mais longe do que parece!

Gaspar concorda.

– Mas como será que eles estão nos vendo? Mais próximos ou mais longe do que realmente estamos? – pergunta Gaspar. E ele mesmo responde.

– Eu acho que mais longe! Veja, vou seguir o mesmo raciocínio usado para o caso da moeda. Quem está nos observando é o peixe. A luz parte da gente e entra no aquário.

Gaspar começa a fazer um desenho, seguido com atenção por Roberto e Ernesto (Figura 6b).

– Os raios luminosos saem da gente, do ponto N, e se aproximam da normal. Então, nossa imagem vai ficar mais longe, no ponto N'! O peixe vai nos ver mais longe do que estamos!

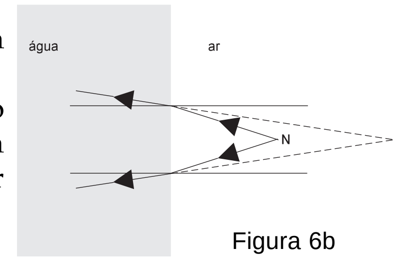


Figura 6b

As lentes

As aplicações mais importantes dos dióptros, na vida cotidiana das pessoas, estão nas lentes. Nós as utilizamos nos telescópios, para estudar o Universo, nos projetores dos cinemas, em aparelhos fotográficos, até na observação de seres muito pequenos, com o microscópio. Elas nos ajudam também a corrigir defeitos de visão, em óculos, por exemplo.

As lentes, em geral feitas de vidro, possuem duas faces. Uma das faces é, necessariamente, uma superfície curva. A outra pode ser outra superfície curva ou uma superfície plana. Dependendo das superfícies que compõem a lente, temos denominações como plano-cônvexa, biconvexa, bicôncava, plano-côncava (ver Figura 7). As superfícies curvas das lentes que estudaremos são superfícies esféricas.

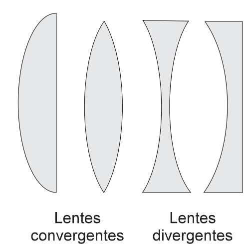


Figura 7

As lentes podem ser também classificadas em **convergentes** ou **divergentes**. Na Figura 8 temos dois exemplos de lentes, uma convergente e uma divergente.

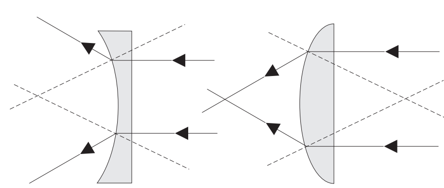


Figura 8

A lente da esquerda é uma lente plano-côncava. Ela é divergente. Se fizermos dois raios paralelos incidirem nessa lente, eles vão se comportar da seguinte maneira: em primeiro lugar, encontram a face plana e penetram na lente sem desvio, pois estão incidindo perpendicularmente a essa face da lente. Em seguida, penetram no vidro e encontram a segunda face. Ao sair, vão se afastar da normal (reta pontilhada na figura), pois o vidro, como vimos, é mais refringente que o ar. Assim, raios luminosos que entram **paralelamente** saem divergindo. Daí o nome **lentes divergentes**.

Você poderá agora analisar a lente que está à esquerda da figura e, da mesma maneira, descobrir por que ela é uma **lente convergente**.

As lentes são representadas, simbolicamente, por um traço vertical com duas pontas de flecha nas suas extremidades, como pode ser visto na Figura 9.

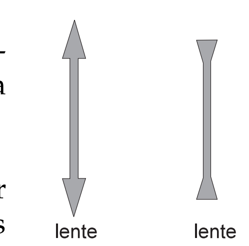


Figura 9

Construção geométrica de imagens dadas por lentes

Assim como fizemos para os espelhos esféricos, podemos obter as imagens de objetos dadas por lentes esféricas. Como nos espelhos, as lentes têm focos, um vértice e um eixo principal. Aqui também existem construções geométricas que nos permitem construir as imagens de objetos formadas pelas lentes. As construções que nos auxiliam a obter as imagens dos objetos estão nas Figuras 10a, 10b e 10c.

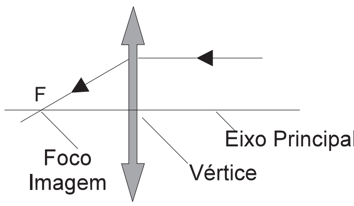


Figura 10a

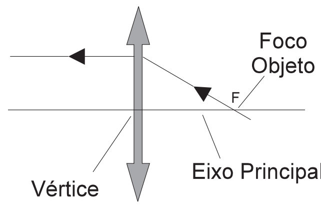


Figura 10b

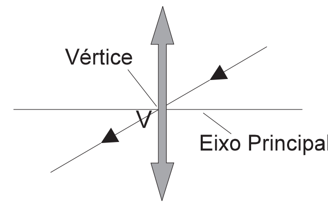


Figura 10c

Mas de que lado da lente estão os focos?

Essa noção é apenas uma referência e vai nos servir para determinar as posições das imagens dos objetos. Para isso, devemos saber de que lado da lente está vindo a luz do objeto em questão. No caso de uma lente convergente, o foco objeto está do lado em que a luz está incidindo. O foco imagem está do lado pelo qual a luz está saindo. No caso de uma lente divergente, as posições são invertidas.

Na primeira construção (Figura 10a), um raio luminoso que incide paralelamente ao eixo da lente sai passando pelo foco imagem da lente. Na segunda (Figura 10b), um raio que caminhe numa direção que passe pelo foco objeto sai da lente paralelamente. Finalmente, um raio luminoso que incida no vértice da lente não sofre desvio em sua trajetória (Figura 10c).

Utilizando duas dessas construções, podemos obter as imagens dos objetos gráficamente. Note que, no caso de uma lente, os focos objeto e imagem não estão no mesmo ponto, como aconteceu com os espelhos. Eles estão um em cada lado da lente.

Os focos das lentes podem ser melhor entendidos se considerarmos o seguinte exemplo: uma lâmpada colocada a grande distância de uma lente forma sua imagem no foco imagem. Se, por outro lado, colocarmos a lâmpada no foco objeto, sua imagem vai se formar a uma distância muito grande: no infinito, diríamos. Tanto o foco objeto como o foco imagem estão à mesma distância da lente. Essa distância é chamada **distância focal da lente**.

Vamos utilizar essas contruções auxiliares para obter a imagem de objetos colocados diante de algumas lentes. Inicialmente, vamos supor que tenhamos uma lâmpada diante de uma lente convergente e que ela esteja além do foco objeto F_O, como está representado na Figura 11.

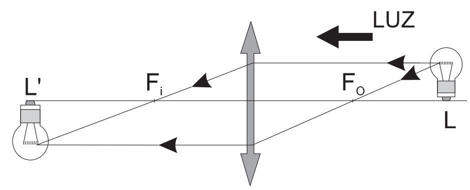


Figura 11

Um raio luminoso que parta de um ponto da lâmpada e incida paralelamente ao eixo será refratado, passando pelo foco imagem F_I . Um raio que parta da lâmpada e incida na lente, passando pelo foco objeto F_O , sairá da lente paralelamente ao eixo da mesma. Na intersecção desses dois raios, temos a imagem daquele ponto do filamento. Os raios, ao sair da lente, convergem para um ponto: logo, a imagem será real. Usamos um processo parecido quando queremos queimar um pedaço de papel utilizando uma lente para concentrar a luz do Sol. Você pode constatar, a partir dessa construção, que a imagem L′ tem posição invertida com relação à do objeto.

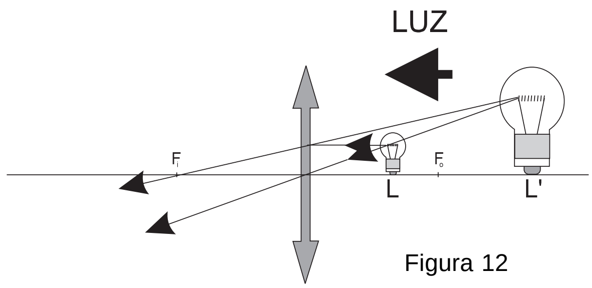


Figura 12

Se, por outro lado, a lâmpada estivesse entre o foco objeto e a própria lente, como é o caso da Figura 12, poderíamos utilizar, por exemplo, um raio que incidisse paralelamente ao eixo e outro que passasse pelo vértice da lente. O primeiro seria refratado de maneira análoga à anterior. O segundo passaria sem desvio. Nesse caso, os raios saem da lente de maneira divergente. Logo, a imagem é virtual.

Uma lente convergente, usada nessas condições, produz uma imagem L′ que está com orientação igual à do objeto, porém aumentada. Dessa maneira, ela pode nos auxiliar a observar os objetos com maiores detalhes: é o que chamamos de **lente de aumento**. Note que uma lente convergente também pode produzir um feixe divergente, como foi esse caso, em particular.

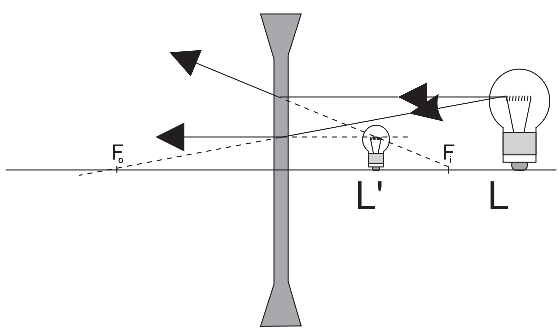


Figura 13

Vamos ver o que acontece quando a lente é divergente. Nesse caso, os focos estão em posição trocada com relação ao que falamos acima. Mas as construções são idênticas, como pode ser visto na Figura 13. Um raio luminoso que entre paralelamente ao eixo da lente sai passando pelo foco imagem. Um raio que passe pelo vértice não sofre desvio. Pode-se notar que a imagem da lâmpada aparece menor e com a mesma orientação da lâmpada. Como os raios que estão saindo são divergentes, a imagem é virtual.

Calculando a posição das imagens e seu tamanho

Assim como no caso dos espelhos, existe uma equação que serve para determinar a posição da imagem de um objeto. Outra equação nos permite calcular o tamanho da mesma. Como no caso dos espelhos, chamamos de **p** a distância do objeto à lente, e de **p ′** a distância da imagem à lente. A equação também é muito parecida. Se a distância focal for indicada pela letra **f**, a equação que relaciona a posição do objeto com a da imagem é:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

Se chamarmos de **o** a altura do objeto e de **i** a altura da imagem, a equação que nos dá o tamanho da imagem em função do tamanho do objeto é:

$$\frac{i}{o}=-\frac{p'}{p}$$

Para resolver problemas que envolvam lentes, usamos um sistema de referência similar ao da Figura 14. Nele representamos uma lente convergente. Seu foco objeto está, como já mencionamos anteriormente, do lado de onde vem a luz, ou seja, do lado direito da figura. O foco imagem dessa lente encontra-se à esquerda da lente. Para lentes divergentes, a situação dos focos é inversa. O foco objeto de uma lente divergente é virtual.

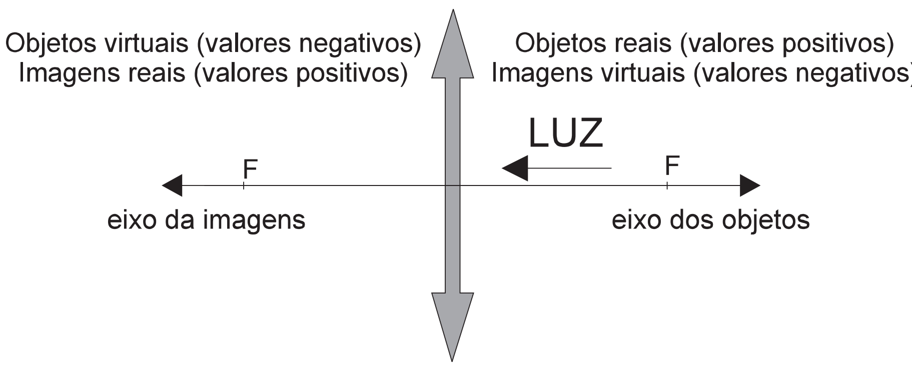


Figura 14

A lente divide o espaço em duas partes. De um lado temos o espaço das imagens reais e dos objetos virtuais (à esquerda na figura) e, do outro, as imagens virtuais e os objetos reais (à direita na figura). Para localizar objetos utillizamos um eixo e para localizar as imagens, outro. Se orientarmos o eixo dos objetos na direção contrária à da luz e eixo das imagens na direção da luz, veremos que **tudo que for real será representado por uma distância positiva e tudo que for virtual será representado por uma distância negativa**.

Passo a passo

1. Um objeto de 12 cm de altura está colocado a 80 cm de distância de um espelho esférico cuja distância focal vale 40 cm. Em que ponto vai ser formada a imagem? Qual a altura da mesma e qual a sua natureza (real ou virtual)?
A equação de conjugação nos dá:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{80}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{p'}=\frac{2-1}{80}=\frac{1}{80}$$

$$p' = 80\text{cm}$$

Como o valor de p′ é positivo, p′ está na região das imagens reais. Já o tamanho da imagem será dado por:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}$$

$$\frac{i}{12\ \text{cm}} = -\frac{80}{80}$$

$$i = -12\ \text{cm}$$

Nesse caso, o tamanho da imagem é igual ao do objeto. O sinal negativo indica apenas que objeto e imagem têm orientação oposta.

2. Vamos supor que, no exercício anterior, o objeto estivesse a uma distância de 20 cm da lente. Em que ponto seria formada a imagem? Qual a sua altura e qual a sua natureza?

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{p'} = \frac{1-2}{40}$$

$$p' = -40\ \text{cm}$$

Como p′ tem valor negativo, essa imagem é virtual. Da mesma maneira, podemos saber o tamanho da imagem. Teremos:

$$\frac{i}{o} = -\frac{p}{p'}$$

$$\frac{1}{12} = -\frac{-40}{20}$$

$$i = 24\ \text{cm}$$

O valor de i é positivo. Isso indica que o objeto e a imagem têm a mesma orientação.

3. Um objeto de 6 cm de altura está colocado a 48 cm de uma lente divergente cuja distância focal é 36 cm. Dê a posição, o tamanho e a natureza da imagem.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{48} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{36}$$

$$\frac{1}{p'} = -\frac{1}{36} - \frac{1}{48} = -\frac{7}{144}$$

$$p' \cong -21\ \text{cm}$$

Como o valor de p′ é negativo, a imagem é virtual. Vamos agora calcular o tamanho da imagem. Teremos:

$$\frac{1}{o} = -\frac{p'}{p}$$

$$\frac{i}{6} = -\frac{-\frac{144}{7}}{48}$$

$$i \cong 2{,}6 \text{ cm}$$

O valor positivo de i mostra que o objeto e a imagem têm a mesma orientação.

Nesta aula você aprendeu:

- que quando um raio luminoso incide na superfície de separação de dois meios transparentes ele sofre refração, isto é, tem sua direção mudada;
- que essa mudança de direção depende dos meios que a luz atravessa;
- o que é o ângulo limite;
- o que são lentes e como elas se comportam quando atravessadas por raios luminosos;
- como são formadas as imagens nas lentes e como podemos calcular a altura e a posição dessas imagens.

Exercício 1
Calcule o ângulo limite de incidência quando os meios atravessados pela luz forem a água e o ar.

Exercício 2
Uma pessoa situada a 72 cm da parede de um aquário observa um peixe que está a 36 cm da mesma parede. A que distância da parede do aquário cada um vê o outro?

Exercício 3
Construa graficamente a imagem de um objeto real, dada por uma lente convergente, quando o objeto está:
a) entre o foco e o vértice da lente.
b) além do foco.

Exercício 4
Construa graficamente a imagem de um objeto real dada por uma lente divergente.

AULA

34

Eu não nasci de óculos!

PARA COMEÇAR

Enquanto Roberto conversa com Gaspar, Ernesto coloca os óculos de Roberto e exclama:

- Puxa, estou enxergando tudo embaralhado. Tudo meio turvo!
- É como você tivesse achatado o olho! - diz Roberto.
- Como?
- Existem pessoas que, podemos dizer, têm o olho achatado...

Roberto desenha uma figura (Figura 1) e tenta explicar o que está querendo dizer:

- Nosso olho pode ser pensado como um globo que tem, na parte da frente, uma lente convergente. Essa lente - o cristalino - vai formar na retina, ou seja, no fundo do olho, as imagens dos objetos que estamos vendo. Essa luz que bate na retina é levada para nosso cérebro pelo nervo ótico e, dessa maneira, podemos ver os objetos.

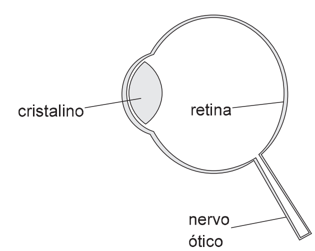


Figura 1

Roberto continua:

- Mas, para determinadas pessoas, a imagem se forma antes ou depois da retina. É como se o olho fosse achatado ou alongado. Os óculos servem para isso, para "desalongar" ou "desachatar" o olho. Na realidade, as lentes não mudam o olho, mas permitem que a imagem se forme sobre a retina.

Gaspar, interessado, resolve entrar na conversa:

- Mas essa lente não vai formar uma imagem invertida dos objetos que estamos vendo?
- Vai! As imagens, no cristalino, formam-se de cabeça para baixo. Nós enxergamos de ponta-cabeça (Figura 2).

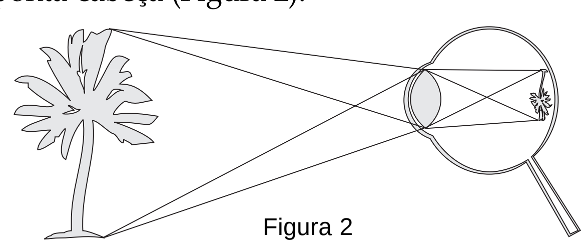


Figura 2

Enquanto isso, Ernesto começa a andar apoiado sobre as mãos, plantando bananeira.

- Estou tentando ver o mundo como ele realmente é!

Olhos mais, ou menos, achatados

Como Roberto estava explicando, o cristalino de algumas pessoas não forma a imagem dos objetos exatamente sobre a retina.

Essas imagens podem ser formadas antes da retina, e nesse caso a pessoa é míope (Figura 3), ou podem ser formadas além da retina, caso em que a pessoa é hipermétrope (Figura 4).

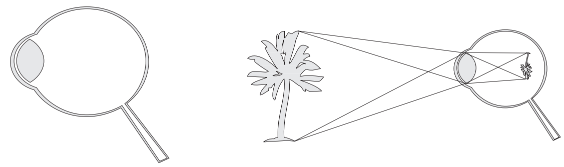


Figura 3

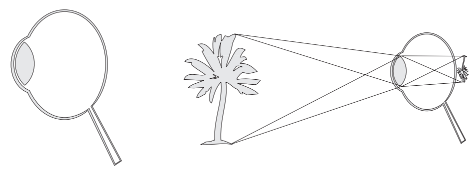


Figura 4

No caso da miopia, o cristalino é convergente demais, fazendo com que a imagem se forme antes de atingir o fundo do olho. Para corrigir esse defeito, necessitamos diminuir um pouco essa convergência. Para isso usamos uma lente divergente (Figura 5). Essa lente faz com que os raios luminosos entrem no olho de maneira um pouco divergente. Como o olho do míope é muito convergente, a imagem acaba se formando no fundo do olho.

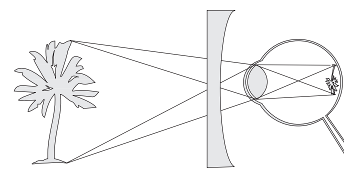


Figura 5

Por outro lado, o cristalino do olho pode ser pouco convergente. Teremos então uma pessoa com hipermetropia. As imagens, nesse caso, vão se formar além do fundo do olho. Essa pessoa, como também os míopes, vai ver os objetos de maneira turva, não nítida. Para corrigir esse defeito precisamos de uma lente convergente (Figura 6).

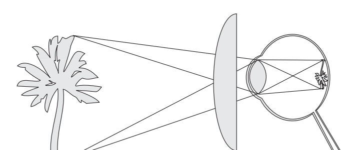


Figura 6

Uma vez que estudamos um pouco o olho humano, vamos ver como os instrumentos de ótica podem tornar nossos olhos mais eficientes no conhecimento do mundo que nos rodeia.

Um microscópio simples

Lupa, microscópio simples ou lente de aumento (Figura 7) são nomes que uma lente convergente pode receber. Ela é, também, o instrumento ótico mais simples que podemos imaginar. As lupas servem para que possamos examinar os objetos com maior detalhe. Muitas vezes são usadas para leitura.

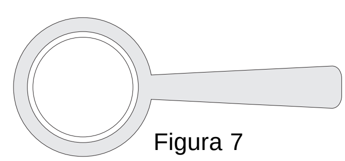


Figura 7

Como já estudamos as lentes, o princípio de funcionamento de uma lupa é fácil de explicar (Figura 8). Se colocarmos um objeto (a letra R da figura) diante de uma lupa, e de maneira tal que esse objeto fique entre o foco e o vértice dessa lente, a lupa vai produzir uma imagem virtual do objeto. Para construir essa imagem utilizamos um raio paralelo (que sai passando pelo foco) e um raio que passa pelo vértice da lente (e sai sem desvio). A imagem desse objeto, como pode ser visto na figura, é maior e tem a mesma orientação do objeto. Trata-se de uma imagem virtual. Ela se forma atrás da lente.

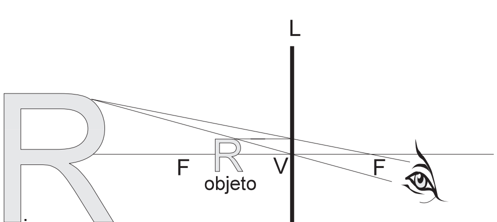


Figura 8

O projetor de slides

O projetor de slides, ou projetor de diapositivos (Figura 9), utiliza também uma lente convergente como princípio central de seu funcionamento.

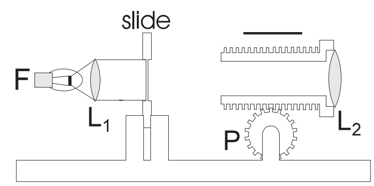
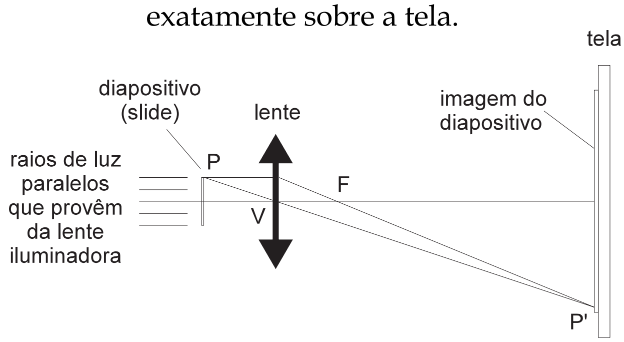


Figura 9

O projetor de diapositivos possui uma lâmpada F que é a fonte encarregada de iluminar o slide. Para isso, ela é colocada no foco de uma lente convergente L_1. Os raios luminosos que partem de F, após passar pela lente L_1 saem paralelos, pois a lâmpada está no foco da lente. Esses raios iluminam o diapositivo. A luz que sai do slide vai atingir, agora, a lente L_2. Para a lente L_2 o slide é um objeto real que vai ter sua imagem, também real, formada sobre uma tela. Para que a imagem do diapositivo se forme exatamente sobre a tela, utiliza-se uma cremalheira P. Girando-se a engrenagem, podemos fazer com que a lente se aproxime ou se afaste do slide. Assim, podemos fazer com que a imagem seja formada exatamente sobre a tela.



Para entender como se forma a imagem do slide sobre a tela, podemos usar dois raios luminosos que partem de um ponto P do diapositivo (Figura 10). Como foi feito anteriormente, vamos utilizar um raio que incida paralelamente na lente e é refratado passando pelo foco dessa lente.

Por outro lado, um raio que incida passando pelo vértice da lente passa sem sofrer desvio. Esses dois raios luminosos vão se encontrar num ponto P' da tela. Tanto o ponto P como sua imagem P' são reais. Uma característica das imagens reais é que elas podem ser projetadas num anteparo: na tela, por exemplo. Pode-se notar que a posição da imagem do slide é invertida com relação ao próprio slide. Dessa maneira, ao colocar o slide no projetor, devemos invertê-lo para que, sobre a tela, sua imagem saia com a orientação correta, isto é, com a mesma orientação da foto que está no slide.

Os projetores de cinema também funcionam como os projetores de slides. Uma lâmpada ilumina o filme e uma lente encarrega-se de projetar o filme sobre a tela. Os projetores possuem, também, um ajuste que "focaliza" o filme sobre a tela.

Focalizar, nesses casos, não é colocar o filme ou o slide no foco da lente. Significa colocar o filme ou o slide num ponto tal que a imagem se forme sobre a tela.

Outro aparelho que algumas vezes precisamos focalizar é a máquina fotográfica (Figura 11). Ela também tem seu princípio de funcionamento baseado em uma lente convergente. Às vezes, é um conjunto de lentes que atua como se fosse uma única lente convergente.

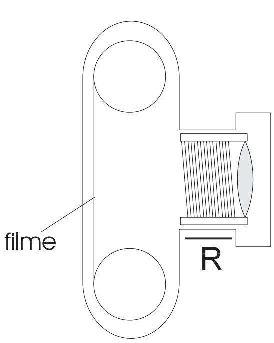


Figura 11

Os aparelhos fotográficos modernos, com auxílio de uma rosca R, fazem variar a distância entre a lente convergente - que é chamada objetiva - e o fundo do aparelho fotográfico, onde está o filme sensível. Quando não conseguimos ajustar essa distância satisfatoriamente, a imagem fotográfica fica "fora de foco". Isso porque os raios luminosos que partem do objeto e deveriam se cruzar exatamente sobre o filme fotográfico cruzam-se pouco antes ou pouco depois.

O microscópio composto

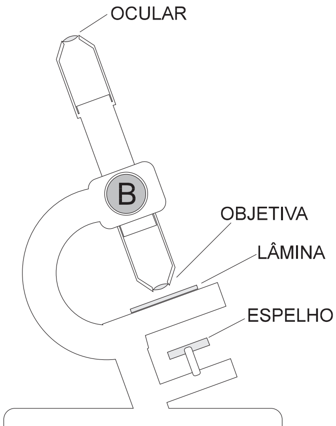


Figura 12

O microscópio composto (Figura 12) é um dos instrumentos que mais fez progredir as pesquisas no campo da Biologia. Basicamente, um microscópio composto consta de duas lentes convergentes ou, mais precisamente, de dois conjuntos de lentes que agem como se fossem duas lentes convergentes.

Essas lentes convergentes estão nas duas extremidades de um tubo metálico. Uma das lentes é a objetiva e a outra, a ocular. Como os próprios nomes estão indicando, a objetiva do microscópio está perto do objeto a ser estudado; a ocular é a lente pela qual o observador pode analisar tal objeto.

Abaixo da objetiva existe um suporte no qual é colocado o material de estudo (sobre uma lâmina de vidro). Um pouco mais abaixo existe um espelho que serve para iluminar o material que está sobre a lâmina. Às vezes esse espelho é substituído por uma lâmpada que ilumina, diretamente, a lâmina. Um botão B, capaz de levantar ou abaixar o tubo metálico, tem a mesma finalidade que outros descritos anteriormente: fazer com que a imagem de um objeto se forme em um ponto determinado.

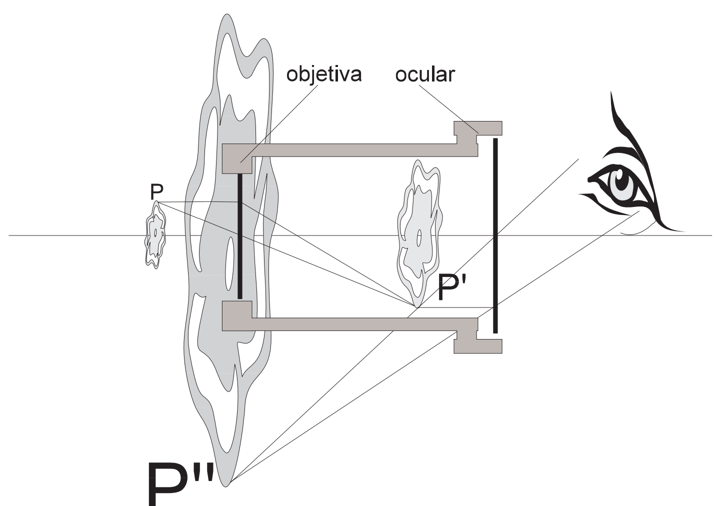


Figura 13

Na Figura 13 temos uma representação esquemática do que ocorre na formação das imagens dentro de um microscópio composto. Nesse esquema temos o próprio corpo do microscópio, alguns objetos e suas imagens, e os raios luminosos que estão definindo essas imagens.

Vamos considerar um ponto P no objeto que está sendo estudado - uma célula, por exemplo. Esse ponto envia raios luminosos que atingem a objetiva. Tomando-se dois desses raios, um paralelo ao eixo e outro que passe pelo vértice da objetiva, podemos determinar a posição da imagem desse ponto da célula dada pela objetiva. Esse é o ponto P'.

A imagem da célula fornecida pela objetiva é uma imagem real e encontra-se, na figura, perto da ocular. Sabemos que a imagem é real porque os raios que estão chegando a P', depois de sair da objetiva, são convergentes.

Essa imagem intermediária formada pela objetiva vai servir como objeto real para a ocular. Para construir a imagem final, basta considerarmos, mais uma vez, dois raios luminosos: um que entre paralelamente na ocular e outro que entre passando pelo vértice. O que entra paralelo sai pelo foco e o outro sai sem sofrer desvio. Obtemos, dessa maneira, a imagem de P'. Essa imagem é o ponto P''. Trata-se de um ponto imagem virtual. Sabemos disso porque os raios luminosos que estão saindo de P'' depois de passar pela ocular são divergentes.

Então, inicialmente, temos uma lente, a objetiva, que forma uma imagem real de uma célula. Em seguida, uma segunda lente forma uma nova imagem da primeira imagem. É essa imagem, uma imagem virtual final, que observamos. Essa imagem é muito maior que a célula original. Esse aumento vai depender tanto da objetiva como da ocular.

A luneta astronômica

Assim como o microscópio é de grande utilidade para a Biologia, os telescópios e lunetas trouxeram grandes progressos ao estudo do Universo. Um dos primeiros telescópios foi construido por Galileu que, com ele, descobriu as luas de Jupiter, as fases de Vênus...

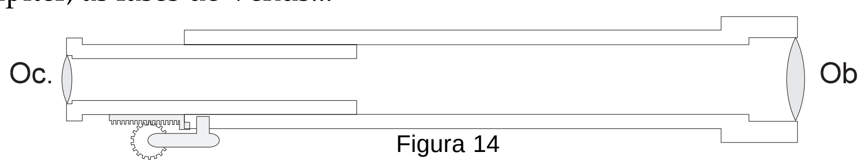


Figura 14

A luneta astronômica (Figura 14) tem muitas semelhanças com o microscópio. Também é constituída por duas lentes convergentes ou dois conjuntos de lentes que atuam como lentes convergentes. De maneira análoga, essas lentes estão na extremidade de um ou dois tubos; uma delas é chamada de objetiva e a outra, de ocular. A diferenças estão apenas nas distâncias focais das objetivas. Nas lunetas, a distância focal da objetiva é da ordem de 1 m (podendo chegar a vários metros), enquanto que no microscópio ela é pequena, menor que 1 cm.

O princípio de focalização é também semelhante aos demais instrumentos descritos, na distância relativa entre as lentes que compõem o aparelho. Para conseguir isso, existe uma cremalheira que permite que um dos tubos da luneta deslize sobre o outro, fazendo com que a distância entre a objetiva e a ocular posa ser modificada.

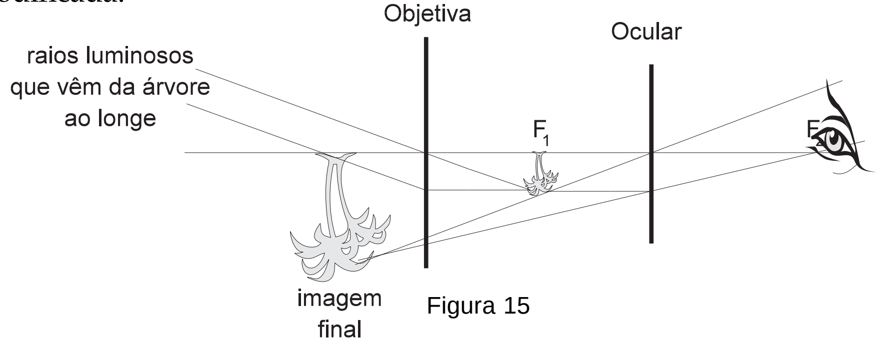


Figura 15

O princípio de funcionamento da luneta astronômica (Figura 15) é o seguinte: inicialmente a objetiva forma uma imagem real do astro que estamos observando. Essa imagem, pelo fato de o astro estar a uma distância muito grande, vai se formar praticamente no foco imagem F1 , da objetiva. Essa imagem é real e invertida.

Com auxílio da ocular, que age como se fosse uma lupa, observamos essa imagem real. A imagem final, aquela dada pela ocular, vai ter, portanto, direção invertida com relação ao objeto observado. Isso não tem grande importância quando usamos a luneta para observar a Lua ou um planeta, por exemplo. Na figura, usamos uma árvore para mostrar exatamente essa inversão, e também para poder comparar essa luneta com a luneta terrestre, que não inverte a posição dos objetos obervados.

A luneta terrestre

As lunetas terrestres e astronômicas pouco diferem no seu aspecto externo. Uma luneta terrestre também possui uma objetiva, que é uma lente convergente de distância focal grande. As duas lunetas são diferentes no que diz respeito à ocular: as astronômicas usam lentes convergentes e as terrestres usam lentes divergentes (Figura 16).

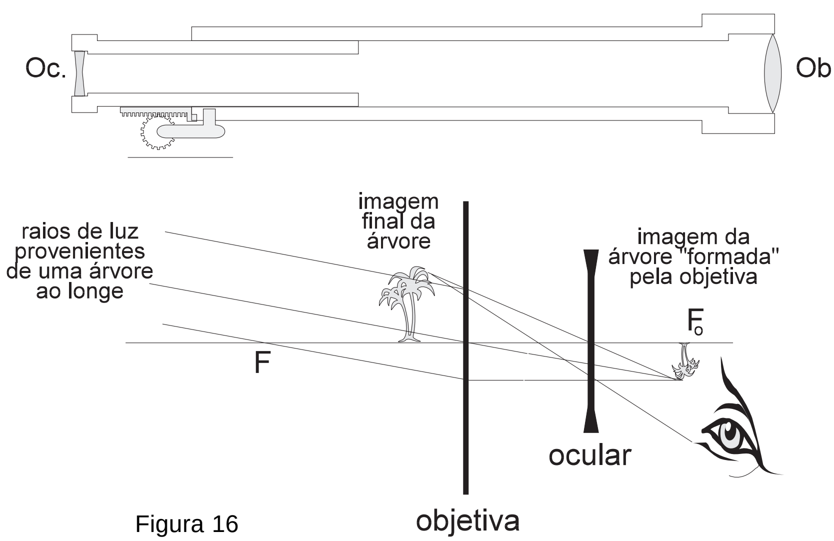


Figura 16

Na figura, os raios luminosos que provêm de um objeto distante (árvores) "formam" uma imagem real perto do foco da objetiva. Na realidade, essa imagem não pode ser formada, pois os raios encontram, antes, a ocular. Mas é exatamente essa imagem que vai servir de objeto virtual para a ocular. A ocular forma, então, a imagem final, como mostra a figura. Nesse caso, podemos constatar que a imagem final tem a mesma orientação que o objeto visado. As primeiras lunetas, mesmo as utilizadas em Astronomia, eram desse tipo.

O telescópio refletor

Assim como Galileu introduziu as lunetas no estudo dos astros, Newton foi um dos responsáveis pela introdução dos telescópios refletores no estudo da Astronomia.

O telescópio refletor, como o próprio nome indica, usa um espelho côncavo como objetiva. O espelho pode ser esférico, como aqueles que estudamos, ou parabólico. Mas é sempre côncavo. Existem muitos tipos de telescópios refletores. O que vamos descrever é o modelo do próprio Newton (Figura 17). Ele utiliza, como objetiva, um espelho esférico côncavo.

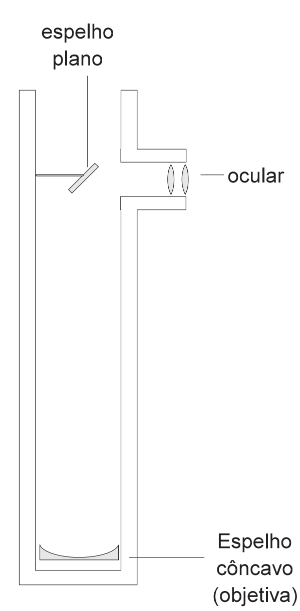


Figura 17

Inicialmente temos um tubo fechado numa das extremidades. Nela existe um espelho côncavo, a objetiva, que também é chamado de espelho principal. Perto da extremidade aberta existe um segundo espelho. Este, um espelho plano denominado espelho secundário, serve para desviar os raios que vêm do espelho primário e lançá-los sobre a ocular. O espelho secundário tem inclinação de 45º em relação ao eixo do tubo.

Finalmente, temos a ocular, que é, como quase todas anteriores, uma lente convergente ou um conjunto de lentes que atuam como lente convergente.

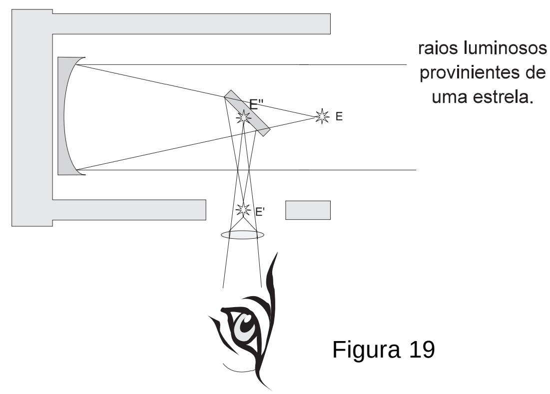


Figura 19

Se o telecópio for apontado para um objeto distante, uma estrela, por exemplo (Figura 18), os raios que provêm da mesma chegam ao telecópio paralelos. Esses raios entram pelo tubo, atingem o espelho principal, a objetiva, e são refletidos. Como o objeto (a estrela) está a uma distância infinita, a imagem dessa estrela E vai se formar no foco do espelho eférico. Contudo, antes que cheguem lá, eles escontram em seu caminho o espelho plano, e são desviados. Assim, o ponto E passa a atuar, para o espelho plano, como um objeto virtual, e formará uma imagem real P'.

É essa imagem P' que podemos examinar usando a ocular como se fosse uma lupa. A imagem final que observamos, P", é uma imagem virtual.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu como funcionam:

- uma lupa;
- um projetor de slides;
- um microscópio;
- lunetas e telescópios.

mãos à obra

Exercício 1

Quando expomos uma lente do óculos de uma pessoa hipermétrope ao Sol, e colocamos uma folha de papel abaixo da mesma, forma-se, sobre o papel, a imagem do Sol. É um ponto muito brilhante, que é capaz de queimar o papel. Construa um esquema para representar esse fenômeno.

Exercício 2

No problema anterior, como ficaria a situação se os óculos fossem de uma pessoa míope? Por que, nesse caso, o Sol não queima o papel?

AULA

35

A luz em bolas

Todo o grupo de amigos estava reunido na praia. Enquanto alguns conversavam, Ernesto lia atentamente.

– Olha como o Sol está hoje! Quanta luz! – disse Roberto.

– É, mas não vamos ficar aqui. Vamos jogar bola! – disse Gaspar.

– Vamos pegar uma onda! – disse Alberta.

– Bola!

– Onda!

– E você, Ernesto? O que você acha? Bola ou onda?

Ernesto, sem desviar muito do livro que lia concentradamente, disse:

– Segundo o Einstein, ora é uma coisa, ora é outra!

– Acho que você tomou sol demais. O que é isso que você está falando? – perguntou Roberto.

– Da luz! É claro! Estou falando sobre a natureza da luz. É esse texto. É a peça de teatro que vamos fazer para falar sobre a luz. O Einstein achava que a luz pode ser tanto uma partícula como uma onda. Se vocês estiverem interessados, podem me ver na apresentação. A peça é a história de um entrevistador que tinha uma nave que podia caminhar pelo tempo. Então ele reúne cientistas de várias épocas, que falam sobre a luz. Eu vou ser o entrevistador na peça.

– Mas, agora, sou por uma onda!

A velocidade da luz

No dia da apresentação, Ernesto, todo empolgado, está no palco, sentado numa cadeira giratória. Ao redor dele, muitos cientistas sentam-se lado a lado. Ernesto, agindo como entrevistador, inicia uma espécie de debate, dirigindo-se aos cientistas:

Entrevistador – Meus caros senhores, estamos aqui para entender melhor **o que é a luz**. Tentamos reunir todos vocês e contar com a colaboração de cada um, vindos de épocas tão diferentes, para que isso se torne possível. Inicialmente vamos falar sobre a velocidade da luz. Em seguida, discutiremos o que é, realmente, a luz. Se é que isso é possível. Esperemos que esse debate possa trazer luz ao nosso problema. Podemos começar com o senhor Galileu. Por favor, professor, o que o senhor tem a nos dizer sobre a velocidade da luz? Quais as suas pesquisas nesse campo? Quais os resultados? Em seguida, podemos fazer um pequeno debate.

Galileu – Em primeiro lugar, eu gostaria de agradecer o convite que me foi feito. Gostaria também de afirmar que sou o primeiro a responder, mas não fui o primeiro a me preocupar com a velocidade da luz. Creio que os que vão dar seus depoimentos em seguida poderão contribuir mais do que eu.

Bem, o que eu fiz foi o seguinte:

Eu estava interessado em saber a velocidade da luz. Então, uma noite, subi no alto de um morro. Enquanto isso, meu assistente subia um morro um pouco distante (Figura 1). Tanto eu como ele estávamos com lanternas. Nós já sabíamos que a velocidade da luz é maior do que a do som, pois, durante uma tempestade, primeiro vemos o raio e só depois ouvimos o trovão.

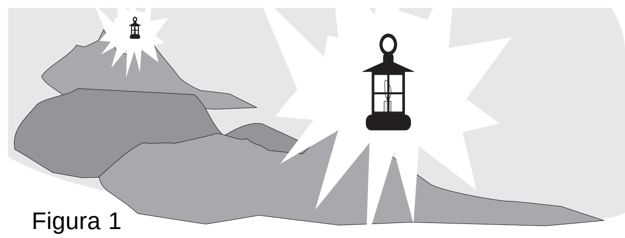


Figura 1

De início, as duas lanternas estavam cobertas. Então, eu descobria a minha e começava a contar o tempo. Quando meu assistente via a luz da minha lanterna, descobria a dele. Quando eu via a luz, marcava o tempo gasto. Descobrimos que a velocidade da luz ou é infinita ou é muito grande, pois ela ia e voltava num tempo quase nulo.

Entrevistador – Alguém quer acrescentar algo, ou fazer alguma questão?

Newton – É com muito orgulho que me dirijo ao senhor Galileu, pois foi ele um dos que contribuíram enormemente para que meu trabalho fosse coroado de êxito. São algumas perguntas simples. Em primeiro lugar, como é que o senhor media os tempos? Depois, eu queria fazer um depoimento e mais uma pergunta. Pelos meus cálculos, a velocidade da luz no ar – pois o senhor estava tentando medir a velocidade da luz no ar – é finita. Ela é muito grande, mas é finita. Porém, eu estou convencido de que a velocidade da luz em outros meios é diferente. Eu creio que na água, que é um meio mais denso, ela é maior ainda. É a mesma coisa que ocorre para o som. Nos metais, o som se propaga mais rapidamente do que no ar. É dessa maneira que podemos explicar a refração. As partículas da água, por exemplo, atraem as partículas da luz que estão andando numa direção, fazendo com que a direção mude (Figura 2). Quanto mais denso o meio, maior o desvio. O que o senhor acha?

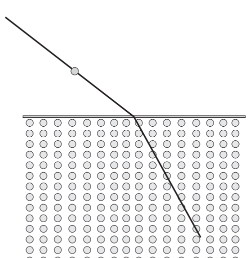


Figura 2

Nesse instante quase começa um tumulto entre os participantes. Todos queriam falar ao mesmo tempo, obrigando o entrevistador a intervir.

Entrevistador – Vamos dar a palavra novamente ao senhor Galileu. Por favor, professor.

Galileu – Meu caro Newton, na minha época, como você sabe, os relógios ainda não estavam bem desenvolvidos e éramos obrigados a marcar o tempo usando algo que conseguisse produzir intervalos de tempos iguais. Eu usei, freqüentemente, as batidas do meu coração. No experimento que eu descrevi, meu coração bateu apenas uma vez entre a ida e a volta da luz. Quanto a medir a velocidade da luz em outros meios, ou pensar a respeito, quero que outros desta sala possam contribuir. Eu vejo que o senhor Fermat está ansioso por falar.

Fermat – Eu quero discordar do senhor Newton. Eu também tenho uma teoria que pode descrever como a luz vai de um ponto a outro. Ela usa o princípio do caminho mínimo. Vou dar um exemplo para aclarar as coisas. Vamos imaginar um pássaro que esteja sobre um muro numa posição A. Ele quer ir até o chão e voar, em seguida, para um ponto B numa árvore. Qual a trajetória mais curta? Dentre todas as que podemos escolher, a mais curta é aquela na qual os ângulos α e β são iguais. Exatamente como na reflexão. Com a refração acontece a mesma coisa. Ou seja, a luz anda pelos caminhos mais curtos. E mais: na minha opinião, nos meios mais densos a velocidade é **menor** do que no ar.

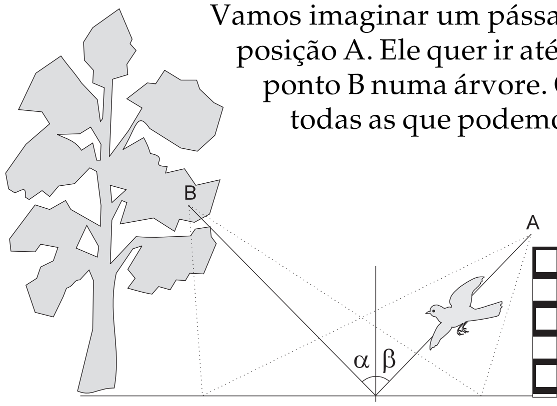


Figura 3

Mais uma vez os participantes tentam se manifestar ao mesmo tempo, obrigando o entrevistador a intervir.

Entrevistador – Eu gostaria que algum dos participantes mostrasse algum experimento sobre a velocidade da luz. Alguém dos presentes?

Roëmer e Fizeau levantam as mãos.

Entrevistador – Senhor Roëmer, por favor!

Roëmer – Eu estava estudando os eclipses dos satélites de Júpiter. A rotação dos satélites em torno do planeta tem, segundo as leis de Kepler, um período constante. Os satélites, por sua vez, são eclipsados por Júpiter. Essas ocultações, se a velocidade da luz fosse infinita, deveriam ocorrer com um período igual àquele do satélite (Figura 4). Acontece que, quando medi o tempo entre os aparecimentos do satélite S, após ocultações sucessivas, descobri que esses tempos eram maiores quando Júpiter estava mais longe da Terra (em T_2) e menores quando estava mais próximo (em T_1). Conclui que isso era devido ao fato de que a luz deve percorrer ora uma distância maior, ora uma distância menor. Entre o maior valor do período (quando Júpiter estava mais afastado da Terra) e o menor período (quando Júpiter estava mais próximo da Terra) houve uma diferença de 22 segundos. Daí conclui que a luz gasta 22 segundos para atravessar uma distância igual ao diâmetro da órbita da Terra. Assim, pude determinar a velocidade da luz.

Entrevistador – Obrigado, senhor Roëmer. Vamos agora ver o que o senhor Fizeau tem a nos contar. Senhor Fizeau, por favor.

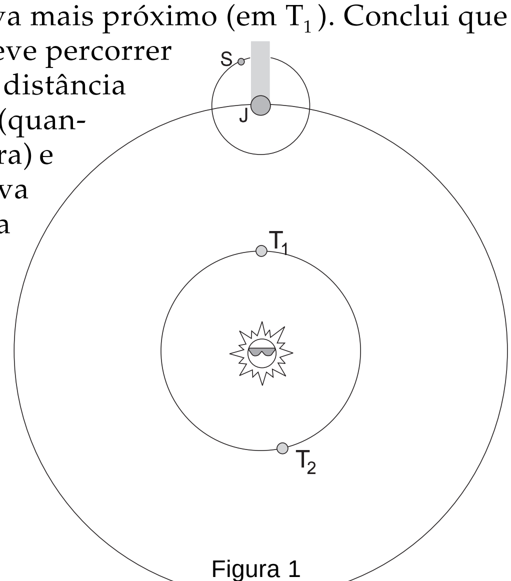


Figura 1

Fizeau – Na realidade eu fiz algo próximo ao que fez nosso mestre Galileu. Eu também tinha uma fonte de luz e essa luz era mandada de volta por um espelho. Eu também tinha um intervalo entre "luz acesa" e "luz apagada". Construí uma roda dentada, como se fosse uma engrenagem, e mandava um feixe de luz que passava entre os dentes da roda. Essa luz chegava até um espelho que estava a uma distância de uns 8 km da lâmpada e voltava até a roda (Figura 5).

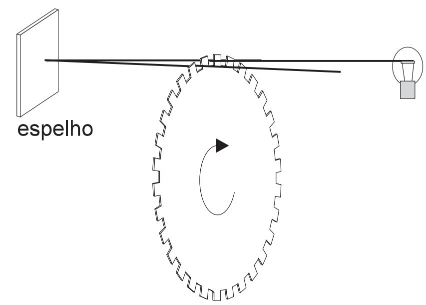


Figura 5

A luz, então, era interrompida de tempos em tempos pelos dentes. Ela passava por um dos espaços entre os dentes, chegava ao espelho, era refletida e voltava à roda dentada. Se a velocidade da roda fosse muito baixa, a luz chegaria até o espelho e passaria ainda pelo mesmo furo. Porém, se a velocidade da roda fosse maior, quando a luz voltasse poderia encontar um dente. Então, não conseguiríamos ver a luz. Se a velocidade fosse aumentada ainda mais, a luz, agora, poderia passar pelo furo seguinte. Novamente poderíamos ver a luz. Aumentando-se mais uma vez a velocidade, teríamos novo dente interceptando a luz, e assim por diante. Assim, tudo estava determinado. Se eu soubesse qual a velocidade de rotação da roda dentada na qual houve a primeira ocultação da lâmpada (ou a segunda, a terceira etc.), eu poderia calcular a velocidade da luz, pois sabia a distância entre a roda e o espelho. Foi assim que eu procedi.

Entrevistador – Obrigado, senhor Fizeau. Alguém quer fazer algum comentário? Não? Eu gostaria de acrescentar que o método empregado pelo senhor Fizeau foi usado até o princípio deste século (1902) e o valor obtido para a velocidade da luz, dessa maneira, foi:

$$\boxed{(299.901 \pm 104)\ \text{km/s}}$$

A natureza da luz

Entrevistador – Vamos agora passar a um ponto um pouco mais polêmico. O que é a luz? Alguém quer iniciar? Senhor Newton? Por favor. O que é, então, a luz para o senhor?

Newton – Como eu já comecei a dizer, creio que a luz é constituída de pequenas partículas que são emitidas pelos corpos. Essas partículas têm tamanho e formas diferentes. Quando vemos, num pedaço de vidro, várias cores, estamos vendo, no fundo, partículas de diferentes tamanhos que causam, aos nossos olhos, as diferentes sensações de cores. Contudo, sei de pessoas como o senhor Huygens, que infelizmente não está presente, que acreditam que a luz seja uma vibração, um fenômeno ondulatório, que a luz é algo que se parece com o som. A essas pessoas eu pergunto: se a luz é uma onda, por que ela anda sempre em linha reta e não contorna os obstáculos? Por que não ocorre o fenômeno da **difração**, por que a luz não contorna os objetos? As ondas no mar contornam as pilastras que estiverem dentro do mesmo. As ondas sonoras também contornam os objetos, ou seja, apresentam o fenômeno da **difração**. Tanto é que conseguimos ouvir o que uma pessoa fala mesmo que entre ela e nós exista um obstáculo. Ao que tudo indica, não temos difração para o caso da luz.

Entrevistador – Mas, senhor Newton, vamos voltar um pouco à sua teoria. Existem cristais que, quando são atravessados pela luz, produzem uma diminuição na intensidade da luz que os atravessa. Se colocarmos um segundo cristal do mesmo tipo num certo ângulo, uma quantidade apreciável de luz vai passar.

Se prosseguirmos girando esse segundo cristal, a intensidade da luz cai quase até zero.

O senhor pode não estar a par, mas atualmente conseguimos fabricar um plástico que tem as mesmas propriedades dos cristais que o senhor conhece. Nós chamamos esses plásticos de **polaróides**. Como o senhor explicaria o comportamento da luz ao atravessar esses cristais ou os nossos polaroides? Como é que as partículas de luz às vezes passam pelo cristal e às vezes, não?

Newton – Já afirmei anteriormente que a luz é formada por partículas de diferentes formas. Talvez elas sejam um pouco achatadas e consigam passar pelo cristal. Ainda não sei ao certo. Mas não é esse argumento que vai me fazer acreditar que a luz seja uma onda. Ainda não vi luz contornando um obstáculo, como fazem as ondas! Quanto às explicações dadas pelo senhor Huygens para o comportamento da luz ao atravessar esses cristais, usando seu modelo ondulatório, creio que não são melhores que as minhas.

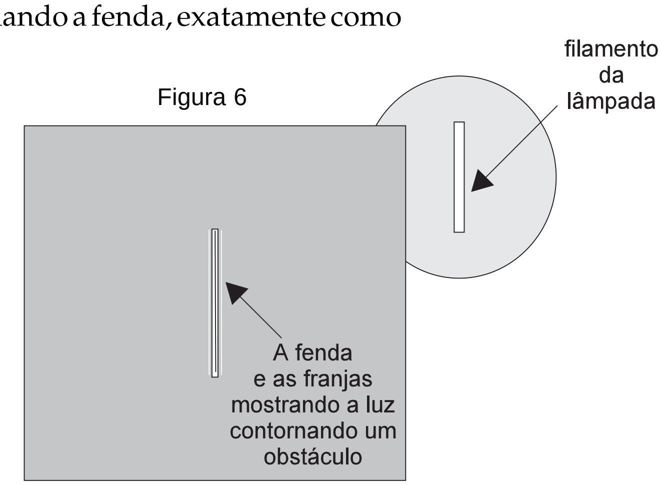
Entrevistador – Senhor Newton, alguém pede um aparte. Trata-se do senhor Young. O que o senhor deseja colocar, senhor Young?

Young – Eu gostaria de defender a mesma posição do senhor Huygens, isto é, que a luz é uma onda. Na realidade, eu utilizei os seus princípios para realizar o meu experimento.

Em primeiro lugar, eu gostaria de dizer que é possível constatar que a luz contorna os obstáculos. Podemos mostrar a **difração** da luz. Isso pode ser feito por qualquer pessoa. Se fizermos um corte bem fino numa folha de metal e apontarmos essa fenda para o filamento de uma lâmpada, veremos uma parte clara e, ao lado, umas franjas claras e escuras. Essas franjas mostram que a luz está se desviando de uma trajetória retilínea e contornando a fenda, exatamente como outras ondas fazem.

Entrevistador – Eu quero aproveitar a oportunidade e dizer aos participantes que a folha de metal pode ser o papel de alumínio usado na cozinha. Nele podemos fazer um corte, usando um estilete ou uma lâmina de barbear, e, em seguida dirigir essa fenda para o filamento de uma lâmpada (Figura 6). Se o filamento for reto, os resultados serão melhores. Podemos mesmo usar duas lâminas de barbear, uma ao lado da outra, formando a fenda. Senhor Young, desculpe minha intromissão. Continue, por favor.

Figura 6



Young – Seguindo as idéias de Huygens, eu fiz passar a luz do Sol por um orifício que representei por F na Figura 7.

Como considero que a luz é uma onda, eu representei as partes mais altas da onda, ou seja, as cristas das ondas, por círculos concêntricos. As partes mais baixas da onda, os vales, estão entre os círculos que desenhei.

Logo em seguida, essa luz passava por outros dois orifícios F_1 e F_2. No primeiro dos orifícios, a luz deve ter sofrido uma difração, uma mudança na sua trajetória. Caso contrário, não conseguiria atingir as fendas F_1 e F_2. Como explicava o senhor Huygens, a fenda F vai agir como se fosse uma nova fonte mandando luz para todas direções. E essa luz, ao atingir as fendas F_1 e F_2, fará com que essas fendas se tornem novas fontes, mandando luz em todas direções.

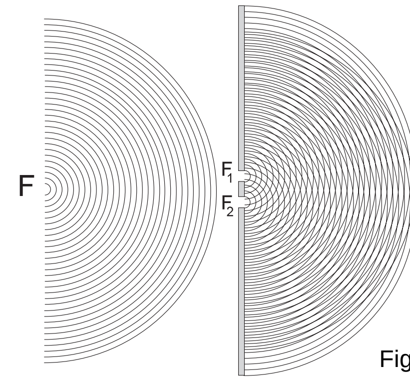


Figura 7

Fiz então novos círculos concêntricos, agora com centro em F_1 e F_2. E é agora que temos mais uma confirmação de que a luz é uma onda. A luz que sai de F_1 **interfere** com a que sai de F_2, ou seja, vão existir pontos nos quais a intensidade da luz vai ser aumentada e outros nos quais pode ser até anulada. Nos pontos em que duas cristas se encontram, a intensidade é reforçada, enquanto que, quando uma crista encontra um vale, a intensidade da luz pode até ser anulada.

Se olharmos a Figura 7, colocando-a na altura dos olhos, podemos perceber que existem regiões mais escuras e mais claras. O que se passa na figura é o mesmo que ocorre na realidade. Vão aparecer linhas de interferência. Isto, meu caro Newton, é uma prova de que a luz é uma onda. E as cores são apenas ondas com comprimentos de onda diferentes, não partículas de tamanho diferente, como o senhor afirmou. A luz vermelha tem um grande comprimento de onda, enquanto que na luz violeta o comprimento de onda é pequeno.

Newton – Mas, então, como o senhor explicaria o caso da luz atravessando certos cristais, quando chega até a haver extinção da intensidade luminosa? Eu recordo que o senhor Huygens, que mais uma vez lamento que não esteja presente, não conseguiu, com sua teoria ondulatória, explicar o fato. É verdade que eu mesmo reconheço que a minha teoria não consegue dar conta do recado. O senhor tem algo para nos contar? Sua teoria é diferente daquela do senhor Huygens?

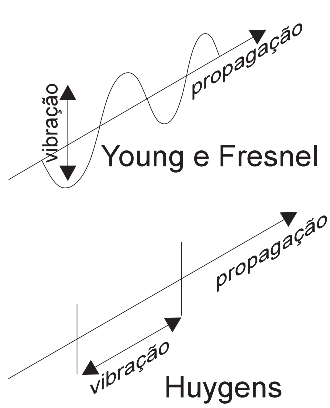
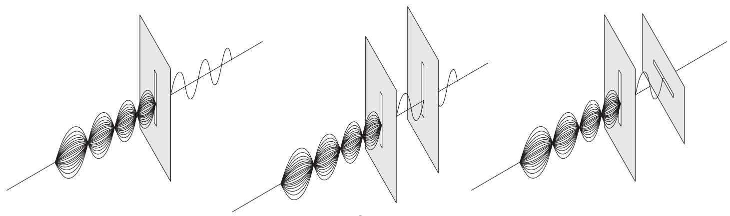


Figura 8

Young – A diferença entre a teoria do senhor Huygens e aquela que desenvolvi com meu grande amigo Fresnel é que, para o senhor Huygens, a luz vibra na mesma direção em que caminha. Exatamente como faz o som. Para nós, a luz vibra numa direção perpendicular àquela em que caminha (Figura 8). Com essa teoria podemos explicar o comportamento da luz nos cristais que o senhor mencionou, ou nos polaróides citado por nosso entrevistador.

Na Figura 9a temos luz incidindo num polaróide. A luz vibra em todas direções. Quando chega ao polaróide, somente a luz que estiver vibrando em certa direção consegue passar (Figura 9b). O polaróide só permite a passagem da luz que vibra numa certa direção. A luz, ao sair do polaróide, está **polarizada**. Ela está vibrando apenas numa direção. Se outro polaróide for colocado na mesma direção, toda luz passará. Mas, se o polaróide for girado 90º, nenhuma luz conseguirá passar. Isso é, brevemente, o que eu queria dizer.

Figura 9



a b c

Entrevistador – Parece que a teoria corpuscular que o senhor Newton tem defendido está perdendo bastante terreno. Ao que parece, a luz é mesmo um fenômeno ondulatório. Existe alguém que queira defender a teoria corpuscular ou acrescentar algo mais à teoria ondulatória? Vejo que o senhor Maxwell quer dar sua opinião.

Maxwell – Eu apenas queria acrescentar que, quando estava estudando ondas eletromagnéticas, descobri que a velocidade delas é igual à velocidade da luz. Meu colega Hertz produziu ondas de rádio que também são ondas eletromagnéticas, que têm também a velocidade da luz. Dessa maneira eu concluí que a luz também é uma onda eletromagnética, como são, por exemplo, as ondas de rádio. Como essas ondas vibram perpendicularmente à direção em que se propagam, eu fico no time do senhor Young.

Nesse momento entram Einstein e o produtor do programa.

Entrevistador – Senhor Einstein, estávamos à sua espera. Gostaríamos de contar com sua participação nos debates.

Einstein – Desculpem-me, mas não resisti. Ao chegar aqui, num tempo que para mim é o futuro, quis ver as coisas que tinham sido produzidas da minha época para cá. Acabei vendo quase toda a discussão pela TV. Quando vi o depoimento do senhor Galileu, imaginei: "Se ele fez tudo aquilo com a cabeça e o coração, imagine se ele tivesse um computador!" Na realidade, até eu fiquei com um pouco de inveja.

Agora eu gostaria de dar o meu depoimento. Talvez os ânimos fiquem menos exaltados.

Na minha época era conhecido o fato de que, quando a luz incide em determinados metais, ela é capaz de arrancar elétrons desses metais. Chamamos esse fenômeno de **efeito fotoelétrico**. Uma coisa que me intrigava era que a energia com a qual os elétrons saíam não dependia da quantidade de luz que caía sobre a placa de metal. Assim, uma lâmpada vermelha muito intensa poderia não conseguir arrancar elétrons do metal, enquanto que uma luz violeta, de baixa intensidade, conseguia. O ponto crucial era, então, o comprimento de onda.

Resolvi então usar o mesmo raciocínio que meu colega Planck tinha usado: o fato de que a energia se manifesta apenas em quantidades que são sempre um múltiplo de uma certa quantidade muito pequena, um pacotinho de energia. Eu resolvi então usar o mesmo raciocínio para o efeito fotoelétrico e consegui resolver o problema. A energia luminosa também vem em pequenas porções, em pequeno pacotes, os chamados **quantum** de energia. E quem carrega essa energia é uma **partícula** que chamamos de **fóton**.

Mais uma vez os participantes querem se manifestar todos ao mesmo tempo. Newton está radiante com o fato de a luz poder ser uma partícula. Para controlar a situação, o entrevistador intervém.

Entrevistador – Meus caros, vamos deixar o professor acabar sua intervenção. O senhor está afirmando então que, apesar de todas as evidências de que a luz é uma onda, como os fenômenos de interferência etc., a luz é uma partícula?

Einstein – Na realidade, a luz se comporta ora como, partícula ora como onda. Talvez seja essa dupla natureza da luz o que fez com que as discussões hoje fossem tão acaloradas. **Partícula e onda**. Eis o que é a luz!

Entrevistador – Bem, eu gostaria de agradecer a todos participantes por esse debate, que nos mostrou que as explicações na Ciência não são eternas e que discussões como as de hoje podem nos auxiliar a entender a Natureza. Obrigado.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- inicialmente pensava-se que a luz fosse uma partícula;
- mais tarde, a luz foi interpretada como uma onda;
- nos dias de hoje admite-se que a luz tanto pode assumir um caráter ondulatório como pode ser considerada uma onda.
- Mas você aprendeu, principalmente, que as idéias na Ciência são mutáveis, e que não existem certezas eternas.

Exercício 1

Galileu afirmou que usou as batidas do coração para tentar medir a velocidade da luz. Sabendo-se que a luz tem uma velocidade de 300.000 km/s e supondo que o coração de Galileu batesse com uma freqüência de 72 batidas por minuto, qual a distância que a luz percorreria entre duas batidas?

Exercício 2

Newton estava equivocado quanto à velocidade da luz nos meios que eram chamados "mais densos". Atualmente, sabemos que o índice de refração de um meio com relação a outro é a razão das velocidades da luz nesses dois meios. Assim, o índice de refração da água com relação ao ar é definido por:

$$n_{\text{água}} = \frac{\text{velocidade da luz no ar}}{\text{velocidade da luz na água}}$$

Ora, se para Newton a velocidade da luz no ar era menor do que a velocidade da luz na água, o índice de refração da água com relação ao ar era menor que 1. Isso significaria que um raio de luz, ao passar do ar para a água, iria se afastar da normal, o que é experimentalmente incorreto. Será que Newton desconhecia esse fato?

AULA

36

Ô, raios!

PARA COMEÇAR

Fazia tempo que não chovia. O ar estava seco. Maristela passava um pente de plástico no cabelo enquanto era observada por Ernesto.

- Olha como o cabelo é atraído pelo pente! Parece que quem faz isso é a eletricidade!

- É verdade. Eu já vi isso na Estação Ciência. Era verdadeiramente um experimento de arrepiar os cabelos. Uma pessoa estava em cima de um banquinho, ligada a uma máquina que produzia eletricidade. À medida que ela ia recebendo eletricidade, seus cabelos ficavam cada vez mais arrepiados. Além disso, a máquina era capaz de produzir faíscas enormes. Pareciam até relâmpagos!

Fique ligado

O início da eletricidade

A eletricidade está presente na vida cotidiana de todos nós: em lâmpadas, rádios, TV, motores e muitas outras coisas. Mas nós não conseguimos ver nem ouvir a eletricidade propriamente dita. É claro que vemos a luz de uma lâmpada que foi gerada pela eletricidade. O mesmo acontece com o som de um rádio ou televisão; quem isso tudo é a eletricidade. Mas nossos conhecimentos sobre a eletricidade foram, durante muito tempo, muito reduzidos.

> O âmbar é uma espécie de resina produzida por árvores há milhões de anos. Depois da morte da árvore, e com o passar do tempo, essa resina transforma-se numa pedra amarelada que recebe o nome de âmbar. Algumas vezes, um inseto aprisionado na resina solidificava-se junto com o âmbar. Esse é mais um atrativo para o estudo dessas pedras.

Há cerca de 2.500 anos, o filósofo grego Tales observou que, quando atritava um pedaço de âmbar num pedaço de couro macio, o âmbar era capaz de atrair objetos leves, como penas ou pedaços de palha.

Talvez Tales estivesse preocupado apenas em polir o âmbar para melhor observar um inseto no seu interior, ou para torná-lo mais brilhante. Porém, quando o âmbar foi atritado, adquiriu outra característica, além do brilho. Ele tornou-se capaz de atrair pequenos objetos. Ele adquiriu **eletricidade**! O nome eletricidade vem dessa época, pois **elétron** era, exatamente, o nome do âmbar em grego antigo.

Âmbar e ímãs

O âmbar reinou sozinho durante quase 2.000 anos como a única substância conhecida que, quando atritada, era capaz de atrair pequenos objetos.

O versorium de Gilbert

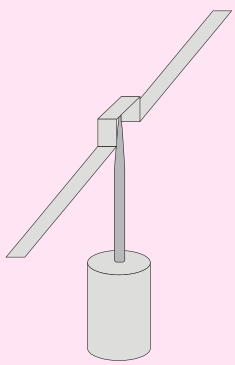


Figura 1

Gilbert construiu seu aparelho usando os mesmos princípios utilizados numa bússola.
Esse aparelho era feito com uma haste metálica muito leve, cuja parte central era apoiada numa espécie de alfinete pontiagudo. A haste tinha a forma de uma flecha, para que se soubesse em que direção ela apontava. Daí o nome versorium de Gilbert. **Versorium** é uma palavra latina que indica direção.
Você pode construir um versorium de Gilbert usando uma tira de lata de refrigerante ou de cerveja. A tira é dobrada, como mostra a figura, e equilibrada num alfinete espetado numa rolha. O alfinete deve ser cortado antes e sua ponta deve estar para fora da rolha.

Em 1600, o inglês **William Gilbert** estava interessado em estudar problemas relacionados ao magnetismo de certos materiais, ao magnetismo terrestre e coisas semelhantes. Gilbert notou que o comportamento do âmbar atraindo pequenos objetos era parecido com o de um ímã, atraindo pequenos pedaços de ferro. Como Gilbert já tinha usado bússolas para estudar o comportamento dos ímãs, construiu um aparelho que parecia uma bússola, mas cuja agulha não era feita de material magnético. Dessa maneira, quando ele passava um ímã perto de seu aparelho, chamado de versorium, a agulha não era atraída pelo mesmo. Com esse aparelho, Gilbert passou a estudar outras substâncias e descobriu que muitas comportavam-se como o âmbar. Quando atritadas com um pedaço de couro macio, eram capazes de atrair a agulha do aparelho.

Gilbert descobriu assim, muitos materiais eletrizáveis, isto é, capazes de adquirir eletricidade quando atritados. “Da mesma maneira que acontece com o âmbar”, segundo as palavras de Gilbert.

Então, apesar de existirem semelhanças até quanto ao instrumento usado nas análises de Gilbert, as atrações magnéticas e elétricas eram diferentes. Um ímã não atrai a agulha de um versórium, mas atrai a agulha de uma bússola. Um corpo eletrizado atrai as duas agulhas. Explicar o comportamento dos corpos eletrizados é o objetivo principal desta aula.

Hoje em dia temos uma quantidade enorme de substâncias que podem ser eletrizadas quando atritadas com outras. Os plásticos são os melhores representantes disso. O pente usado por Maristela, atraindo seus cabelos, pode bem servir de exemplo. A atração do cabelo pelo pente é um fenômeno elétrico. Se aproximássemos um ímã do cabelo de Maristela, o ímã não iria, é claro, atrair o cabelo de Maristela. Essa atração não é magnética.

Atração e repulsão

Para estudar um pouco mais o comportamento dos corpos eletrizados, ou seja, para entrar na parte da **eletrostática** propriamente dita, vamos construir um pequeno aparelho que vai nos esclarecer bastante. Para isso você vai necessitar de material muito semelhante ao que é utilizado na construção de um versorium de Gilbert: uma rolha, um alfinete e canudos de refresco, além de um pedaço de isopor, um saco plástico (de lixo) e papel higiênico.

Espete o alfinete na rolha, deixando a ponta dele para fora. Dobre o canudo de refresco na metade e tente equilibrá-lo na ponta do alfinete, como aparece na Figura 2. Para isso, o canudo deve ser um pouco amassado. Se o canudo ficar batendo na superfície de apoio, coloque tudo sobre uma pequena caixa ou um suporte qualquer.

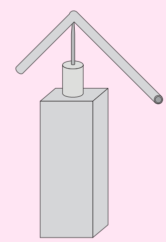


Figura 2

Retire o canudo de sua posição e atrite uma de suas extremidades com o papel higiênico. Para isso, proceda da seguinte maneira: segure o canudo, envolva-o com o papel, aperte firmemente o papel e puxe. Veja que, quando você aproxima o dedo do canudo, o canudo parece atraído pelo dedo. Se, agora, você atritar outro canudo com o papel higiênico e aproximá-lo do canudo suspenso, ele será repelido. Conclusão: os corpos carregados eletricamente podem atrair um corpo neutro ou ser repelidos por outros carregados.

Atrite agora o pedaço de isopor com papel higiênico e, em seguida, aproxime o isopor do canudo. Você vai notar que o canudo é atraído. Se você tivesse atritado o isopor no saco plástico, o isopor iria repelir o canudo. Ou seja: os materiais, quando atritados uns com os outros, podem se comportar de duas maneiras diferentes, atraindo-se ou repelindo-se.

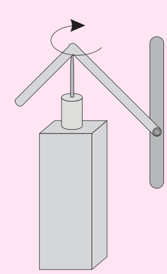


Figura 3

Quando os dois materiais estão se repelindo, diremos que durante o atrito eles adquiriram **cargas elétricas** iguais. Se eles se atraem, diremos que adquiriram cargas elétricas opostas. Essas cargas opostas são denominadas positivas e negativas. Assim, podemos dizer que dois objetos que tiverem cargas de mesmo sinal se repelem e, se tiverem cargas de sinal contrário, se atraem.

Para que o homem pudesse compreender melhor esse processo, foi necessário descobrir do que é feita a própria matéria. Hoje sabemos que todos corpos são constituídos por átomos, e que os átomos são constituídos por partículas menores: os prótons, elétrons e nêutrons.

Os prótons possuem carga elétrica positiva; os elétrons possuem carga negativa e os nêutrons, como o próprio nome indica, são desprovidos de carga elétrica. Os prótons e nêutrons ocupam a parte central do átomo - o núcleo. Os elétrons orbitam ao redor do núcleo. O número de prótons e de elétrons em um átomo em estado normal é o mesmo. Quando atritamos um canudo de refresco com o papel, estamos transferindo cargas elétricas de um para outro. As cargas de mais mobilidade no átomo, os elétrons, são as que são deslocadas durante o processo. Assim, quando o canudo é atritado com o papel, uma certa quantidade de elétrons passa do papel para o canudo. O canudo fica, dessa maneira, com excesso de cargas negativas. Ele fica carregado negativamente.

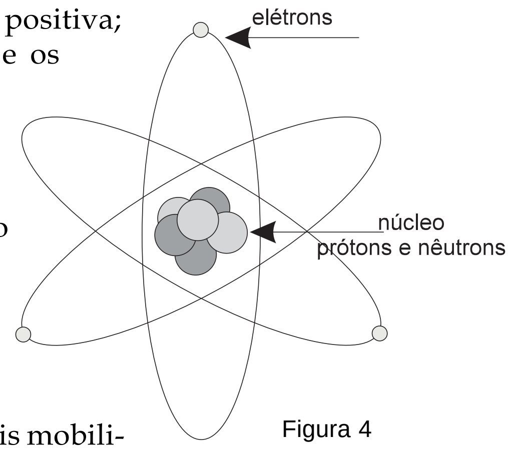


Figura 4

O papel, por ter perdido esses elétrons, fica carregado positivamente durante certo tempo. Dizemos "durante certo tempo" porque os corpos carregados vão acabar atraindo cargas de sinal oposto às cargas que têm em excesso, voltando a ser neutros.

O ar, os objetos que nos rodeiam e a Terra, principalmente, são os responsáveis pelo fornecimento dos elétrons de que os corpos carregados positivamente necessitam. Para esses lugares também vão os elétrons dos corpos que estão carregados negativamente.

Maneiras de carregar eletricamente um corpo

Carregando por contato

Já vimos que é possível carregar um canudo de refresco atritando-o com papel higiênico. Mas, se segurássemos um pedaço de metal para atritá-lo com outro material, com o objetivo de carregar eletricamente esse metal, seríamos mal-sucedidos. Isso porque os seres humanos e os metais são **bons condutores** de eletricidade, isto é, as cargas elétricas passam facilmente por nosso corpo e pelos metais. Assim, mesmo que conseguíssemos arrancar alguns elétrons durante o processo, essas cargas seriam neutralizadas quase imediatamente. Elas acabariam indo para a Terra.

Alguns materiais, como o papel, conduzem a eletricidade em certas condições, quando o ar não está muito seco, por exemplo. Como veremos pouco mais adiante, as voltagens envolvidas em alguns experimentos simples que descreveremos são bastante elevadas. Mas, apesar disso, não existe perigo algum em realizar as atividades propostas.

Existem também os corpos que não permitem que as cargas elétricas passem facilmente através deles. São os maus condutores ou **isolantes**. O canudo de refresco é um bom isolante.

Mas, será que conseguiríamos carregar uma folha de metal? A resposta é afirmativa. Vamos fazer um experimento que demonstra como isso pode ser conseguido. Como não podemos segurar o metal, pois as cargas acabariam indo para Terra, devemos segurar o metal com um isolante.

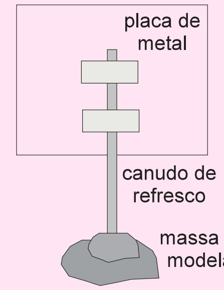


Figura 5

A Figura 5 mostra o material de que precisamos. Um pedaço de metal (uma tampa de lata ou um pedaço de papel de alumínio) é colado num canudo de refresco. O conjunto é suportado por massinha de modelar (ou pode ser espetado numa batata).

Agora podemos carregar um canudo de refresco por atrito com papel e passar esse canudo, várias vezes, sobre a parte metálica. Algumas cargas do canudo vão passar para a placa metálica. A placa vai ficar com a mesma carga que o canudo. Podemos verificar isso usando o nosso versorium feito com canudo. Se carregarmos o canudo do versorium atritando-o com papel e, em seguida, aproximarmos a placa carregada, veremos que o canudo é repelido.

Para carregar a placa foi necessário tocá-la com o canudo. Por isso, esse método é denominado **carregar por contato**.

Carregando por indução

Se a carga de um canudo de refresco atritado com um papel higiênico é negativa, quando carregamos por contato a placa metálica, a carga obtida é também negativa. Mas existe uma maneira de carregar positivamente a mesma placa, com o mesmo canudo. É o que chamamos de **carregar por indução**.

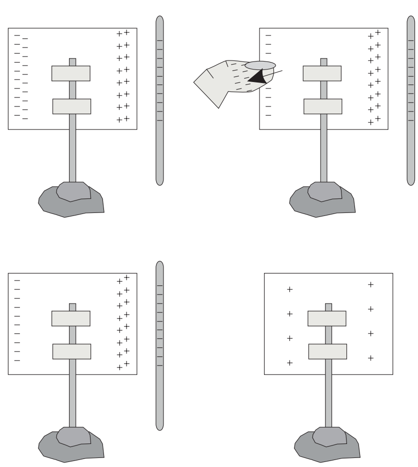


Figura 6

Observe a seqüência da Figura 6. De início temos a placa metálica que está eletricamente neutra; o canudo, carregado negativamente, está próximo da placa. Ora, o canudo vai repelir os elétrons para o lado oposto. Assim, na placa, perto do canudo, teremos cargas positivas. Do lado oposto, cargas negativas. No total, porém, temos o mesmo número de cargas positivas e negativas dentro da placa. Ela está, globalmente, neutra. Se retirarmos o canudo de sua posição, tudo volta a ser como era antes: placa neutra.

Veja agora o que se passa na segunda figura. Encostamos um dedo na placa e aproximamos o canudo carregado negativamente. As cargas negativas do canudo repelem as cargas negativas da placa; algumas das cargas negativas passam para o dedo. Quando retiramos o dedo, aquelas cargas que tinham penetrado nele não podem mais voltar. Finalmente, quando o canudo é retirado, vão ficar espalhadas pela placa algumas cargas positivas. Esse processo chama-se **carregar por indução**. Note que quando carregamos um corpo por indução usando um objeto carregado negativamente, o corpo vai ficar carregado positivamente, e vice-versa.

Como um corpo carregado atrai um corpo descarregado

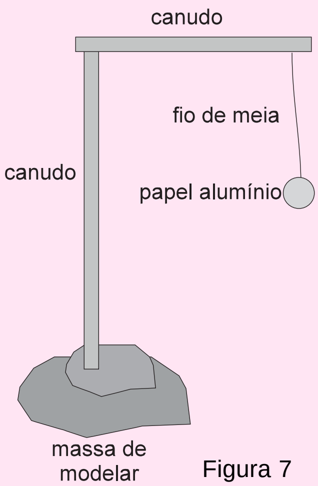


Figura 7

Vamos construir mais um dispositivo que vai nos permitir entender melhor o nosso assunto. Para isso precisamos de três canudos de refresco, um pouco de massinha de modelar, fio de meia de nylon, fita adesiva, um pedaço de papel de alumínio, cola branca e papel higiênico. Com isso construiremos o aparelho semelhante ao que está na Figura 7.

Inicialmente recortamos um pequeno disco de papel de alumínio e o colamos no fio de meia. Em seguida, a outra extremidade do fio é colada num canudo. Unimos os dois canudos com fita adesiva e espetamos o conjunto num pedaço de massa de modelar (ou numa batata, como já dissemos). Esse dispositivo é denominado **pêndulo eletrostático**.

Se agora atritarmos o canudo com o papel higiênico e o aproximarmos do disco do pêndulo eletrostático, o disco, mesmo estando neutro, vai ser atraído pelo canudo. Isto acontece porque, como vimos, as cargas se separam quando aproximamos um canudo carregado de um pedaço de metal. O que vai acontecer? Existem cargas que empurram o pêndulo na direção do canudo e um mesmo número de cargas que o empurram na direção contrária. Quem vai vencer? Como as cargas positivas do pêndulo estão mais perto do canudo, elas serão atraídas com mais força. Então, todo o pêndulo vai se mover na direção do canudo. Ver Figura 8.

O que vai acontecer depois disso? O disco atraído pelo canudo toca o canudo e recebe uma carga igual à dele (ele é carregado por contato). Agora, os dois estão com a mesma carga e vão se repelir.

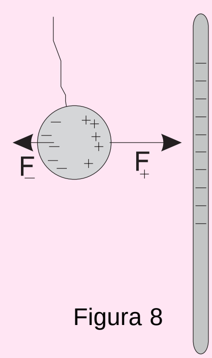


Figura 8

Em todos os métodos de carregar eletricamente um corpo que descrevemos, as cargas, depois de serem transferidas de um corpo para outro, permanecem dentro desse corpo e não se movimentam para outros lugares. Por isso chamamos de **eletrostática** esta parte da eletricidade.

O eletroscópio - um aparelho para detectar cargas elétricas

Para saber se um corpo está carregado eletricamente ou não, podemos usar os mais diversos aparelhos. Mesmo um pêndulo serviria para saber se um corpo está ou não carregado. Todavia, o mais aparelho mais conhecido é o eletroscópio de folha. Antigamente ele era chamado de eletroscópio de folhas de ouro, metal utilizado em sua confecção.

Para construir o eletroscópio precisamos de um pedaço de cartão, canudos de refresco, massa de modelar, uma tirinha de papel de bala (do tipo usado para embrulhar balas de coco em aniversários), cola e fita adesiva.

Recorta-se um retângulo de cartão de 2,5 cm por 11 cm aproximadamente. Em seguida recorta-se, do mesmo cartão, um círculo de uns 4 cm de diâmetro. Esse círculo é colado, com fita adesiva, numa das extremidades do retângulo. Ver Figura 9.

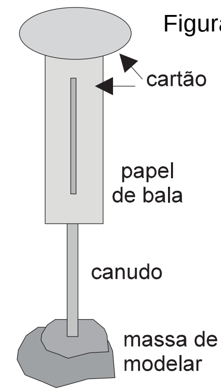


Figura 9

Depois cola-se uma tirinha de papel de bala na parte superior do retângulo. A fita deve ser colada apenas por sua parte superior.

A parte inferior da fita deve poder se mover livremente. Todo esse conjunto é colado com fita adesiva num canudo de refresco.

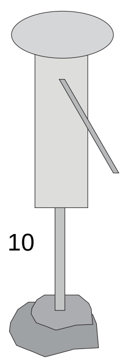


Figura 10

O eletroscópio pode, agora, ser usado. Inicialmente vamos carregá-lo por contato. Para isso, basta carregar um canudo por atrito e passá-lo no disco do eletroscópio. Todo o eletroscópio adquire a carga do canudo e, como a tirinha de papel tem a mesma carga do cartão, ela é repelida. Ela vai ficar como está representado na Figura 10.

Como o eletroscópio foi carregado por contato com o canudo, ele vai ficar negativo. Todas as suas partes estarão negativas. Assim, se aproximarmos um objeto carregado positivamente da lingüeta do eletroscópio, ela será atraída. Se o corpo tiver cargas negativas, a lingüeta será repelida.

O eletroscópio pode ser também carregado por indução, com auxílio do mesmo canudo. Para isso, basta aproximar o canudo do disco do eletroscópio e tocar, com o dedo, qualquer parte do eletroscópio. Em seguida, é preciso retirar o dedo e, depois, afastar o canudo. O eletroscópio carrega-se, dessa maneira, positivamente. Os testes da carga de outros objetos pode ser feitos de maneira análoga à anterior.

O eletroscópio serve também para testar se determinado material é isolante ou condutor. Para isso, basta carregá-lo por contato ou por indução. A lingüeta se abre. Em seguida, seguramos o material que queremos testar e tocamos o eletroscópio com ele. Se o objeto for um bom isolante, a lingüeta permanecerá aberta. Se o material for um bom condutor, ela se fechará imediatamente.

Uma outra utilidade do eletroscópio é mostrar que os corpos podem ser carregados por meio de uma descarga elétrica. Para isso, prendemos um alfinete no disco do eletroscópio com uma fita adesiva, como aparece na Figura 11.

Carregamos então, por atrito, um canudo de refresco. Passamos o canudo perto da ponta do alfinete, mas sem tocá-lo. Podemos observar que a lingüeta do eletroscópio vai se abrir e permanecer aberta, mostrando que houve uma passagem de cargas entre o canudo e o eletroscópio.

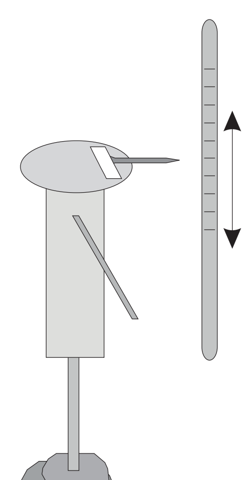


Figura 11

PARA TERMINAR

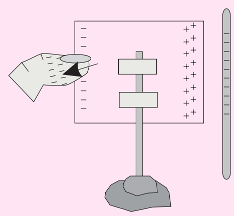
Nesta aula você aprendeu:

- como os antigos interpretavam os fenômenos elétricos e a relação desses fenômenos com os fenômenos magnéticos;
- como carregar eletricamente um objeto;
- como construir um pêndulo eletrostático e um eletroscópio.

Mãos à obra

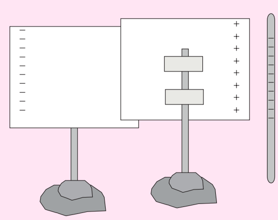
Exercício 1

Uma placa metálica está descarregada (ver figura abaixo). Aproximamos dela um canudo carregado negativamente. Tocamos a placa com o dedo. Retiramos o canudo. O que vai acontecer?



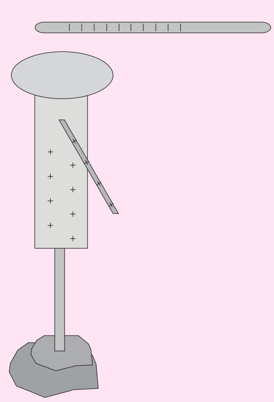
Exercício 2

Duas placas metálicas descarregadas estão encostadas, como mostra a figura. Aproximamos delas um canudo carregado negativamente e, sem retirar o canudo, afastamos uma placa da outra. Após a retirada do canudo, como ficarão as placas?



Exercício 3

Um eletroscópio está carregado positivamente. Então, a lingüeta dele está aberta. Se aproximarmos um canudo carregado negativamente do disco do eletroscópio, o que vai acontecer com a lingüeta do eletroscópio?



AULA

37

Atração fatal

PARA COMEÇAR

Ernesto atritou um canudo de refresco com um pedaço de papel higiênico. Depois colocou o canudo contra uma parede, enquanto Roberto observava.

– Olha como ele fica grudado!

– É a força eletrostática. As cargas do canudo fazem aparecer, na parede, cargas contrárias. É o fenômeno da indução – diz Roberto.

– Ainda não estou entendendo.

Roberto faz um desenho (Figura 1) enquanto fala:

– As cargas negativas do canudo empurram as cargas negativas da parede. Então, na parede, perto do canudo, vão ficar cargas positivas. Essas cargas positivas da parede atraem as cargas negativas do canudo. Então, o canudo é atraído pela parede e fica grudado nela.

– Como se fosse um ímã?

– Como se fosse um ímã. Mas não é um ímã. Nem a parede nem o canudo estão imantados. Eles estão eletrizados. Essas forças elétricas, as forças magnéticas e a força gravitacional são parecidas, mas são forças diferentes.

– É, mas nesse caso só a parede está puxando. Como o canudo não pode entrar na parede, fica grudado nela. Certo? Mas, e se duas coisas estivessem puxando o canudo? Para onde ele iria?

– Para responder a isso podemos montar um aparelhinho parecido com o pêndulo eletrostático.

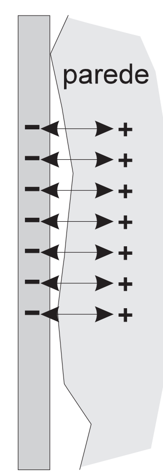


Figura 1

Fique ligado

A força elétrica como um vetor

Um pêndulo eletrostático modificado pode nos dar uma boa idéia do que é a força eletrostática. Se no lugar do disco de papel de alumínio colocarmos uma flecha de papel, como aparece na Figura 2, já teremos o que necessitamos.

A flecha é feita de papel comum – que, como vimos, comporta-se como um condutor. Na sua extremidade existe um pedaço de canudo que serve como contrapeso e também para segurar a flecha quando quisermos carregá-la por indução.

Vamos agora carregar a flecha por indução. Para isso, seguramos a flecha com dois dedos (Figura 3), tocamos o papel com outro dedo e aproximamos o canudo. Em seguida, retiramos o dedo e o canudo. Lembre-se, isso deve ser feito exatamente nessa ordem: primeiro o dedo, depois o canudo! Agora, se você aproximar o canudo da flecha, vai ver que a flecha segue o canudo, mostrando a direção da força. A flecha é atraída pelo canudo, pois está com carga contrária às cargas dele. Lembre-se: quando carregamos um objeto por indução usando um corpo carregado positivamente, o objeto vai ficar carregado negativamente e vice-versa.

Esse aparelhinho que mostra a direção da força pode ser chamado de vetor.

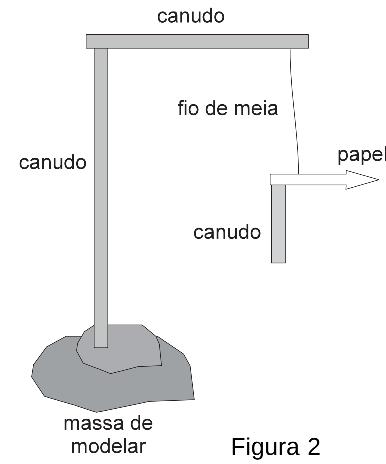


Figura 2

Agora estamos em condições de responder à questão de Ernesto. Vamos carregar o vetor mais uma vez, por indução, usando um canudo de refresco. Em seguida, colocamos o canudo em frente ao vetor. A flecha vai apontar o canudo, pois essa é a direção da força.

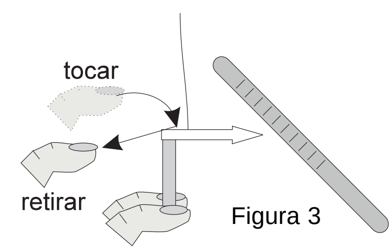


Figura 3

Vamos colocar mais um canudo carregado perto do vetor (ver Figura 4).

Temos, portanto, dois objetos atraindo a flecha. Para onde ela vai? Isso dependerá do canudo que estiver mais carregado. Mas, de qualquer maneira, as duas forças se somam e a flecha aponta para a direção da resultante delas. Essa é uma maneira de mostrar que a força elétrica, como todas as forças, é um vetor. Ela tem um valor, uma direção e um sentido.

Mas não basta conhecer a direção da força elétrica que existe entre duas cargas. Precisamos saber qual é seu valor.

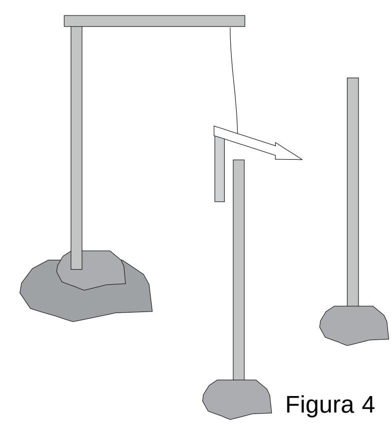


Figura 4

Quem descobriu como calcular a força que atua entre dois objetos carregados eletricamente foi Charles A. Coulomb, em 1784 – 85. Ele mostrou que tanto as forças magnéticas como as elétricas variavam "com o inverso do quadrado das distâncias", ou seja, obedeciam à leis que eram análogas à lei da gravitação de Newton. Para isso, Coulomb usou um aparelho semelhante ao que está apresentado na Figura 5.

Nesse figura estão representadas duas esferas carregadas positivamente. Uma delas é fixa, a esfera A, e a outra (B) está suspensa por um fio de quartzo. Quando a esfera A é aproximada da esfera B, esta é repelida e torce o fio, exercendo uma força sobre ele. Assim, se soubermos com que ângulo o fio girou, poderemos calcular a força que estava sendo aplicada no fio e, portanto, a força existente entre as duas esferas.

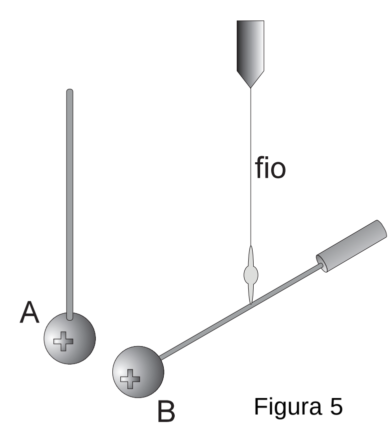


Figura 5

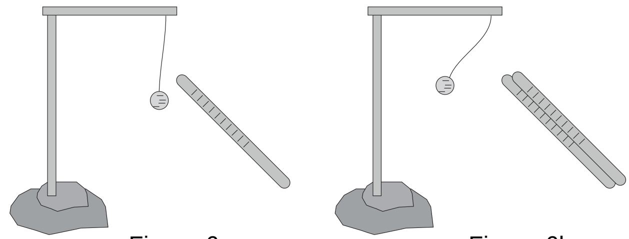


Figura 6a   Figura 6b

Se carregarmos um pêndulo elétrico por contato, usando um canudo, e, em seguida, aproximarmos o canudo do pêndulo, sabemos que o pêndulo vai ser repelido (Figura 6a). Se juntarmos ao primeiro canudo um novo canudo carregado da mesma maneira, veremos que o pêndulo vai ser repelido com mais intensidade (Figura 6b). Ou seja:

A força elétrica que existe entre dois corpos carregados eletricamente depende diretamente da quantidade de cargas de cada um deles.

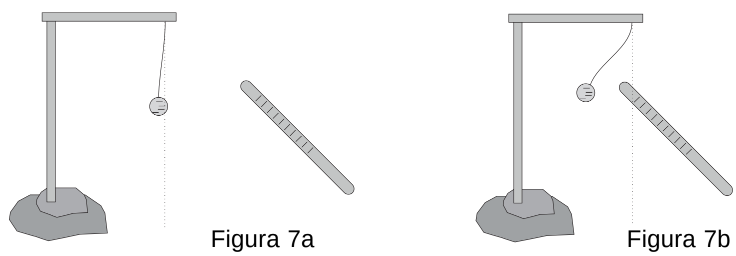


Figura 7a   Figura 7b

Quando aproximamos um canudo carregado de um pêndulo também carregado, veremos que, quanto **menor** for a distância entre o pêndulo e o canudo, **maior** vai ser a força (Figura 7). Ou seja: a força depende inversamente da distância. Na realidade, Coulomb mostrou que a força depende inversamente do quadrado da distância, isto é:

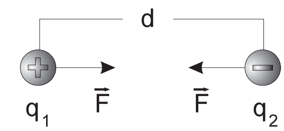
- se dividirmos a distância por 2, a força aumenta 4 vezes;
- se dividirmos a distância por 3, a força aumenta 9 vezes;
- se dividirmos a distância por 4, a força aumenta 16 vezes;

e assim por diante. Então, podemos dizer que:

A força elétrica que existe entre dois corpos carregados eletricamente depende inversamente do quadrado da distância que separa esses dois corpos.

Mas, como medir a quantidade de cargas que existe num corpo? A unidade de quantidade de cargas é o **coulomb**. Sabemos que um corpo está eletrizado quando ele tem excesso de elétrons ou deficiência de elétrons. Se um corpo tiver excesso ou falta de **$6{,}25 \cdot 10^{18}$ életrons**, sua carga será de 1 coulomb. Um coulomb é uma carga extraordinariamente grande. Para dar um exemplo, as cargas elétricas das nuvens durante tempestades, que são capazes de provocar faíscas elétricas formidáveis, são da ordem de uns 20 coulombs.

A representação matemática da lei de Coulomb



Vamos supor que tenhamos duas cargas eletricas q_1 e q_2 separadas por uma distância d. Vimos que a força eletrostática depende do valor de q_1, do valor de q_2 e do inverso do quadrado da distância entre essas cargas. Poderíamos escrever que o valor da força elétrica $\vec{F}$ é **proporcional** a essas grandezas, ou seja:

$$\boxed{F \propto \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}}$$

Essa é a maneira de dizer que existe uma proporcionalidade entre F e as outras grandezas. A relação acima seria lida da seguinte maneira:

A força elétrica (ou eletrostática) é proporcional aos valores das cargas e inversamente proporcional à distância entre elas.

Essa relação vale para qualquer meio no qual estejam colocadas as cargas. Se as cargas estivessem no vácuo, existiria uma constante de proporcionalidade, **k**, entre F e os outros valores. Se o meio fosse a água ou um outro material qualquer, o valor da constante seria diferente. Os cientistas fizeram inúmeras medições dessas constantes e constataram que, se as cargas estivessem no vácuo, a constante de proporcionalidade seria:

$$k = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Agora estamos em condições de escrever a relação que nos permite calcular a força elétrica entre duas cargas quando elas estiverem no vácuo:

$$F = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Esse valor será aproximadamente o mesmo se as cargas estiverem no ar.

Força elétrica e força gravitacional

A lei de Coulomb, que nos permite calcular a força que existe entre duas cargas, é bastante semelhante à lei da gravitação universal de Newton. A forca gravitacional, F_g entre duas massas M e m é dada por:

$$\boxed{F_g = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}}$$

Nessa relação, G, a constante da gravitação, vale $6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{N\,m^2}{kg^2}$

Note que as unidades de G são parecidas com as de k, a constante de proporcionalidade da lei de Coulomb.

– Matéria atrai matéria na razão direta das cargas e na razão inversa do quadrado da distância. Posso falar isso? – perguntou Ernesto.

– Na realidade é isso mesmo – respondeu Roberto.

– Mas a força elétrica é muito maior.

– Não estou entendendo! Como maior? Como podemos comparar?

– Deixe eu explicar melhor. Vamos calcular a força de atração elétrica e gravitacional entre dois corpos. Corpos que possuam, ao mesmo tempo, massa e carga. Quem pode servir bem para isso é um átomo de hidrogênio. Ele tem um elétron girando em torno de um próton. Tanto o próton como o elétron têm carga e massa. Então podemos comparar as duas forças. Para isso vamos precisar saber quanto valem a carga e a massa de cada um.

– Além da distância entre eles! – acrescentou Ernesto.

– É isso aí! Veja se você consegue esses valores no seu livro de Física. O valor das duas constantes a gente já sabe.

Depois de algum tempo, Ernesto volta satisfeito e mostra o que tinha copiado num papel.

massa do próton	=	$1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg
massa do elétron	=	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron = carga do próton	=	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
distância entre o elétron e o próton	=	$5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

– Bom, agora é fácil! Basta usar as duas leis: a de Newton para calcular a força gravitacional e a de Coulomb para calcular a força elétrica. As duas forças, nesse caso, são de atração. Aliás, essa é uma outra diferença entre as duas forças. A força gravitacional é sempre de atração, mas a força elétrica pode ser de repulsão. Vou calcular as duas forças! Vou chamar de F_g a força gravitacional e de F_e a força elétrica.

$$F_g = G \cdot \frac{m_{\text{próton}} \cdot m_{\text{elétron}}}{d^2} =$$

$$= \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} =$$

$$F_g = 3{,}7 \cdot 10^{-47}\ \text{N}$$

– A força elétrica vai ficar assim:

$$F_e = k \cdot \frac{Q_{\text{próton}} \cdot Q_{\text{elétron}}}{d^2} =$$

$$= \frac{9{,}0 \cdot 10^{9}\ \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} =$$

$$F_e = 8{,}2 \cdot 10^{-8}\ \text{N}$$

– Dividindo uma pela outra, teremos:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{8{,}2 \cdot 10^{-8}}{3{,}7 \cdot 10^{-47}} \cong 2 \cdot 10^{39}$$

– Mas e esse número meio maluco, o que é?

– Ele representa quantas vezes uma força é maior do que a outra. Ele é um número muito grande. Quando comparamos o tamanho do Universo com o tamanho de um átomo, o número obtido é menor.

Passo a passo

1. Duas cargas positivas de $2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C estão separadas por uma distância de 0,1m. Qual o valor da força elétrica que age em cada uma delas?

$$F = 9{,}0 \cdot 10^{9} \frac{2{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-7}}{(0{,}1)^{2}} = 0{,}036\text{N}$$

As cargas vão se repelir com uma força de 0,036 N.

2. Uma carga negativa de $8 \cdot 10^{-8}$C está a uma distância de $2 \cdot 10^{-3}$m de uma carga positiva cujo valor é $5 \cdot 10^{-10}$C. Qual o valor da força eletrostática que age em cada uma delas?

$$F = 9{,}0 \cdot 10^{9} \frac{8 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^{-10}}{(2 \cdot 10^{-3})^{2}} = 9 \cdot 10^{-2}\text{N}$$

Teremos então, entre as duas cargas, uma força atrativa de $9 \cdot 10^{-2}$N. Note que as duas cargas se atraem com forças iguais, apesar de as cargas de cada uma serem diferentes.

3. Três cargas elétricas positivas cujo valor é $4 \cdot 10^{-8}$C estão nos vértices de um triângulo equilátero de lado 3 cm (ver Figura 9). Qual o valor da força eletrostática que age em cada uma delas?

Cada uma das cargas exerce sobre a outra uma força igual. Então, bastará calcular uma das forças: as outras duas serão iguais. Vamos considerar a carga que está na parte superior da figura, a carga A. Ela vai ser repelida pelas duas cargas que estão na parte inferior e que agem sobre ela com as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. Essas duas forças somadas produzirão a força resultante $\vec{F}$ sobre a carga A. Nas cargas B e C vão aparecer forças com o mesmo valor de $\vec{F}$, e que podem ser calculadas de maneira análoga. Para calcular o valor da força $\vec{F}$ precisamos, antes, calcular os valores de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. O primeiro deles é o valor da força com que a carga que está em B empurra a carga que está em A. Então, como o valor de cada carga é $4 \cdot 10^{-8}$C e a distância entre elas é 3 cm, o valor da força $\vec{F}_1$ vai ser:

$$F_1 = 9 \cdot 10^{9} \frac{(4 \cdot 10^{-8})^{2}}{(3 \cdot 10^{-2})^{2}} = 1{,}6 \cdot 10^{-2}\text{C}$$

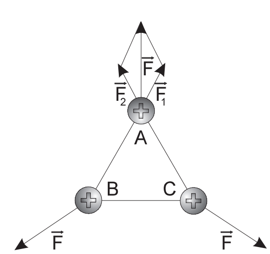


Figura 9

A força $\vec{F}_2$ é aquela que existe entre as cargas que estão nas posições A e C. Como os valores das cargas e das distâncias são exatamente os mesmos, o valor de $\vec{F}_2$ será o mesmo, ou seja:

$$F_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-2}\ C$$

Observando a figura, vemos que $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ formam entre si um ângulo de 60º. Então, para calcular a resultante entre essas duas forças, podemos usar a regra do paralelogramo, ou seja:

$$F_2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos 60^\circ$$

$$F_2 = (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-2}) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-2}) \cdot (0{,}5)$$

$$F_2 = (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2 + (1{,}6 \cdot 10^{-2})^2$$

$$F \cong 2{,}8 \cdot 10^{-2}\ N$$

Como a carga em cada um dos vértices é a mesma e o triângulo é equilátero, os valores das forças sobre as cargas nos outros vértices vão ser os mesmos.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

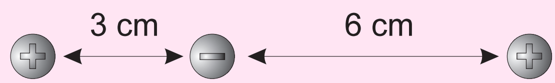
- a lei de Coulomb para cargas elétricas;
- a construir um dispositivo que nos permite visualizar o vetor força elétrica;
- quanto a força elétrica é maior do que a gravitacional.

Exercício 1

Uma carga positiva de $5 \cdot 10^{-10}$C está distante $4 \cdot 10^{-4}$m de uma outra carga, também positiva, cujo valor é $8 \cdot 10^{-10}$C. Qual vai ser a força entre elas?

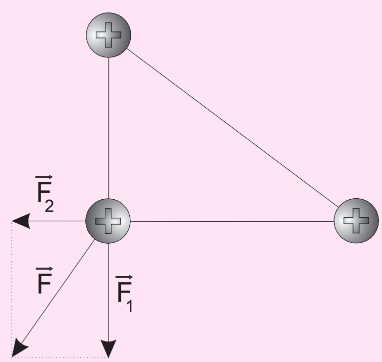
Exercício 2

Duas cargas positivas de $6 \cdot 10^{-10}$C estão separadas por uma distância de 9 cm. Na mesma reta que une as duas, e a 3 cm de uma delas, existe uma carga negativa cujo valor é $3 \cdot 10^{-10}$C. Qual a força resultante que vai agir em cada uma das cargas?



Exercício 3

Três cargas positivas de valor $6 \cdot 10^{-8}$C estão nos vértices de um triângulo retângulo cujos lados medem, respectivamente, 3 cm, 4 cm e 5 cm. Qual o valor da força elétrica que age sobre a carga que está sobre a aresta do ângulo de 90º?



AULA

38

Hoje estou elétrico!

PARA COMEÇAR

Ernesto, observado por Roberto, tinha acabado de construir um vetor com um pedaço de papel, um fio de meia, um canudo e um pedacinho de folha de alumínio. Enquanto testava o vetor para ver se estava ou não bem equilibrado, notava que, devido ao pouco peso do dispositivo, a flecha girava movida pelo vento, sem apontar uma direção fixa (Figura 1).

Em seguida, Ernesto carregou a flecha por indução, utilizando um canudo de refresco que tinha sido carregado por atrito com um pedaço de papel. Mesmo assim, o vetor ainda girava sem parar.

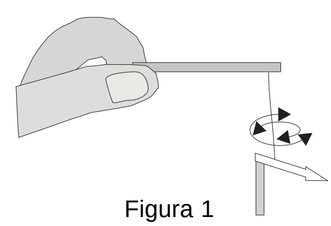


Figura 1

Ernesto então aproximou o canudo carregado da flecha, e esta apontou para o canudo. O vento que existia na sala não afetava mais a flecha. Ela balançava um pouco, mas continuava apontando para o canudo.

– Olha! Parece que a flecha percebeu que o canudo estava lá e passou a apontar na direção dele! (Figura 2)

Nesse instante chega Maristela, com um livro na mão. Ernesto repete mais uma vez o que tinha dito:

– Veja! A flecha **sabe** quando o canudo está pelas redondezas.

– É o **campo elétrico** – diz Maristela

– Campo elétrico?

– Sim! Quando você carrega o canudo, está criando, ao redor dele, um **campo elétrico**. Se você simplesmente olhar o canudo, não vai ver nada. Nada parece ter se modificado. Porém, se você usar um outro objeto carregado, a flecha, por exemplo, vai ver que ela é atraída pelo canudo. Veja o que diz este livro de Física sobre campo elétrico.

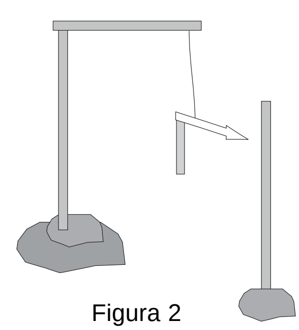


Figura 2

Sabemos que em certa região do espaço existe
um **campo elétrico** $\vec{E}$ se, quando colocarmos
uma carga de prova q nessa região,
notarmos que existe uma força elétrica $\vec{F}$ que age sobre q.
Em geral utiliza-se como carga de prova uma carga positiva.

– Foi o que você fez, Ernesto. Colocou a flecha, que era a carga de prova, e notou que ela era atraída pelo canudo. Então soube que naquela região, em volta do canudo, existia um campo elétrico.

– Então força elétrica e campo elétrico são a mesma coisa? A flecha não aponta na mesma direção da força?

– Quase. A direção e o sentido da força elétrica são os mesmos que o do campo elétrico, mas o valor do campo elétrico é diferente. Assim como a força, o campo elétrico é um vetor. Então podemos saber sua direção, seu sentido e seu valor.

Vetor campo elétrico

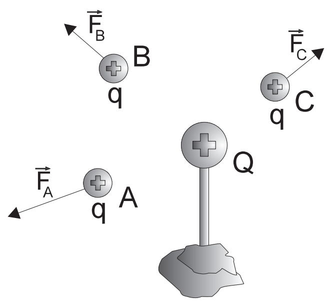


Figura 3

Vamos supor que tenhamos uma carga elétrica positiva Q e que ela esteja fixa, como mostra a Figura 3. Se colocarmos uma carga q em vários pontos diferentes, ao redor de Q vão aparecer forças elétricas $\vec{F}_A$, $\vec{F}_B$, $\vec{F}_C$ assim por diante. Veja a Figura 4. Nela colocamos, ao mesmo tempo, os vetores campo elétrico $\vec{E}$ e força elétrica $\vec{F}$. Ambos têm a mesma direção e o mesmo sentido. Porém, desenhados em mesma escala, esses vetores têm módulos diferentes. Seus valores são diferentes. O vetor campo elétrico tem as seguintes características:

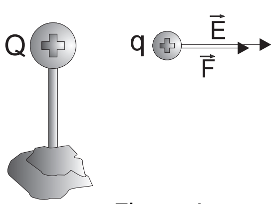


Figura 4

a) sua direção e sentido são os mesmos da força elétrica;

b) o valor de $\vec{E}$ é dado por $E = \dfrac{F}{q}$

onde F e q são, respectivamente, os valores da força elétrica e da carga de prova.

Já sabemos que forças são medidas em newtons (N) e cargas elétricas em coulombs (C). Logo, mediremos o campo elétrico em N/C.

Passo a passo

Um pêndulo elétrico carregado positivamente está diante de uma placa condutora também carregada positivamente. A carga do pêndulo é $5 \cdot 10^{-9}$C e, naquele ponto, o pêndulo está sendo repelido pela placa com uma força de $2 \cdot 10^{-5}$N. Qual o valor do campo da placa naquele ponto? Se retirássemos o pêndulo e colocássemos, no mesmo lugar, uma carga de $3 \cdot 10^{-9}$C, qual seria a força que agiria sobre essa carga?

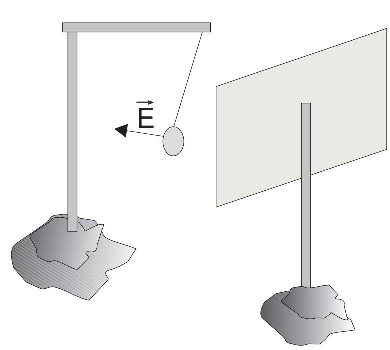


Figura 5

A placa carregada vai gerar um campo elétrico ao redor da mesma e o pêndulo vai servir de carga de prova. Dessa maneira, o campo, na posição onde está o pêndulo, será:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{2 \cdot 10^{-5}\,N}{5 \cdot 10^{-9}\,C} = 4 \cdot 10^{3}\,N\,/\,C$$

Com o valor do campo elétrico no ponto considerado, podemos achar o valor da força elétrica que age sobre qualquer carga colocada naquele ponto. Assim teremos:

$$F = E \cdot q$$

$$F = 4 \cdot 10^{3} N/C \cdot 3 \cdot 10^{-9} N/C = 1{,}2 \cdot 10^{-5} N$$

Campo gerado por um objeto carregado

Vamos considerar um objeto, de pequenas dimensões, carregado eletricamente. A relação E = F/q vale para qualquer objeto carregado: um canudo de refresco, uma placa etc. Essa relação independe, também, das dimensões do objeto carregado. Dessa maneira, podemos usá-la para calcular o campo gerado por um objeto de dimensões reduzidas. Vamos denominar esse objeto de **carga Q** (ver Figura 6).

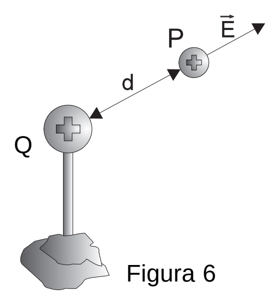


Figura 6

Se colocarmos uma carga de prova q num ponto P e a uma distância d da carga Q, a força elétrica entre essas duas cargas vai ser, como já vimos, dada pela lei de Coulomb. Seu valor vai ser:

$$\boxed{F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{d^2}}$$

Então, o campo elétrico gerado pela carga Q, no ponto P, vai ser dado por:

$$E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{Q \cdot q}{q \cdot d} = k \cdot \frac{Q}{d^2}$$

Pode-se notar que o valor de q é cancelado durante os cálculos. Então, podemos afirmar que:

O campo gerado por uma carga Q não depende do valor da carga de prova. O campo gerado pela carga Q depende do valor de Q e da distância da carga ao ponto considerado.

Campo gerado por vários objetos

– Já sei como calcular o campo de um objeto. Mas, e se eu tiver mais de um objeto? Como posso saber qual o valor do campo? – perguntou Ernesto a Maristela.

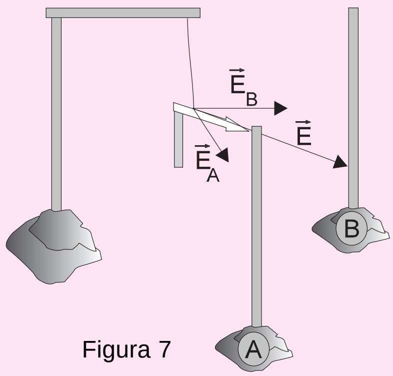


Figura 7

–Bem, se você usar o vetor, tudo vai ficar fácil de entender! Carregue o vetor por indução, usando um canudo de refresco carregado por atrito. Espete esse canudo num pedaço de massa de modelar (Figura 7). Aproxime o canudo do vetor. Ele vai apontar o canudo, dando a direção do campo de **um** canudo. Agora, carregue outro canudo também por atrito e coloque-o ao lado do primeiro. O vetor não vai apontar nem para um, nem para o outro. Ele vai dar a direção do campo resultante, gerado pelos dois canudos, naquele ponto.

O canudo A produz o campo $\vec{E}_A$. O canudo B produz o campo $\vec{E}_B$. Os dois, juntos, produzem o campo resultante $\vec{E}$. Para obter o valor do campo resultante, procedemos da mesma maneira empregada para obter a resultante de duas forças.

Passo a passo

Duas cargas de $2 \cdot 10^{-9}$C e positivas estão separadas por uma distância de 10cm. Qual o valor do campo elétrico num ponto que dista 10 cm de cada uma delas?

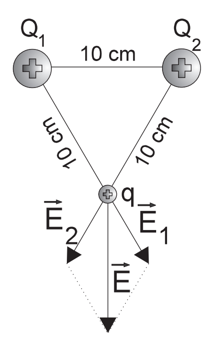


Figura 8

Em primeiro lugar, vamos calcular o valor de $\vec{E}_1$, campo gerado por uma das cargas (Q_1, por exemplo) num ponto que esteja a 10 cm (0,1 m) da mesma. Poderíamos imaginar que nesse ponto existe uma carga de prova q (ver Figura 8). Sabemos que o valor do campo não depende do valor da carga de prova Q. Ele depende apenas do valor de Q_1. Então, vamos ter:

$$E = k \cdot \frac{Q_1}{R} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9}}{(0,1)^2}$$

$$Q_1 = 1,8 \cdot 10^3 \text{N/C}$$

O campo gerado pela outra carga, no mesmo ponto, vai ter o mesmo valor, pois tanto o valor da carga como o da distância, são os mesmos. Por outro lado, esses dois campos formam entre si um ângulo de 60º. Dessa maneira, o campo resultante vai ser dado por:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos 60^o$$

$$E^2 = (1,8 \cdot 10^3)^2 + (1,8 \cdot 10^3)^2 + 2 \cdot (1,8 \cdot 10^3) \cdot (1,8 \cdot 10^3) \cdot 0,5$$

$$E^2 = 3 \cdot (1,8 \cdot 10^3)^2$$

$$E \cong 3,12 \cdot 10^3 \text{N/C}$$

Linhas de força

Existe uma maneira de representar o campo elétrico que nos dá a possibilidade de visualizar esse campo. Essa representação é feita com a utilização das **linhas de força** desse campo elétrico.

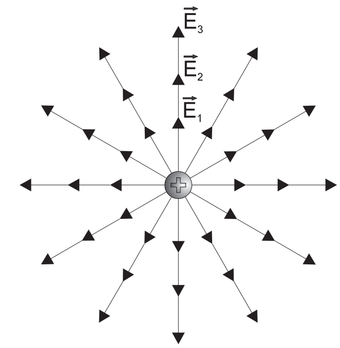


Figura 9

Vamos supor que tenhamos uma carga elétrica positiva Q. Em cada ponto das vizinhanças de Q representamos os vetores campo elétrico: $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ etc, como na Figura 9.

Esses vetores são tais que, se pudéssemos prolongar o segmento que representa cada um deles, todos passariam pela carga Q, como se fossem os raios de uma roda de bicicleta. O campo seria representado por uma figura semelhante à que aparece na Figura 10. Trata-se de um campo que chamamos de **radial**.

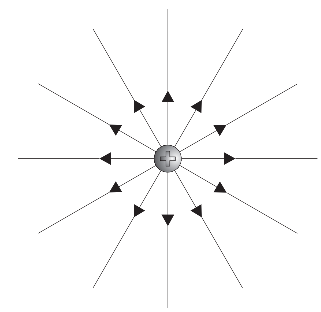


Figura 10

As linhas, providas de flechas e saindo da carga Q, nos informam a direção do campo em cada um dos pontos pelos quais elas passam. Essas linhas são chamadas **linhas de força ou linhas de campo**. Se, por outro lado, a carga Q fosse negativa, o campo ainda seria radial, porém as linhas de campo estariam dirigidas para a carga Q e não saindo dela. Ver Figura 11.

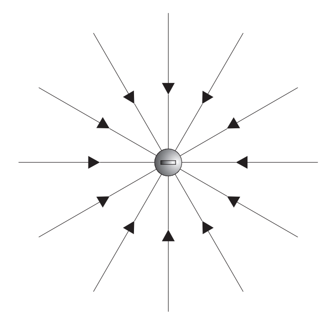


Figura 11

Nem sempre as linhas de campo são simples como as que descrevemos. Vamos supor que tenhamos duas cargas iguais, mas de sinais contrários. Vamos chamar essas cargas de Q_1 e Q_2. A esse conjunto de duas cargas iguais e de sinal contrário damos o nome de **dipolo**.

Como seriam as linhas de campo de um dipolo? Para isso, consideremos uma carga de prova q (positiva) e as duas cargas Q_1 e Q_2. A carga de prova vai ser atraída pela carga negativa e repelida pela carga positiva. Usando o conceito de campo, podemos dizer que tanto a carga positiva como a negativa vão produzir, no ponto P, um campo. Adicionando-se esses dois campos, teremos um campo resultante que é semelhante ao que está representado na Figura 12a. Se usarmos o mesmo procedimento, podemos obter o campo resultante para muitos pontos ao redor das duas cargas e construir as linhas de campo para o dipolo. A figura obtida seria parecida com a Figura 12b.

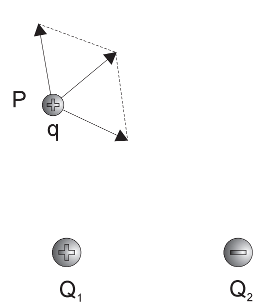


Figura 12a

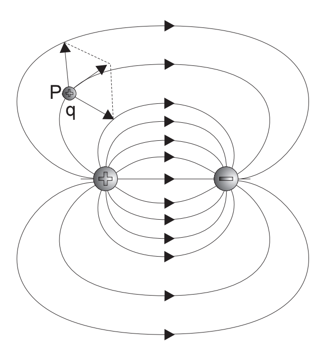


Figura 12b

Um outro conjunto de corpos carregados que é de grande interesse é aquele formado por duas placas planas carregadas com a mesma quantidade de cargas, porém com sinais opostos. Esse conjunto recebe o nome de **capacitor de placas paralelas**. Se colocarmos uma carga de prova q num ponto qualquer entre as duas placas do capacitor, ela vai ser atraída pela carga negativa e repelida pela carga positiva (Figura 13a). Ou seja, os campos de cada uma das placas vão agir no mesmo sentido, isto é: vão empurrar a carga de prova em direção à placa negativa. Assim, o campo resultante vai apontar essa direção e, portanto, as linhas de campo também (Figura 13b).

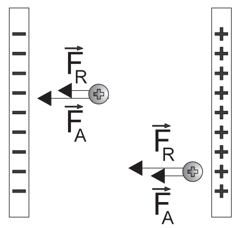


Figura 13a

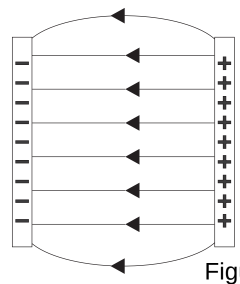


Figura 13b

Outro aspecto do campo de um capacitor é o seguinte: se colocarmos a carga de prova perto da placa positiva (Figura 13a), ela vai ser repelida por essa placa com grande força (podemos dizer também que o campo dessa placa, nesse ponto, é grande). Ao mesmo tempo, essa carga vai ser atraída pela placa negativa com uma força menor (podemos dizer também que o campo dessa placa nesse ponto é pequeno). Mas os dois campos estão no mesmo sentido: então, a carga de prova vai ser empurrada, na direção da placa negativa, por um campo que é a soma dos dois campos das duas placas.

Mas, se a carga de prova estiver perto da placa negativa (Figura 13a), ela vai ser atraída pela placa com uma força muito grande. Ao mesmo tempo, a carga de prova é repelida pela placa positiva por uma força pequena. Poderíamos ter dito que, naquele ponto, o campo da placa negativa é grande e o campo da placa positiva é pequeno. Mas, da mesma maneira que o caso anterior, os dois campos estão empurrando a carga de prova em direção à placa negativa.

O interessante é que, em ambos os casos, e quaisquer que sejam os pontos considerados, o valor do campo é o mesmo. Logo, entre as duas placas de um capacitor de placas paralelas o valor do campo é sempre o mesmo. Como, além de ter sempre o mesmo valor, o campo entre as placas tem sempre a mesma direção, dizemos que esse campo é **uniforme**. Note que, fora das placas, as linhas de campo não são mais perpendiculares às mesmas.

Um campo numa certa região do espaço é uniforme se, nessa região, sua direção, sentido e valor forem constantes.

Se colocarmos um corpo carregado entre as placas de um capacitor, seu deslocamento vai ser dirigido pelo campo elétrico desse capacitor. Além disso, esse corpo tem massa, e o campo gravitacional vai influir também. Todavia, para corpos como prótons e elétrons, podemos ter capacitores nos quais o campo elétrico é muitas e muitas vezes maior que o campo gravitacional. Dessa maneira, uma dessas partículas colocada entre as placas de tal capacitor vai seguir, praticamente, as linhas de campo do mesmo.

Passo a passo

O campo elétrico entre as placas de um capacitor vale $5 \cdot 10^4$ N/C. A distância entre as placas do capacitor é 5 cm. Se um elétron for lançado perpendicularmente às placas, com uma velocidade de $8 \cdot 10^6$ m/s, através de um furo que existe na placa negativa, com que velocidade vai atingir a outra placa? Quanto tempo o elétron gasta para atravessar o capacitor (Figura 14)?

Dados: massa do elétron $= 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

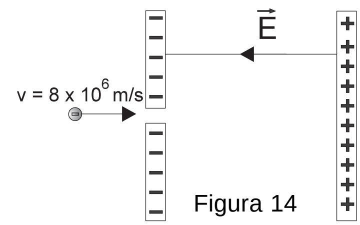


Figura 14

O elétron entra no capacitor e vai se movimentar no sentido contrário ao das linhas de campo, pois é uma carga negativa. Sobre o elétron vai agir uma força F dada por:

$$F = E \cdot q$$

onde E é o valor do campo elétrico entre as placas do capacitor e q é a carga do elétron.

$$F = 5 \cdot 10^4 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 8 \cdot 10^{-15}\ \text{N}$$

Como sabemos o valor da força e a massa do elétron, podemos calcular a aceleração a que ele está submetido. Como a força é constante, a aceleração também vai ser constante e o movimento será uniformemente variado.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8 \cdot 10^{-15}\,\text{N}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}} = 8{,}8 \cdot 10^{15}\ \text{N/kg} = 8{,}8 \cdot 10^{15}\ \text{m/s}^2$$

Sabendo a aceleração, podemos calcular a velocidade final do elétron utilizando a equação de Torricelli:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$$

onde **v** é a velocidade inicial do elétron, $\mathbf{v_0}$ é a velocidade final do elétron ao atingir a placa positiva, **a** é a aceleração do elétron e **Δd** é a distância entre as placas.

$$v^2 = (8 \cdot 10^6)^2 + 2 \cdot 8{,}8 \cdot 10^{15} \cdot 5 \cdot 10^{-2}$$
$$v^2 = 6{,}4 \cdot 10^{13} + 8{,}8 \cdot 10^{14}$$
$$v^2 = 9{,}4 \cdot 10^{14}$$
$$v = 3{,}1 \cdot 10^7\ \text{m/s}$$

Sabendo o valor da velocidade final do elétron e sua aceleração, podemos calcular o tempo gasto **t** para que ele percorra o espaço entre as placas. Como o movimento é uniformemente variado, teremos:

$$\mathbf{v = v_0 + a \cdot t}$$

onde **v** é a velocidade final, **a** é sua aceleração e $\mathbf{v_0}$ é a velocidade com que ele foi lançado entre as placas.

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{3{,}1 \cdot 10^7 - 8 \cdot 10^6}{8{,}8 \cdot 10^{15}} = 2{,}6 \cdot 10^{-9}\ \text{s}$$

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que é o campo elétrico;
- o que são linhas de campo;
- como é obtido o campo gerado por vários corpos carregados.

Mãos à obra

Exercício 1

Qual o campo gerado por uma carga negativa de $6 \cdot 10^{-8}$ C, a uma distância de 2 cm da mesma? A que distância da carga o valor desse campo reduz-se à metade?

Exercício 2

Duas cargas positivas cujos valores são $Q_1 = 3 \cdot 10^{-8}$ C e $Q^2 = 4 \cdot 10^{-8}$ C estão separadas por uma distância de 2 cm. Qual o valor do campo no ponto médio entre essas cargas? Em que ponto entre as duas o valor do campo é nulo?

Exercício 3

A distância entra as placas de um capacitor de placas paralelas é 1 cm. O campo no interior do mesmo vale $5 \cdot 10^{3}$ N/C. Se abandonarmos um elétron junto à placa negativa, quanto tempo ele levará para chegar à placa positiva? Qual o valor de sua energia cinética ao atingir a placa?

Dados: massa do elétron $= 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
carga do elétron $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

AULA

39

Alta voltagem

PARA COMEÇAR

Ernesto e Roberto estavam construindo alguns aparelhos para o estudo da eletrostática. Para isso, seguiam as descrições de um livro.

Ernesto tinha recortado um retângulo de papel de uns 10×25 cm. Em seguida prendeu duas tirinhas de papel de bala na parte central desse retângulo, uma de cada lado do papel. Depois, prendeu tudo em dois canudos de refresco fixados em massa de modelar (Figura 1). Isto feito, carregou o conjunto, por contato, com um canudo de refresco que tinha sido atritado com papel para ficar carregado. As duas tirinhas de papel, uma de cada lado da folha, afastaram-se, mostrando que nos dois lados da folha existiam cargas elétricas (Figura 2).

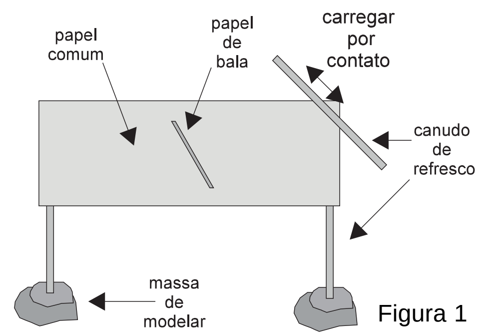


Figura 1

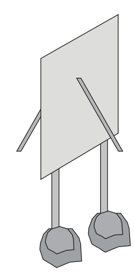


Figura 2

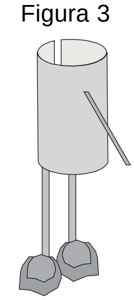


Figura 3

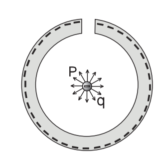


Figura 4

Ernesto então juntou os dois canudos de refresco, transformando a folha de papel numa superfície cilíndrica sem tocar no papel (Figura 3). Dessa maneira, uma das tirinhas de papel de bala ficou para fora do cilindro e a outra ficou na sua parte interna.

O que Ernesto observou foi que a tirinha externa abriu um pouco mais, enquanto a tira interna fechou. Parecia que dentro do cilindro de papel não existiam cargas elétricas. E era verdade. As cargas, num condutor (vimos que o papel pode ser um condutor), situam-se em sua parte externa. Para comprovar isso mais uma vez, Ernesto inverteu o modo de fechar o papel para formar o cilindro. Agora a tirinha que estava dentro ficou para fora e vice-versa. E o fato se repetiu. A tirinha interna permaneceu fechada e a externa abriu-se bastante.

As cargas estão todas localizadas na superfície externa do cilindro. Então, se considerarmos um ponto P dentro do cilindro (Figura 4), o campo gerado por essas cargas vai ser nulo. Isso porque, se colocarmos nesse ponto uma carga de prova positiva q, ela vai ser atraída igualmente por todos os lados. Dessa maneira, podemos fazer duas afirmações que são de grande importância:

1. Num condutor carregado, as cargas se localizam nas partes mais periféricas do mesmo.
2. O campo no interior de um condutor é nulo.

Como estão distribuidas as cargas na periferia de um condutor?

Fique ligado

Ernesto ainda estava intrigado com a maneira pela qual as cargas se distribuem num condutor.

– Veja! – disse a Roberto, repetindo o experimento que tinha realizado. – As cargas ficam sempre na parte externa do papel. Mas elas ficam sempre direitinhas?

– Como direitinhas? – perguntou Roberto.

– Sempre à mesma distância umas das outras.

– Isso vai depender do formato do corpo onde estão as cargas.

– Ainda não entendi!

Com a mão na massa

– Veja um experimento descrito aqui no livro. Ele mostra que nem sempre as cargas ficam separadas igualmente umas das outras. Vamos construir um igual!

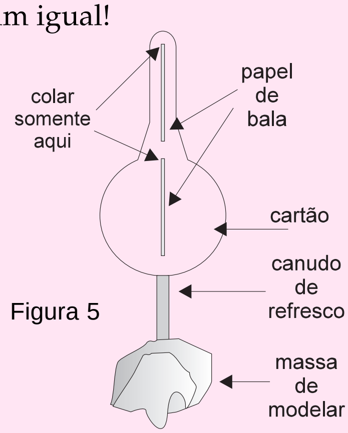


Figura 5

Roberto recortou, num pedaço de cartão, uma espécie de raquete com uns 15 cm de altura e 8 cm de largura. Em seguida, colou nessa figura duas tirinhas de papel de bala. Uma na parte superior, outra aproximadamente na metade da raquete. As tirinhas eram coladas apenas pela parte superior. Depois ele prendeu na parte posterior do cartão um canudo de refresco e espetou o conjunto num pedaço de massa de modelar. (Figura 5)

Em seguida, usando um canudo carregado por atrito, Roberto carregou o corpo da raquete por contato. Observou que a tirinha superior ficava mais aberta do que a tirinha que estava na posição inferior (Figura 6). Disse então para Ernesto:

– A tirinha de cima fica mais aberta que a de baixo porque lá temos mais cargas. Isso porque essa região é mais estreita que a região de baixo. As cargas vão se acumular nos lugares mais pontiagudos. Esse efeito é chamado **poder das pontas**.

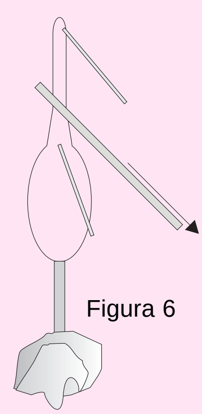


Figura 6

– Mas por que as cargas vão para as pontas e ficam espremidas lá, em lugar de se espalhar regularmente, de maneira uniforme? – perguntou Ernesto.

– Deixe eu tentar explicar. Vamos supor que eu tenha uma esfera ou um disco carregado. As cargas, nesse caso, estão espalhadas uniformemente. Veja este desenho que fiz. Uma carga q é empurrada por duas cargas vizinhas q_1 e q_2 com forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$. As forças são iguais porque as distâncias são iguais.

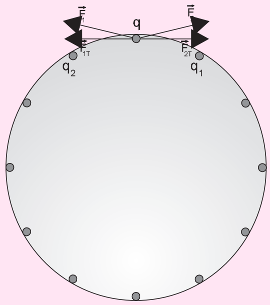


Figura 7

Essas forças tentam empurrar a carga q para os lados e para fora. Como a carga q não pode sair do corpo, seu movimento só pode existir para os lados. As componentes das forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ são, respectivamente, $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$, que são também iguais, pois $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ são iguais e q_1 e q_2 estão à mesma distância de q. Logo, a carga q não vai sair do lugar, pois está sendo empurrada por forças iguais, na mesma direção, porém com sentidos contrários. Como a carga não vai mudar de lugar, teremos sempre uma distribuição uniforme de cargas ao longo da periferia da esfera.

Veja agora o que acontece se o objeto tiver uma região mais pontiaguda (Figura 8). Vamos supor ainda que as cargas estejam ditribuidas uniformemente, isto é: mais uma vez a carga q equidista de q_1 e q_2. Teremos também as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, que ainda são iguais, e as forças $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$, que empurram q tangencialmente.

Acontece que, nesse caso, $\vec{F}_{2T}$ é maior que $\vec{F}_{1T}$, porque $\vec{F}_{2T}$ está praticamente na direção tangente. Então, $\vec{F}_{2T}$ é quase igual a $\vec{F}_2$, enquanto que $\vec{F}_{1T}$ é menor que $\vec{F}_1$. Dessa maneira, a carga q vai ser empurrada na direção de q_1 até que as duas componentes $\vec{F}_{1T}$ e $\vec{F}_{2T}$ se tornem iguais. Então, q ficará mais próxima de q_1 do que de q_2. Assim teremos um acúmulo de cargas nas regiões próximas à ponta do condutor. As cargas acumulam-se nas pontas. É por essa razão que os pára-raios são construídos em forma de pontas.

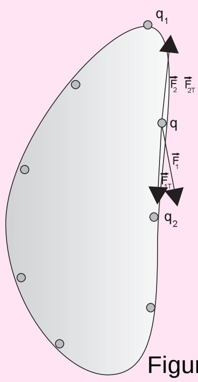


Figura 8

Para entender um pouco mais esse assunto e aprofundar o estudo da eletrostática, precisamos de novos conceitos: diferença de potencial, voltagem e outros.

Energia potencial elétrica

Estudando o movimento dos corpos quando abandonados à ação do campo gravitacional terrestre, vimos que, quando um objeto de massa m está a uma determinada altura h, ele possui uma energia potencial. Se esse objeto for largado daquela altura, vai ser atraído pela Terra por uma força constante. Ele adquire velocidade e, portanto, energia cinética (Figura 9).

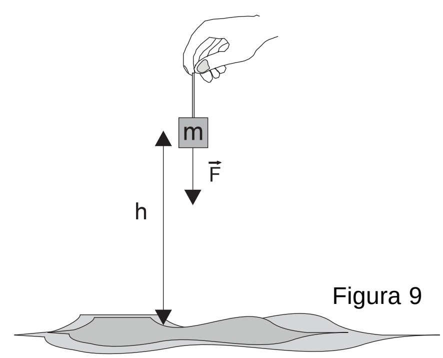


Figura 9

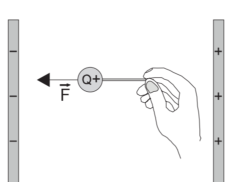


Figura 10

De maneira análoga, se uma carga está entre as placas de um capacitor, essa carga vai sofrer a ação de uma força constante que a empurra na direção de uma das placas. Assim a carga adquire velocidade e, portanto, energia cinética (Figura 10). Então, em cada ponto da região entre as placas de um capacitor, uma carga tem uma energia: uma **energia potencial elétrica**.

Vamos ver como é possível calcular a energia potencial elétrica de uma carga entre as placas de um capacitor por meio de uma comparação com o campo gravitacional. No caso de um objeto na Terra, podemos aumentar a energia potencial do objeto de massa m, elevando-o até uma altura maior. Assim, se ele for solto daquela posição, chegará à Terra com maior velocidade, isto é, com maior energia cinética. Para aumentar a energia potencial, ou seja, para aumentar a altura do objeto, precisamos realizar um trabalho. É possível fazer isso transportando o objeto a um nivel mais alto, sem acelerar esse objeto.

No caso de uma carga entre as placas de um capacitor, para aumentar sua energia potencial elétrica é preciso aumentar a distância entre essa carga e uma das placas do capacitor. Para isso, precisamos exercer uma força sobre essa carga e deslocá-la, ou seja, realizar um trabalho. Também nesse caso o movimento da carga durante o deslocamento deve ser uniforme. Quando executarmos esse trabalho, vamos permitir que a carga chegue à outra placa com maior velocidade. Estaremos aumentando, assim, sua energia potencial elétrica. O trabalho que foi exercido representa o aumento dessa energia.

Como o trabalho é medido pelo produto da força pelo deslocamento Δd, e a força pode ser representada pelo produto do valor do campo E pela carga q, a variação da energia potencial elétrica ΔE_p será representada por:

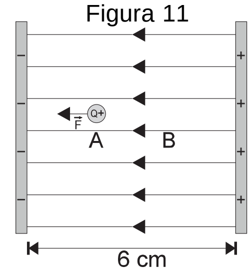
$$\boxed{\Delta E_p = q \cdot E \cdot \Delta d}$$

Passo a passo

Uma partícula cuja massa é $5 \cdot 10^{-8}$ kg possui uma carga de $2 \cdot 10^{-6}$ C e está presa num ponto A, situado a 2 cm da placa negativa de um capacitor de placas paralelas no qual existe um campo de $3 \cdot 10^3$ N/C. A distância entre as placas do capacitor é 6 cm e supomos que a influência do campo gravitacional seja nula.

1. Se a carga for solta desse ponto, com que energia cinética chegará à outra placa?
2. Qual seria o trabalho que deveríamos realizar para levar a carga do ponto A a um ponto B situado a 4 cm da placa negativa?
3. Se a carga fosse solta do ponto B, com que energia cinética chegaria à placa negativa?

Figura 11



1. A força, constante, que atua sobre a carga vale:

$F = E \cdot q$
$F = 3 \cdot 10^3 \text{ N/C} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$
$F = 6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$

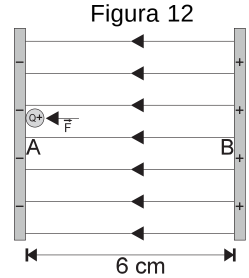
Podemos, agora, calcular a aceleração a que fica submetida a partícula.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{6 \cdot 10^{-3}\text{N}}{5 \cdot 10^{-8}\text{Kg}} = 1{,}2 \cdot 10^5 \text{m/s}^2$$

O movimento é uniformemente variado. Então podemos determinar a velocidade final utilizando a fórmula de Torricelli.

$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^5 \text{m/s}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{m}$
$v^2 = 4{,}8 \cdot 10^3 (\text{m/s})^2$

Figura 12



A energia cinética ficará assim:

$$E_C = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 4{,}8 \cdot 10^3}{2} = 1{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

2. Para calcular o trabalho τ_{AB} necessário para levar a carga do ponto A ao ponto B, usamos o valor da força e do deslocamento. Teremos:

$\tau_{AB} = 6 \cdot 10^{-3}\ N \cdot 2 \cdot 10^{-2}\ m = 1{,}2 \cdot 10^{-4}\ J$

3. Se a carga for solta do ponto B, é possivel calcular a velocidade com que atinge a placa negativa e qual a sua energia cinética. Como foi feito anteriomente, teremos:

$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot a \cdot \Delta d$
$v^2 = 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^5 m/s^2 \cdot 4 \cdot 10^{-2} m$
$v^2 = 9{,}6 \cdot 10^3 (m/s)^2$

A energia cinética ficará assim:

$$E_C = \frac{9{,}6 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-8}}{2} = 2{,}4 \cdot 10^{-4} J$$

Dessa maneira, quando levamos a partícula do ponto A ao ponto B, estamos aumentando sua energia potencial elétrica. Essa variação é medida pelo trabalho que estamos executando para levar a carga de um ponto ao outro. Note que, quando a partícula é solta do ponto A, ela atinge a placa oposta com uma energia cinética de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. Quando ela é solta do ponto B, chega com uma energia cinética de $2{,}4 \cdot 10^{-4}$J. Ou seja: houve um aumento de energia de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. Esse aumento de energia é exatamente igual ao trabalho realizado para transportar a carga do ponto A ao ponto B.

Potencial elétrico num campo uniforme

No exemplo anterior, para transportar a carga do ponto A ao ponto B dentro do campo elétrico do capacitor foi necessário realizar um trabalho de $1{,}2 \cdot 10^{-4}$J. O valor da carga transportada era $2 \cdot 10^{-6}$C. Como o trabalho pode ser calculado pela relação

$$\boxed{\tau_{AB} = E \cdot q \cdot \Delta d}$$

se tivéssemos uma carga com o dobro do valor, o valor do trabalho necessário para deslocá-la de entre esses mesmos dois pontos também dobraria. Isto é, se a carga tivesse valor de $4 \cdot 10^{-6}$C, o trabalho necessário para seu transporte seria $2{,}4 \cdot 10^{-4}$J. Se dividirmos o valor do trabalho pelo valor da carga transportada, teremos, no primeiro caso:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-4} J}{2 \cdot 10^{-6} C} = 60\ J/C$$

No segundo caso, esse valor seria:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{2{,}4 \cdot 10^{-4} J}{4 \cdot 10^{-6} C} = 60\ J/C$$

Ou seja: dentro desse capacitor, para transportar uma partícula carregada do ponto A ao ponto B, necessitamos efetuar um trabalho de 60 joules para cada coulomb de carga transportado.

Isso pode ser dito de outra maneira. Podemos afirmar que, entre os pontos A e B, existe uma diferença de potencial elétrico de 60 J/C. A relação entre essas duas unidades, joule e coulomb, é tão importante que recebeu um nome próprio: **volt**, cujo símbolo é V.

Finalmente, podemos dizer que entre os pontos A e B do capacitor existe uma difereça de potencial de 60 V. Representaremos a diferença de potencial por ΔV.

Como o trabalho é calculado por $\tau_{AB} = E \cdot q \cdot \Delta d$, a diferença de potencial elétrico entre dois pontos num campo uniforme vai ser dada por:

$$\frac{\tau_{AB}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot \Delta d}{q} = E \cdot \Delta d$$

$$\boxed{\Delta V = E \cdot \Delta d}$$

Utilizando essa relação, podemos saber qual a diferença de potencial elétrico entre as duas placas do capacitor que estão separadas por uma distância de 6 cm, ou seja, $6 \cdot 10^{-2}$m. Como o campo vale $3 \cdot 10^{3}$N/C, teremos:

$$\Delta V = E \cdot \Delta d = 3 \cdot 10^{3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 180V$$

Faíscas elétricas

Ernesto estava intrigado com o resultado.

– 180 V?! Então isso não pode ocorrer nos aparelhinhos de cartão e papel que estamos construindo. Mesmo que conseguíssemos fazer um capacitor como esse que foi descrito, acho que não poderíamos ter 180 V. Senão, a gente tomaria um choque bem grande se tocasse o dedo no capacitor!

– Não é bem assim. Nós podemos ter dois objetos carregados e que tenham uma grande diferença de potencial elétrico sem que isso cause problemas. Nem sempre um choque de 180 V é perigoso.

– Como? Eu é que não quero tomar um choque desses!

– Não precisa ter medo. Vou mostrar que isso é verdade.

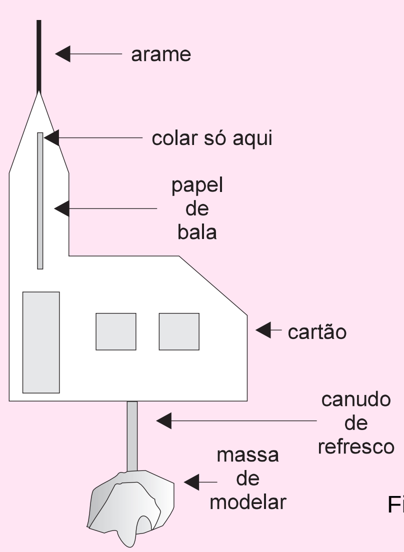


Figura 13

Roberto começou a construir a "igrejinha" que está representada na Figura 13. Ele recortou uma figura parecida com uma igreja e colou uma tirinha de papel de bala na "torre" dela. Depois, com fita adesiva, pregou na igreja um pedaço de arame (para simular um pára-raios) e um canudo de refresco (para servir de suporte). Em seguida, espetou o conjunto num pedaço de massa de modelar. Na realidade, acabara de construir um eletroscópio um pouco modificado.

Roberto carregou um canudo de refresco por atrito e falou para Ernesto:

– Veja, vou passar o canudo de refresco **perto** do arame da igreja. Não vou tocar o arame com o canudo, vou passar o canudo a uma distância de 1 cm do arame. O arame está fazendo o papel do pára-raios da igreja e o canudo representa uma nuvem carregada. Observe o que acontece com a tirinha de papel de bala.

– Ah! Ela começa a subir! A igreja está carregada! (Figura 14)

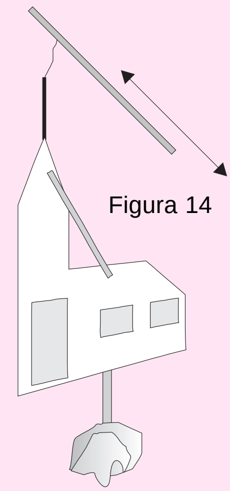


Figura 14

– Exatamente! Mas como ela foi carregada? Por atrito? Por indução? Por contato?

– Humm... Por atrito não foi. Por contato, também não. Poderia ser por indução. Então a carga da tirinha deveria ser contrária à carga do canudo. Coloque o canudo perto da tirinha para eu ver se ela é atraida pelo canudo.

Roberto faz o que Ernesto pede.

– Ih! Foi repelida! O canudo, a tirinha e a igreja, todos têm a mesma carga. Então... A igreja não foi carregada por indução. Nem por atrito, nem por contato, nem por indução. Ora, como então foi carregada a igreja?

– Foi um raio!

– O quê?

– Exatamente isso. Foi uma faísca elétrica. Foi uma faísca elétrica pequena. Quase não dá para perceber. Mas, como você percebeu, as cargas "pularam" do canudo para a igreja. Você viu que as cargas do canudo e da igreja eram do mesmo sinal.

– E como é que acontece isso?

– Você já sabe que as cargas elétricas se acumulam nas regiões pontiagudas dos condutores. Quando aproximamos o canudo do arame, um número muito grande de cargas vai ficar naquela região. Então o campo elétrico vai ficar muito intenso. Tão intenso que é capaz de arrancar elétrons dos átomos do ar. O ar fica **ionizado** e torna-se um bom condutor. Dessa maneira, as cargas passam do canudo à igreja por meio do ar. Mas, para isso, devemos ter um campo de 1.000.000 N/C. Entendeu?

– Mais ou menos. Não entendi direito esse campo.

– Veja, podemos usar outras unidades para o campo elétrico. Em lugar de usar N/C, podemos usar V/m.

A definição de campo nos diz:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\text{(newtons)}}{\text{(coulombs)}}$$

Porém, como a definição de potencial diz que $\Delta V = E \cdot \Delta d$, podemos dizer que:

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta d} = \frac{\text{(volts)}}{\text{(metros)}}$$

Um campo de 1.000.000 N/C é o mesmo que um campo de 1.000.000 V/m. Podemos falar que esse campo vale 10.000 V/cm. Então, para que o ar se torne condutor, necessitamos de 10.000 V/cm. Como o canudo estava a 1 cm do arame e passaram cargas para a igreja, isso significa que a diferença de potencial entre o canudo e o pára-raios era de **mais de 10.000 V**!

PARA TERMINAR

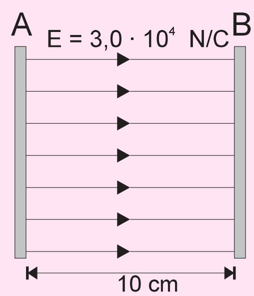
Nesta aula você aprendeu:

- que as cargas, num condutor, estão em suas regiões periféricas;
- que o campo no interior de um condutor é nulo;
- o que é energia potencial elétrica e potencial elétrico;
- que as cargas se acumulam nas regiões pontiagudas dos condutores.

Mãos à obra

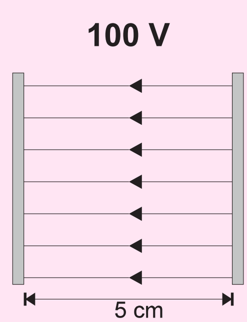
Exercício 1

A figura abaixo mostra esquematicamente um capacitor de placas paralelas e as linhas de campo desse capacitor. Qual é a placa positiva? Qual o trabalho para mover um elétron por toda a extensão desse capacitor? Qual a diferença de potencial entre as duas placas? A carga do elétron vale $1{,}6 \cdot 19^{-19}$C.



Exercício 2

Um capacitor de placas paralelas está submetido a uma diferença de potencial de 100V. A distância entre as placas é 5 cm. Determine a variação de energia potencial elétrica de um elétron que é abandonado na placa negativa e chega à placa positiva. Sabendo-se que a massa do elétron é $9{,}1 \cdot 10^{-31}$kg, com que velocidade o elétron atinge a placa positiva?



AULA

40

Paaaai, o chuveiro pifou!

PARA COMEÇAR

Era sábado, dia de baile, noite fria e chuvosa, quando o garotão deu esse grito desesperado. Todo molhado, tiritando de frio, Ernesto fazia o seu protesto:

– Esse chuveiro é uma droga!

– Não é o chuveiro, deve ser o fusível – respondeu Roberto, pacientemente. – Também, com tudo ligado nesta casa, não há fusível que agüente! – acrescentou, já menos paciente...

A história teve um final quase feliz. Roberto, prevenido, tinha um fusível de reserva. E, mais prevenido ainda, decretou:

– Enquanto alguém toma banho, desliga-se a televisão! – e fingiu que não ouvia, agora, o protesto de Cristiana, inconformada:

– Isso é ridículo!

Será que é mesmo? O que tem a ver o chuveiro elétrico com o fusível? E por que desligar a televisão para tomar banho, ou melhor, quando se liga o chuveiro? Esse é o tema de nossas próximas aulas. A resposta completa a todas essas perguntas virá aos poucos, completando-se no final das aulas. Será uma pequena novela em quatro capítulos – e o primeiro capítulo você vai ver, ou estudar, nesta aula sobre corrente elétrica.

Fique ligado

A corrente elétrica

Nas aulas anteriores, você foi apresentado ao personagem principal da eletricidade, o **elétron**. É essa partícula, incrivelmente pequena, que se movimenta pelos fios e aciona todos os aparelhos elétricos das nossas casas. O elétron é o principal componente ou portador da corrente elétrica, sobretudo nos sólidos, embora haja correntes elétricas cujos portadores são íons negativos, positivos ou ambos. Até mesmo "buracos" podem ser portadores da corrente elétrica, como veremos mais adiante.

A origem da palavra **corrente** está ligada a uma analogia que os físicos do início do século XIX estabeleceram entre a eletricidade e a água. Eles imaginavam que a eletricidade era, como a água, um fluido, algo que pudesse fluir ou escorrer como água corrente. Os fios seriam os encanamentos por onde passava essa corrente de eletricidade.

Hoje sabemos que essa comparação raramente corresponde à realidade, principalmente em relação à corrente elétrica de nossas casas. Mas a expressão ficou. De qualquer forma, se um fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica, há de fato um movimento de cargas percorrendo o condutor. Ocorre que esse movimento nem sempre é contínuo: em geral, ele é oscilante. Mas isso nós veremos mais tarde. Por enquanto vamos definir, matematicamente, a corrente elétrica.

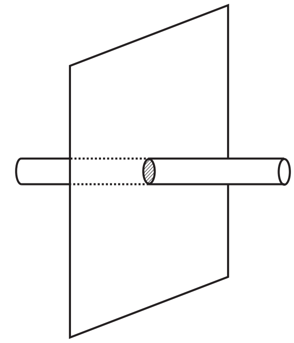


Figura 1. Uma seção transversal (área hachurada) é um corte imaginário perpendicular ao eixo do condutor.

Suponha que uma certa quantidade de carga Δq atravesse uma seção transversal de um condutor (veja a Figura 1) num intervalo de tempo Δt. Define-se a corrente elétrica **i** que percorre esse condutor pela expressão:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

A unidade de corrente elétrica, no SI, é o **ampère**, cujo símbolo é **A**. Um condutor é percorrido por uma corrente elétrica de 1 A se uma seção transversal desse condutor é atravessada por uma unidade de carga, $\Delta q = 1C$, na unidade de tempo $\Delta t = 1s$:

$$1A = \frac{1C}{1s}$$

A corrente elétrica, além de ser uma grandeza física usada com muita freqüência, tem valores de ordem de grandeza muito variada. Por essa razão é muito comum o uso de submúltiplos do ampère, sendo os mais comuns o **miliampère**, (mA), e o **microampère**, (µA).

As relações destes submúltiplos com o ampère são:

$$1mA = 10^{-3}A$$
$$1\mu A = 10^{-6}A$$

Como toda carga elétrica é múltipla da carga **e** do elétron, a expressão da quantidade de carga pode ser escrita como:

$$\Delta q = n \cdot e$$

onde **n** é um número inteiro e **e** = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$C. (Lembre-se de que C é o símbolo de coloumb, unidade de carga elétrica). Portanto, a corrente elétrica pode ser expressa, também, na forma:

$$i = \frac{n \cdot e}{\Delta t}$$

Passo a passo

1. Efetue as seguintes transformações:

a) 50 mA em A
b) 240 µA em A
c) 0,78 A em mA
d) 0,0049 A em µA

Solução:

a) Se $1\ mA = 10^{-3}A$, então $50\ mA = 50 \cdot 10^{-3}A \Rightarrow \mathbf{50\ mA = 5 \cdot 10^{-2}A}$

b) Se $1\ \mu A = 10^{-6}A$, então $240\ \mu A = 240 \cdot 10^{-6}A \Rightarrow \mathbf{240\ \mu A = 2{,}4 \cdot 10^{-4}A}$

c) Se $1\ mA = 10^{-3}A \Rightarrow 1\ A = 10^{3}\ mA$.
Então $0{,}78\ A = 0{,}78 \cdot 10^{3}\ mA \Rightarrow 0{,}78\ A = 78 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{3}\ mA \Rightarrow$
$\Rightarrow 0{,}78\ A = 78 \cdot 10^{1}\ mA \Rightarrow \mathbf{0{,}78\ A = 780\ mA}$

d) Se $1\ \mu A = 10^{-6}\ A \Rightarrow 1\ A = 10^{6}\ \mu A$
Então $0{,}0049\ A = 0{,}0049 \cdot 10^{6}\ \mu A \Rightarrow 0{,}0049\ A = 49 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{6}\ \mu A \Rightarrow$
$\Rightarrow 0{,}0049\ A = 49 \cdot 10^{2}\ A \Rightarrow \mathbf{0{,}0049\ A = 4.900\ \mu A}$

2. Num relâmpago avalia-se que, em apenas 1 décimo de milésimo de segundo, descem de uma nuvem para a Terra, em média, cerca de 20 quintilhões (10^{18}) de elétrons. Qual a corrente elétrica média equivalente a esse fantástico movimento de cargas elétricas ?

Solução:

Como a carga do elétron é **e** = 1,6 · 10-19 C, a quantidade total de carga escoada no relâmpago é de:

$$\Delta q = n \cdot e \Rightarrow \Delta q = 20 \cdot 10^{18} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}C \Rightarrow \Delta q = 32 \cdot 10^{-1}C \Rightarrow \Delta q = 3{,}2C$$

Como o tempo para o escoamento dessa carga é $\Delta t = 0{,}0001$ s, temos:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow i = \frac{3{,}2}{0{,}0001}$$

$$\mathbf{i = 32.000\ A}$$

3. Um fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica de 5 A.

a) Qual a carga elétrica que atravessa uma seção transversal desse condutor em 10 segundos?
b) Qual o número de elétrons que atravessa essa seção transversal nesse intervalo de tempo?

Solução:

Aplicando a definição de corrente elétrica, obtemos:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta q = i \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta q = 5A \cdot 10s \Rightarrow \Delta q = 50A \cdot s \Rightarrow \Delta q = 50C$$

Como $\Delta q = n \cdot e$, $n = \dfrac{\Delta q}{e} \Rightarrow n = \dfrac{50}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow n = 3{,}125 \cdot 10^{20}$ **elétrons**

Sentido da corrente elétrica

Antes de descobrir o elétron e sua carga, no final do século XIX, os físicos já tinham desenvolvido toda a teoria da eletricidade e estabelecido um sentido para a corrente elétrica. Como não se sabia qual a natureza da carga elétrica que percorria os condutores, admitiu-se que ela se constituísse de um fluxo de cargas positivas.

Quando se descobriu que os portadores de carga eram, na grande maioria das vezes, elétrons (cargas negativas, portanto), ficou claro que o sentido real da corrente elétrica era contrário ao suposto na teoria. Mas, fisicamente, o movimento de uma carga elétrica positiva **num determinado sentido** equivale ao movimento de uma carga negativa **no sentido oposto**. Por essa razão, os físicos optaram por manter o sentido que haviam estabelecido anteriormente, passando a considerá-lo como **convencional** (veja a Figura 2).

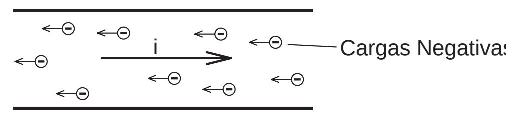


Figura 2
O sentido real e convencional da corrente elétrica.

Essa convenção é válida até hoje e será adotada neste livro, mas já não é unânime como antigamente. Em eletrônica, por exemplo, costuma-se utilizar o sentido real do movimento dos elétrons, porque isso torna mais fácil a compreensão dos fenômenos nela estudados.

Quando a corrente elétrica se constitui de íons positivos e negativos, o que ocorre costumeiramente em líquidos e gases, adota-se o sentido dos íons positivos (veja a Figura 3). Em materiais semicondutores aparece um fenômeno interessante. Alguns desses materiais são construídos de forma a se introduzirem, na sua estrutura, buracos ou lacunas, regiões onde **deveria estar** um elétron. Quando um elétron ocupa esse espaço, o buraco se "desloca" para o lugar onde estava o elétron. Se outros elétrons forem ocupando, sucessivamente, esse espaço, vai surgir um movimento aparente de um **buraco positivamente carregado**, já que ele é a **ausência** de uma carga negativa (veja a Figura 4)

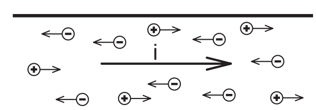


Figura 3
O sentido da corrente elétrica em líquidos e gases.

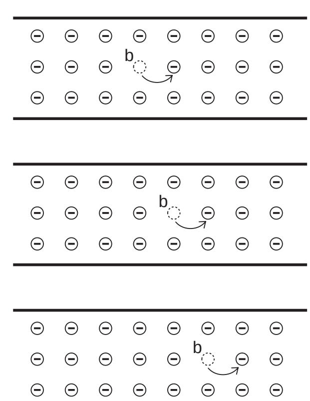


Figura 4
O movimento de um buraco positivamente carregado: à medida que os elétrons vão ocupando o buraco, este se desloca pelo semicondutor.

Mas o que faz um elétron se deslocar para um lado ou outro em um condutor? Em outra palavras, o que produz uma corrente elétrica?

O campo elétrico e a corrente elétrica

O que faz um elétron, lá no meio de um condutor, mover-se mais para um lado do que para o outro? Na verdade, os elétrons movimentam-se sempre, contínua e desordenadamente, em todas das direções. O que caracteriza a corrente elétrica é que esse movimento contínuo e desordenado passa a ter um sentido preferencial, num lento deslocamento (veja a Figura 5).

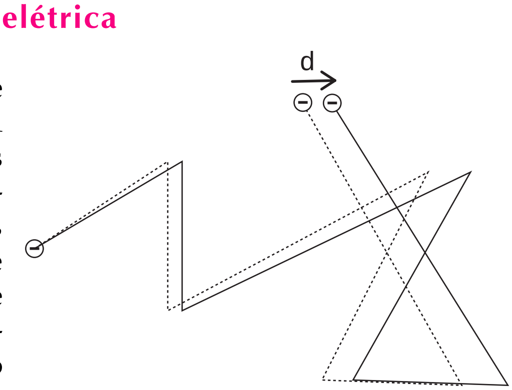


Figura 5
Aqui estão representados **esquematicamente** os movimentos de um elétron num condutor. A linha tracejada representa esse movimento na ausência de um campo elétrico E. A linha cheia representa esse movimento quando o campo elétrico está presente. A seta indica o deslocamento real que dá origem à corrente elétrica.

É algo parecido a uma escola de samba desfilando na avenida: os elétrons são frenéticos passistas. Embora se movimentem, ou "dancem", executando seus passos com velocidades fantásticas, a velocidade média do conjunto dos elétrons ao longo do condutor é muito pequena: apenas alguns centímetros por hora! Também aqui há uma semelhança com o que ocorre com uma escola de samba. Em seu conjunto, ela sempre se desloca a uma velocidade muito menor que a de qualquer de seus componentes enquanto executam suas coreografias.

Você pode estar pensando: como é que a corrente elétrica, andando tão devagar, acende a lâmpada do quarto instantaneamente, quando ligamos o interruptor? É aí que aparece o papel do **campo elétrico**. O que faz um elétron se mover predominantemente num determinado sentido, e não em outro, é o aparecimento de um campo elétrico no lugar em que esse elétron se encontra.

Como você viu no estudo da eletrostática, se uma carga elétrica é colocada numa região do espaço onde existe um campo elétrico, ela sofre a ação de uma força e tende a se deslocar. É por isso que a lâmpada do seu quarto acende instantaneamente. Os elétrons que fazem o filamento da lâmpada se tornar incandescente não precisam sair do interruptor e percorrer o fio até chegar ao filamento: **eles já estão no filamento**, movendo-se contínua e desordenadamente. Para que esse movimento provoque o acendimento da lâmpada é preciso que os elétrons recebam uma "ordem" para se deslocar num determinado sentido. Essa "ordem" é dada pelo campo elétrico, que passa a percorrer o fio assim que você liga o interruptor. Como o campo elétrico se propaga a uma velocidade fantástica, próxima à velocidade da luz no vácuo, a lâmpada se acende instantaneamente.

É importante lembrar que o campo elétrico às vezes aponta num só sentido, fazendo que aquela multidão de elétrons se mova continuamente **num só sentido**. Nesse caso a corrente elétrica é conhecida como **corrente contínua**. É a corrente gerada por pilhas e baterias e a que percorre a grande maioria dos aparelhos eletrônicos. Em outros casos, o campo elétrico oscila, isto é, se alterna, fazendo com que aquela multidão de elétrons se movimente **ora num sentido, ora no sentido oposto**. Nesse caso, a corrente elétrica é conhecida como **corrente alternada**. É esse tipo de corrente que as companhias de eletricidade fornecem às nossas casas.

Você acaba de aprender algumas noções importantes sobre eletricidade, que podem ajudá-lo a entender o que aconteceu na história do início desta aula. A corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas, quase sempre elétrons, que se movem predominantemente num sentido. Esse sentido pode ser único ou ter movimento de vaivém. O movimento de vaivém acontece quando, na região onde os elétrons se encontram, aparece um campo elétrico oscilante.

Os fios condutores, além fornecer e permitir o movimento dos elétrons, são também, e principalmente, o caminho ou guia que permite a propagação do campo elétrico. Se algo interromper um fio, cortando-o, por exemplo, o campo elétrico não chega até os elétrons. Eles continuam se movendo incessantemente, mas sem um sentido que predomine. É mais ou menos como se um grande carro alegórico quebrasse em meio ao desfile de uma escola de samba. Certamente seus componentes continuariam sambando, mas sem um sentido que predominasse no seu movimento: nem contínuo, nem de vaivém.

Foi o que ocorreu na nossa história, quando o chuveiro deixou de funcionar porque o fusível queimou. O fusível, na realidade, não queima: ele derrete ou se funde (por isso se chama fusível). Ao derreter, ele interrompe a passagem do campo elétrico e, conseqüentemente, deixa de existir a corrente elétrica. Como na escola de samba com o carro alegórico quebrado, os elétrons continuam se movendo no chuveiro, mas sem uma orientação determinada. Por isso o chuveiro não funciona.

Nesta aula você aprendeu:

- a definir e calcular a intensidade de uma corrente elétrica;
- a unidade de corrente elétrica, seus múltiplos e submúltiplos mais importantes e como transformá-los;
- que o sentido real do movimento dos elétrons é oposto ao movimento convencional da corrente elétrica;
- que existem dois tipos de corrente elétrica, contínua e alternada.

Mas ainda há muita coisa por explicar. De onde vem esse campo elétrico? Como ele é produzido ou gerado? Por que o chuveiro esquenta e o fusível derrete? Esse é o assunto das próximas aulas.

Exercício 1

Transforme em miliampères, mA:

a) 10 A
b) 0,25 A
c) 0,0085 A

Exercício 2

Transforme em microampères, μA:

a) 5 A
b) 0,006 A
c) 0,000045 A

Exercício 3

Transforme em ampères, A:

a) 20 mA
b) 680 mA
c) 2300 mA
d) 500 μA
e) 3800 μA
f) 8880000 μA

Exercício 4

A seção transversal de um condutor é atravessada por um fluxo de 1 bilhão (10^9) elétrons em apenas 0,2 segundos. Qual a corrente elétrica que percorre esse condutor ?

Exercício 5

Um fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica de 0,25 A.

a) qual a carga elétrica que atravessa uma seção transversal desse condutor em 20 segundos?
b) qual o número de elétrons que atravessa a seção transversal nesse intervalo de tempo?

AULA

41

Me deixa passar, senão eu esquento!

PARA COMEÇAR

A nossa história do banho interrompido – ou do fusível queimado – continuou alguns dias depois, quando o ambiente familiar estava mais amigável.

– Ô, pai, como é que naquele dia você sabia que era o fusível que tinha queimado? Não podia ser o chuveiro? – perguntou Ernesto intrigado.

– Eu chutei, filho – respondeu Roberto com sinceridade. – A casa estava toda acesa, essa televisãozona ligada, você liga o chuveiro e ele pifa... tinha de ser o fusível!

– Mas o que o fusível tem com isso? – quis saber Ernesto.

– É que, quando tem muita coisa ligada, muita corrente é puxada e o fusível não agüenta. Por isso que eu mandei desligar a televisão, senão queimava de novo! – explicou Roberto corretamente, embora sem muito rigor científico.

– E a mãe ainda falou que era ridículo... Ridículo era tomar banho frio, né, pai? – arrematou politicamente o filho.

Mas Ernesto não ficou sem resposta. Cristiana, que ouvia tudo lá do quarto, não perdoou:

– Ridículo sim, queridinho! Na casa das minhas amigas ninguém desliga a televisão para tomar banho, só na maravilhosa casa do seu papaizinho, o gênio da eletricidade!

É claro que a conversa não parou por aí. Provavelmente esquentou um pouco mais e deve ter até queimado alguns “fusíveis”. Mas isso já não tem mais nada a ver com a nossa aula...

Até esse ponto, no entanto, a conversa ilustra muito bem o que vamos estudar agora. Você já viu, nas aulas anteriores, que para uma carga elétrica se movimentar num determinado sentido é preciso que sobre ela atue um campo elétrico. Ou que ela esteja submetida a uma diferença de potencial. Você também já sabe que há bons e maus condutores de eletricidade, ou seja, alguns materiais resistem mais, outros menos, à passagem da corrente elétrica. Essa resistência pode ser medida, assim como seu efeito principal – o calor gerado, origem dos primeiros eletrodomésticos.

Mais adiante você vai ver que Roberto, de fato, sabia o que estava falando, mas que Cristiana também tinha razão. Numa instalação elétrica projetada adequadamente, os fusíveis não queimam facilmente. Aliás, em geral, nem se usam mais fusíveis – usam-se disjuntores, que têm a mesma função mas não queimam, simplesmente “desarmam”.

Mas isso fica para depois: já temos assunto suficiente para esta aula.

Diferença de potencial

Nas aulas anteriores, vimos dois conceitos que explicavam a mesma coisa de formas diferentes: campo elétrico e potencial elétrico. Uma carga elétrica **só se movimenta de um ponto para outro de uma região do espaço se, nessa região, houver um campo elétrico**.

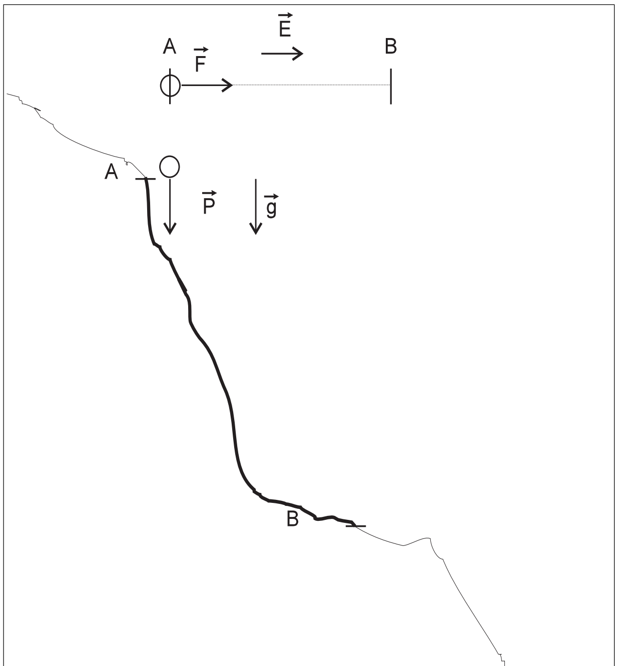


Figura 1. A carga q vai de A para B devido ao campo elétrico $\vec{E}$, ou devido à presença de potencial elétrico entre A e B. Da mesma forma, a pedra rola de A para B devido ao campo gravitacional $\vec{g}$ ou devido à diferença de potencial gravitacional entre A e B.

Esse movimento pode ser explicado, também, pelo conceito de diferença de potencial. Nesse caso, dizemos que uma carga elétrica **só se movimenta de um ponto para outro de uma região do espaço se, entre esses dois pontos, houver uma diferença de potencial**.

Para entender a diferença entre essas explicações, suponha que uma pedra rola do alto de uma ribanceira. Você pode dizer que ela cai devido ao campo gravitacional, ou que ela cai porque estava num ponto mais alto e tende a vir para um ponto mais baixo devido à diferença de potencial gravitacional.

São explicações equivalentes. Pode-se adotar uma ou outra. Em eletricidade costuma-se adotar a segunda, a da diferença de potencial, por ser mais simples (veja a Figura 1).

Dessa forma, para que as cargas elétricas de um condutor se movimentem predominantemente num determinado sentido, de um ponto para outro, é preciso que entre esses pontos se estabeleça uma **diferença de potencial**. Como você já viu, a unidade de diferença de potencial no SI é o **volt**. Por isso também é costume chamar a diferença de potencial de **voltagem**.

Resistência elétrica e lei de Ohm

Pelo que vimos até aqui, para que haja uma **corrente elétrica** entre dois pontos de um condutor – as suas extremidade, por exemplo – é necessária uma **diferença de potencial** entre esses dois pontos. Mas que relação existe entre essas duas grandezas? Qual o valor da corrente elétrica que passa por um condutor quando suas extremidades são ligadas a uma determinada diferença de potencial?

Essa relação foi estabelecida em 1827 pelo físico alemão Georg Simon Ohm. Ele percebeu que, dependendo do condutor, a mesma diferença de potencial poderia gerar correntes elétricas de intensidades diferentes. Isso significa que alguns condutores "resistem" mais à passagem da corrente que outros, ou seja, alguns corpos têm **resistência elétrica** maior do que outros.

Ohm definiu a resistência elétrica de um condutor pela razão entre a diferença de potencial aplicada a esse condutor e a corrente que o atravessa. Se denominarmos **V** a diferença de potencial e **i** a intensidade da corrente elétrica, podemos definir a resistência elétrica (**R**) de um condutor pela expressão:

$$R = \frac{V}{i}$$

Como, no SI, a unidade de diferença de potencial é o volt (V) e a de corrente elétrica é o ampère (A), a unidade de resistência elétrica será dada pela relação volts/ampère, que recebe o nome de **ohm**, tendo como símbolo a letra grega ômega, maiúscula, **Ω** .

Da definição de resistência elétrica, pode-se tirar a expressão:

$$V = R \cdot i$$

conhecida como **lei de Ohm**.

Passo a passo

1. Um fio condutor, ligado a uma diferença de potencial de 3 V, é percorrido por uma corrente elétrica de 0,5 A. Qual a resistência elétrica desse fio?

Solução:

Basta aplicar a definição de resistência elétrica, $R = \frac{V}{i}$.
Como V = 3 V e i = 0,5 A, temos:
$R = 3\ V \cdot 0{,}5\ A$
$\mathbf{R = 6\Omega}$

Resistores lineares

Qualquer pedaço de fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica quando submetido a uma determinada diferença de potencial. Esse fio tem, nessas condições, uma resistência elétrica definida. Ele é um **resistor**, representado simbolicamente pela desenho da Figura 2.

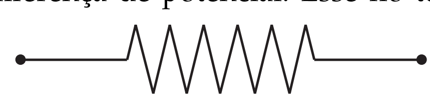


Figura 2. Símbolo gráfico do resistor.

Na prática, os resistores são fabricados industrialmente e vendidos no comércio com determinadas especificações de uso, chamadas de **valores nominais**. São utilizados nas aplicações práticas da eletricidade, quase sempre para aquecimento. Na eletrônica são usados, em geral, para adequar os valores da corrente elétrica às necessidades de cada montagem, circuito, equipamento etc.

Quando o valor da resistência elétrica **R** de um resistor é constante, a lei de Ohm torna-se uma **função linear**. Isso significa que, se esse resistor for submetido a diferentes valores de **V**, ele será percorrido por diferentes valores de **i**. Mas os valores de i serão sempre **diretamente proporcionais** a V. Em outras palavras, o gráfico V × i será uma reta. Por isso, nesse caso, o resistor é chamado de **linear**. Veja o exemplo 2.

Passo a passo

2. Um resistor tem o valor constante R = 10 Ω. Preencha a tabela abaixo, determinando o valor de i para cada valor de V sugerido na tabela. Com os valores obtidos, construa o gráfico V × i.

V(volts)	2	4	6	8	10	12	14	16
i(ampères)								

Solução:

Aplicando a lei de Ohm, $V = R \cdot i$, podemos obter os valores de i pela relação $i = V$ # R, onde R = 10 Ω. A tabela ficará, então, com os seguintes valores:

V(volts)	2	4	6	8	10	12	14	16
i(ampères)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6

A partir desses valores pode-se construir o gráfico V × i, como você vê na Figura 3.

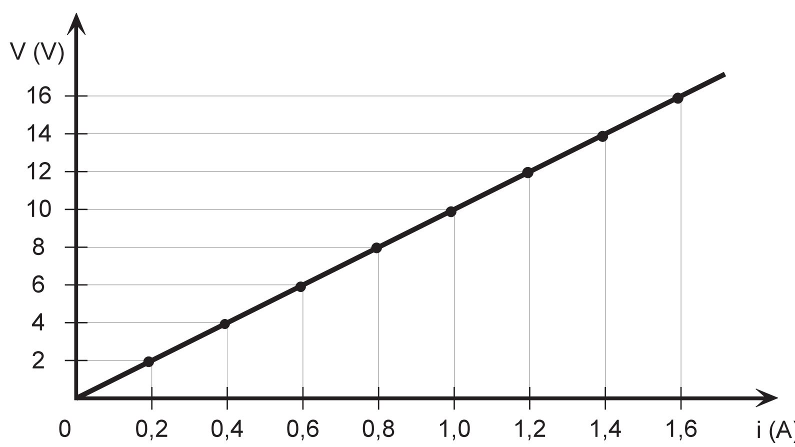


Figura 3. Gráfico V × i.

Como em toda função linear, o coeficiente angular da reta (tangente do ângulo que a reta forma com o eixo das abscissas) é igual à constante de proporcionalidade. Nesse caso, essa constante de proporcionalidade é R, valor da resistência elétrica do resistor. Veja na Figura 3 que, em qualquer ponto da reta,

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{V}{i} \Rightarrow \text{tg}\,\alpha = R = 10\,\Omega$$

Resistores não lineares

Os resistores nem sempre têm um valor constante. Em geral, isso ocorre apenas dentro de um determinado intervalo de valores da corrente elétrica. Quando o valor do resistor é variável, dizemos que ele é um resistor **não-linear**, pois o seu gráfico **V** × **i** deixa de ser uma reta.

Na maioria dos casos, o valor dos resistores aumenta com o aumento da corrente elétrica. Isso ocorre porque esse valor quase sempre aumenta com o aumento da temperatura, e a temperatura sempre aumenta com o aumento da corrente elétrica. Por isso é que os resistores destinados especificamente ao aquecimento – como aqueles utilizados em ferros elétricos, chuveiros e torneiras elétricas ou mesmo no filamento de lâmpadas de incandescência – têm um valor variável que aumenta com a temperatura.

Existem alguns resistores construídos especialmente para que o seu valor diminua com o aumento da corrente. São conhecidos por uma sigla, VDR, que, em inglês significa "resistor que depende da voltagem". Veja os gráficos V × i, que correspondem a esses resistores, na Figura 4.

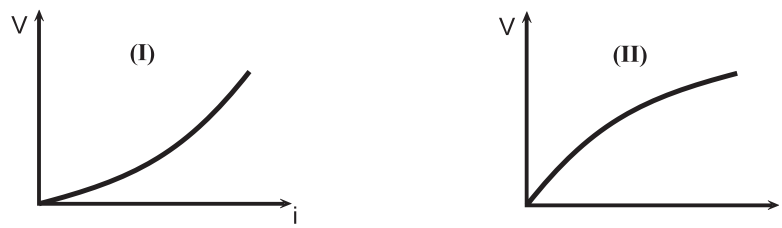


Figura 4. Gráficos de resistores não lineares:
I) gráfico do filamento de uma lâmpada;
II) gráfico de um VDR (voltage dependent resistor)

Resistividade elétrica

Já vimos que a resistência elétrica de um condutor está relacionada à maior ou menor facilidade com que esse condutor permite a passagem da corrente elétrica. Num fio condutor, essa facilidade ou dificuldade depende de três fatores: do seu **comprimento**, ℓ; da sua espessura, bitola ou, mais corretamente, **área da seção transversal**, **S**; de uma constante que depende do material de que é feito esse condutor. Essa constante é a chamada **resistividade**, representada pela letra grega ρ (rô). Pode-se expressar o valor da resistência elétrica de um fio em função de todos esses fatores pela relação:

$$R = \rho\frac{\ell}{S}$$

É fácil ver, por essa expressão, que R é diretamente proporcional a ℓ – quanto **maior** o comprimento do fio, **maior** a sua resistência elétrica – e inversamente proporcional à sua área de seção transversal – quanto **maior** a área, **menor** a resistência elétrica. Pode-se ainda, a partir dessa expressão, definir a unidade da resistividade elétrica de um material.

Se $R = \rho\frac{\ell}{S}$, então:

$$\rho = R\frac{S}{\ell}$$

Portanto a unidade de ρ, no SI, será: $\Omega\ m^2/m$ ou, simplificando, $\Omega\ m$.

Para essa constante, em geral, prefere-se usar uma unidade mista, não pertencente ao SI, que relaciona todos os fatores ligados à resistividade. Essa unidade é $\Omega\ mm^2/m$. Ela é mais prática porque utiliza como unidade de área, em lugar do metro quadrado, o milímetro quadrado, que é muito mais adequado à área de seção de um fio.

3. Determine a resistência elétrica de um fio de cobre de 10 m de comprimento e 0,5 mm^2 de área de seção transversal. Veja a resistividade do cobre na tabela abaixo.

RESISTIVIDADE DE ALGUNS MATERIAIS À TEMPERATURA AMBIENTE (20ºC)	
MATERIAL	RESISTIVIDADE
prata	$1,62 \cdot 10^{-8}$
cobre	$1,69 \cdot 10^{-8}$
alumínio	$2,75 \cdot 10^{-8}$
tungstênio	$5,25 \cdot 10^{-8}$
ferro	$9,68 \cdot 10^{-8}$
platina	$10,6 \cdot 10^{-8}$
manganês	$48,2 \cdot 10^{-8}$
silício	$2,5 \cdot 10^{3}$
vidro	$10^{10} - 10^{14}$

Solução:

Aplicando a expressão da resistência elétrica em função da resistividade, temos:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

Sendo $\rho_{Cu} = 1,69 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ (valor obtido na tabela);
$\ell = 10\ m$ e $S = 0,5\ mm^2 = 0,5 \cdot 10^{-6}\ m^2$.

Temos: $R = (1,69 \cdot 10^{-8} \cdot 10)\ \#\ 0,5 \cdot 10^{-6}$

$\mathbf{R = 0,338\,\Omega}$

Associação de resistores

Como dissemos anteriormente, os resistores são fabricados industrialmente e vendidos no comércio sob certas especificações ou valores nominais. No entanto, é fácil entender que não é possível fabricar resistores de todos os valores. Por essa razão existem resistores variáveis que costumam ser chamados de **reostatos**, nos quais o valor desejado para o resistor é obtido variando-se a posição de um contato deslizante – o que corresponde a aumentar o comprimento ℓ do fio ou do material percorrido pela corrente elétrica. Veja Figura 5. Como a resistência elétrica é diretamente proporcional ao comprimento do condutor, pode-se, dessa forma, ajustá-lo ao valor desejado.

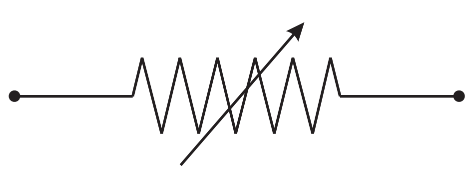


Figura 5. Símbolo do reostato.

Outra maneira de obter valores não-comerciais para um resistor é fazer uma **associação de resistores**, isto é, agrupá-los adequadamente de forma que o conjunto formado tenha o valor que se deseja. Há duas formas básicas de compor essas associações: em **série** ou em **paralelo**.

Na associação em série (veja Figura 6), **todos os resistores são percorridos pela mesma corrente elétrica**. Vamos supor que numa associação existam **n** resistores, R_1, R_2, R_3, ... R_n, percorridos pela mesma corrente i. Pela lei de Ohm, cada resistor vai ser submetido a uma diferença de potencial $V = R \cdot i$. Assim, o resistor R_1 será submetido a uma diferença de potencial $V_1 = R_1 \cdot i$; R_2 será submetido a uma diferença de potencial $V_2 = R_2 \cdot i$; R_3 será submetido a uma diferença de potencial $V_3 = R_3 \cdot i$ e assim por diante, até R_n, submetido a uma diferença de potencial $V_n = R_n \cdot i$. A diferença de potencial V_T de toda a associação será:

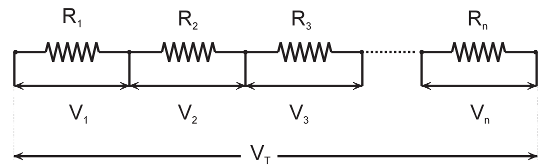


Figura 6. Associação de resistores em série.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + ... + V_n$$

Como V_T é a diferença de potencial em toda a associação, pode-se afirmar, pela lei de Ohm, que $V_T = R_E \cdot i$, onde $\mathbf{R_E}$ é a **resistência equivalente** a toda a associação. A diferença de potencial em toda associação pode, portanto, ser escrita na forma:

$$R_E \cdot i = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i + R_3 \cdot i + ... + R_n \cdot i$$

Dividindo toda a equação por i, obtemos:

$$\mathbf{R_E = R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_n}$$

Portanto, **o resistor equivalente a uma associação de resistores em série tem uma resistência elétrica igual à soma das resistências elétricas de todos os resistores da associação**.

Na associação em paralelo, **todos os resistores têm os terminais ligados à mesma diferença de potencial**. Nesse caso, a corrente elétrica total da associação é igual à soma das correntes que passam pelos resistores. Veja a Figura 7. Se a corrente total da associação é i_T e i_1, i_2, i_3, ...i_n são as correntes que percorrem cada resistor, pode-se escrever:

$$i_T = i_1 + i_2 + i_3 + ... + i_n$$

Mas, da lei de Ohm, pode-se escrever, também, que

$$i_T = \frac{V}{R_E},$$

onde R_E é a resistência equivalente à associação.

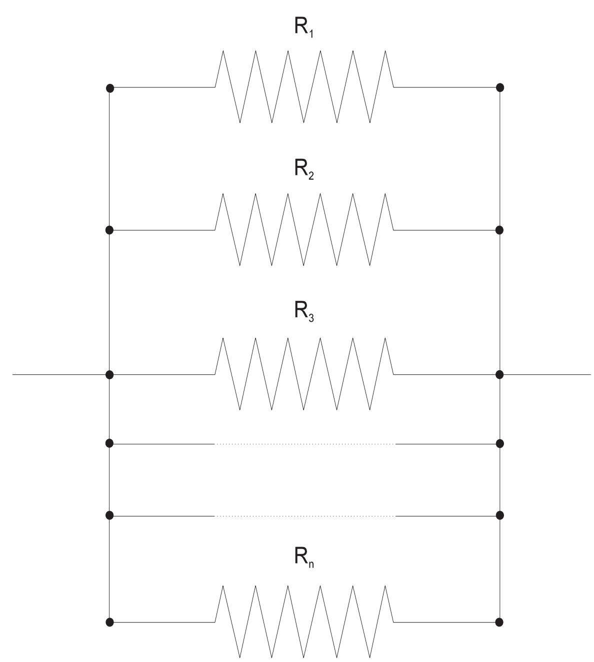


Figura 7. Associação de resistores em paralelo.

Como a diferença de potencial V é a mesma para todos os resistores, podemos escrever, para cada resistor,

$$i_1 = \frac{V}{R_1}\ ,\ i_2 = \frac{V}{R_2}\ ,\ i_3 = \frac{V}{R_3}\ \text{e}\ i_n = \frac{V}{R_n}\ .$$

Portanto, a expressão da corrente total pode ser escrita na forma:

$$\frac{V}{R_E} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} + \ldots + \frac{V}{R_n}$$

Dividindo toda a equação por V, obtemos:

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

Essa expressão permite determinar o valor da resistência elétrica equivalente de uma associação em paralelo de resistores. É fácil demonstrar que, se houver apenas dois resistores em paralelo, de resistências R_1 e R_2, a resistência equivalente R_E dessa associação pode ser determinada pela expressão:

$$R_E = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Muitas vezes a associação é mista, isto é, alguns resistores estão associados de uma forma e outros, de outra. Nesse caso, a determinação da resistência equivalente deve ser feita por partes. Veja o exemplo 6.

Passo a passo

4. Determine o resistor equivalente à associação da Figura 8.

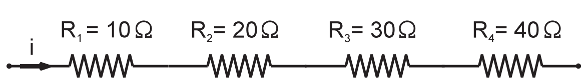


Figura 8.

Solução:

Como todos os resistores são percorridos pela mesma corrente, trata-se de uma associação em série. Então, para determinar o resistor equivalente, basta somar todos os resistores cujos valores estão na figura:

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Portanto,

$$R_E = 10 + 20 + 30 + 40$$

$$\mathbf{R_E = 100\,\Omega}$$

5. Determinar o resistor equivalente à associação da Figura 9.

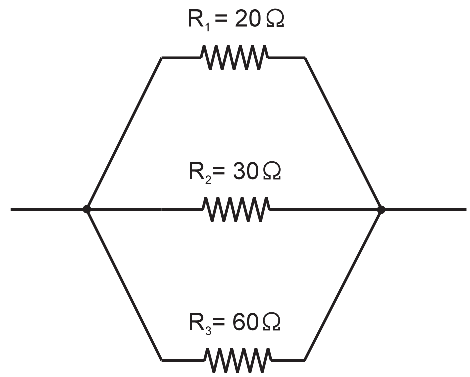


Figura 9

Solução:

Como todos os resistores estão ligados à mesma diferença de potencial, trata-se de uma associação em paralelo. Basta, portanto, aplicar a expressão:

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60}$$

Como o mmc (mínimo múltiplo comum) de R_E, 20, 30 e 60 é $60 \cdot R_E$, temos:

$$60 = 3R_E + 2R_E + R_E$$

$$\mathbf{R_E = 10\,\Omega}$$

6. Determinar a resistência equivalente à associação da Figura 10.

Solução:

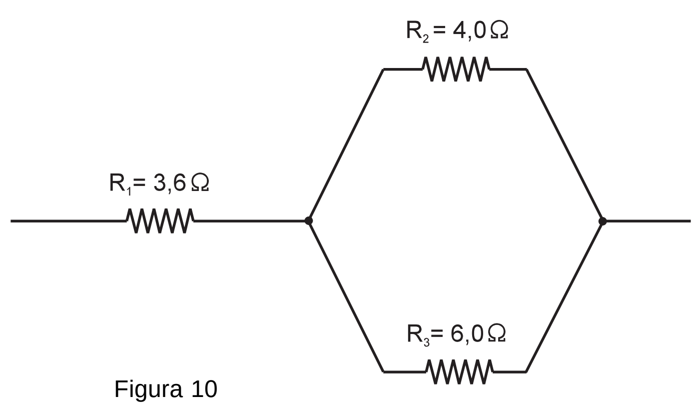


Figura 10

Inicialmente achamos o resistor equivalente (R'_E) a R_2 e R_3, que estão associados em paralelo. Como são apenas dois resistores, podemos utilizar a fórmula simplificada,

$$R_E' = \frac{(R_2 \cdot R_3)}{(R_2 + R_3)}$$

Obtemos então: $R_E' = \frac{(4 \cdot 6)}{(4 + 6)} \Rightarrow R_E' = 2{,}4\Omega$

É fácil ver que, agora, o resistor – R_E – equivalente **a toda a associação**, será a soma de R_1 e R'_E, pois eles estão associados em série. Portanto;

$$R_E = R_1 + R_E'$$
$$R_E = 3{,}6 + 2{,}4$$
$$R_E = 6{,}0\ \Omega$$

Efeito Joule: a transformação da energia elétrica em calor

Você já viu, no nosso estudo da termodinâmica, que o calor é uma forma de energia. Viu, também, que a energia nunca se perde, apenas se transforma ou se converte de uma forma em outra. A partir do instante em que fica sob a ação de um campo elétrico, a multidão de elétrons de um condutor adquire uma energia elétrica e passa a se movimentar num determinado sentido. Embora o campo elétrico, causa desse movimento, se propague a uma velocidade próxima da velocidade da luz, são tantos os choques dessa multidão de elétrons com a estrutura atômica do condutor que o seu movimento torna-se muito lento.

Entretanto, apesar dos choques, a energia elétrica desses elétrons não se perde – a maior parte dela se transforma em calor. Essa transformação, conhecida como **efeito Joule** (em homenagem a James P. Joule, cientista inglês que determinou a relação entre calor e trabalho), é responsável pelas primeiras aplicações práticas das eletricidade. Destacam-se, entre elas, a lâmpada de incandescência, cujo filamento se aquece a temperaturas tão altas que passa a emitir luz, e todos os eletrodomésticos que baseiam o seu funcionamento na produção de calor, do ferro ao chuveiro elétrico.

Para obter a relação entre energia elétrica e calor, vamos, inicialmente, determinar a energia necessária para mover uma carga elétrica Δq no interior de um condutor. Suponha que essa carga elétrica Δq seja positiva, para facilitar nossa dedução, e sofra um deslocamento $\vec{d}$ devido à ação de um campo elétrico $\vec{E}$ (veja Figura 11 **)**. Lembrando a definição de trabalho, pode-se calcular o trabalho τ_E que esse campo elétrico realiza para mover a carga Δq ao longo do deslocamento $\vec{d}$ com a seguinte expressão:

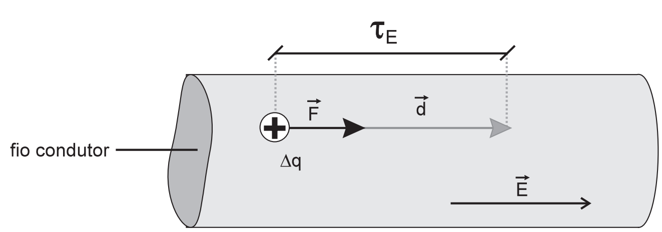


Figura 11. Trabalho do campo elétrico para mover uma carga no interior de um condutor.

$$\tau_E = F \cdot d \cdot \cos\alpha, \text{ mas}$$
$$F = \Delta q \cdot E \quad \text{e} \quad \alpha = 0 \ (\cos 0 = 1), \text{ então:}$$
$$\tau_E = \Delta q \cdot E \cdot d \cdot 1 \ \Rightarrow$$
$$\tau_E = \Delta q \cdot E \cdot d$$

Como vimos na relação entre campo e potencial, o produto E · d é igual à diferença de potencial, V, ao longo do deslocamento d. Logo, o trabalho do campo elétrico pode ser descrito assim:

$$\tau_E = \Delta q \cdot V$$

Sendo o trabalho a medida da energia, essa expressão permite o cálculo da energia gerada pelo campo elétrico. Aqui, no entanto, fica mais simples calcular a potência P desenvolvida nesse deslocamento. Como a potência é dada pela razão $\frac{\tau}{\Delta t}$, devemos levar em conta o intervalo de tempo $\mathbf{\Delta t}$ gasto pela carga $\mathbf{\Delta q}$ para efetuar esse deslocamento. Para isso, dividimos ambos os termos da expressão acima por $\mathbf{\Delta t}$. Temos então:

$$\frac{\tau_E}{\Delta t} = \frac{V \cdot \Delta q}{\Delta t}$$

Mas $\frac{\tau_E}{\Delta t} = P$ e, da definição de corrente elétrica, $\frac{\Delta q}{\Delta t} = i$. Logo:

$$\mathbf{P = V \cdot i}$$

Essa é a expressão da potência fornecida pelo campo elétrico à corrente elétrica i para que as cargas percorram dois pontos de um condutor entre os quais há uma diferença de potencial V.

Lembrando, ainda, a lei de Ohm, em que $V = R \cdot i$, podemos escrever:

$$\mathbf{P = R \cdot i^2}$$

Ou, ainda da lei de Ohm, sendo $i = \frac{V}{R}$, temos:

$$\mathbf{P = \frac{V^2}{R}}$$

Todas essas expressões permitem o cálculo da potência que uma corrente elétrica, percorrendo um condutor ou um resistor, transforma em calor. Em geral, as duas últimas expressões, nas quais aparece o valor da resistência R, são utilizadas para o cálculo da **potência dissipada**, porque o resistor a transforma em calor. Na realidade, como se vê, ela não é perdida, pois a transformação da energia elétrica em calor é largamente utilizada em inúmeros aparelhos elétricos e eletrodomésticos.

Voltemos agora à definição de potência aplicada ao trabalho realizado pelo campo elétrico,

$$P = \frac{\tau_E}{\Delta t}$$

Observe que, a partir dessa expressão, pode-se calcular o trabalho realizado pelo campo elétrico num resistor. Basta multiplicar a potência dissipada pelo intervalo de tempo, ou seja, $\tau_E = P \cdot \Delta t$. Como o trabalho é a medida da energia, $\tau_E = E$, essa expressão permite o cálculo da energia elétrica **E** consumida por um resistor:

$$\mathbf{E} = P \cdot \Delta t$$

Como vimos na Aula 14, as unidades de potência e energia do SI são o watt (W) e o joule (J). Na eletricidade, porém, usam-se ainda outras unidades. Para potência, é comum o uso de um múltiplo do watt, o **quilowatt (kW)**:

1 kW = 1.000 W

Para a medida da energia elétrica, a unidade mais utilizada é uma unidade mista, o **quilowatt-hora (kWh)**: 1 kWh corresponde à energia consumida por um aparelho de potência 1 kW durante 1 h.

Para transformar o quilowatt-hora em joule, unidade de energia do SI, basta transformar suas unidades componentes em unidades do SI. Temos assim:

$$1\ kWh = 1\ kW \cdot 1\ h \Rightarrow 1\ kWh = 1.000\ W \cdot 3.600\ s \Rightarrow 1\ kWh = 3.600.000\ W\ s$$

Mas W s = J, portanto:

$$\mathbf{1\ kWh = 3.600.000\ J \Rightarrow 1\ kWh = 3{,}6 \times 10^6\ J}$$

Passo a passo

7. Uma lâmpada de incandescência (lâmpada comum) tem as seguintes especificações impressas no seu bulbo de vidro: 220 V/60 W.

a) o que significam esses valores?
b) qual a corrente que percorre o filamento?
c) qual a energia que ela consome em um mês, admitindo-se que ela fica ligada 5 horas por dia? Dê a resposta em joules e quilowatts-hora.
d) qual a potência que essa lâmpada vai dissipar se for ligada em 110 V?

Solução:

a) Pelas unidades, podemos identificar as grandezas físicas envolvidas. Assim, 220 V é a diferença de potencial a que essa lâmpada deve ser ligada e 60 W é a potência que essa lâmpada consome **quando ligada naquela diferença de potencial**.

b) Lembrando a relação entre potência e corrente elétrica, $P = V \cdot i$, temos;

$$P = V \cdot i \Rightarrow i = \frac{P}{V} \Rightarrow i = \frac{60}{220}$$

$$\mathbf{i = 0{,}27\ A}$$

c) A energia elétrica consumida pela lâmpada pode ser calculada pela expressão $E = P \cdot \Delta t$. Para determinar a energia em joules é preciso utilizar as unidades no SI, ou seja, a potência em watts e o tempo em segundos. Como a potência já foi dada em watts, basta determinar o tempo, Δt, em segundos. Se a lâmpada fica ligada durante 30 dias, 5 horas por dia, e cada hora tem 3.600 segundos, o valor de Δt será:

$$\Delta t = 30 \cdot 5 \cdot 3.600 \Rightarrow \Delta t = 540.000\ s$$

Para calcular a energia, temos, portanto:

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 60 \cdot 540.000 \Rightarrow E = 32.400.000\ J \quad \text{ou}$$
$$\mathbf{E = 3{,}24 \times 10^7\ J}$$

Para determinar esse valor em quilowatts-hora podemos aplicar a mesma expressão, utilizando a potência em kW e o tempo em horas. Para transformar 60 kW em W, basta lembrar que 1 kW = 1000 W e que, portanto,

$$1W = \frac{1}{1.000}\,kW$$

Então: $P = 60W \Rightarrow P = 60 \cdot \frac{1}{1.000} kW \Rightarrow P = 0{,}06\ kW$

O intervalo de tempo Δt em horas é obtido facilmente. Como a lâmpada funciona 5 h por dia, em 30 dias temos:

$$\Delta t = 30 \cdot 5 \Rightarrow \Delta t = 150\ h$$

Aplicando agora a expressão da energia, obtemos:

$$E = P \cdot \Delta t \Rightarrow E = 0{,}06 \cdot 150$$
$$\mathbf{E = 9\ kWh}$$

Observe que o valor obtido em kWh é bem menor e mais prático do que o valor obtido em joules. É por essa razão que o quilowatt-hora é a unidade mais utilizada.

d) Para resolver esse item, vamos calcular o valor da resistência do filamento da lâmpada.

Para isso vamos utilizar a expressão: $P = \frac{V^2}{R}$

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V^2}{P} \Rightarrow R = \frac{220^2}{60} \Rightarrow R = 807\ \Omega$$

Admitindo que o valor da resistência não varie (o que, a rigor, **não é verdade**), aplicamos novamente a expressão da potência, mas agora utilizando o valor de 110 V para a diferença de potencial.

Teremos então: $P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow P = \frac{110^2}{807} \Rightarrow \mathbf{P = 15W}$

Observe que, embora a diferença de potencial tenha se reduzido apenas **à metade**, a potência dissipada pelo filamento tornou-se **quatro vezes menor**. Isso se explica porque a potência é proporcional $\mathbf{V^2}$, ou seja, ao **quadrado da diferença de potencial**.

8. Um fabricante de ebulidores (aparelho que se mergulha na água para esquentá-la) pretende colocar em seu aparelho uma resistência elétrica capaz de ferver 1 litro de água em 5 minutos. Suponha que esse aparelho vai ser utilizado ao nível do mar, em lugares onde a tensão (diferença de potencial) é de 127 V e temperatura ambiente é, em média, de 25 ºC. Qual o valor da resistência elétrica que ele deve usar?
Dados: densidade da água: $1{,}0\ g/cm^3$
calor específico da água: $1{,}0\ cal/g \times ºC$
equivalente mecânico do calor: 1,0 cal = 4,2 J

Solução:

Inicialmente deve-se calcular a energia necessária para aquecer 1 litro de água de 25 ºC a 100 ºC (temperatura de ebulição da água ao nível do mar). Sabemos, pela termodinâmica, que essa energia é a quantidade de calor, Q, absorvida pela água, dada pela expressão $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$, onde:

m = 1.000g (massa de 1 litro de água, pois $1\ell = 1.000\ cm^3$ e a densidade da água é $1,0\ g/cm^3$)

c (calor específico da água) = 1,0 cal/g °C

$\Delta t = 100\ °C - 25\ °C = 75\ °C$

Então:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 1.000 \cdot 1,0 \cdot 75 \Rightarrow Q = 75.000\ cal$$

Mas 1,0 cal = 4,2 J. Portanto:

$$Q = 75.000\ cal \Rightarrow Q = 75.000 \cdot 4,2\ J \Rightarrow Q = 315.000\ J$$

Essa é a energia necessária para aquecer a água até a fervura. Essa energia corresponde ao trabalho do campo elétrico, τ_E. Portanto, a potência necessária para fornecer essa energia, num intervalo de tempo $\Delta t = 5\ min = 300\ s$, será:

$$P = \frac{\tau_E}{\Delta t} \Rightarrow P = \frac{315.000}{300} \Rightarrow P = 1.050\ W$$

Lembrando que a tensão local é V = 127 V , temos:

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V^2}{P} \Rightarrow R = \frac{127^2}{1.050}$$

$$\mathbf{R = 15,4\ \Omega}\ \text{(aproximadamente)}$$

É interessante lembrar que a aproximação, aqui, não se refere apenas ao resultado da divisão. Ela está, também, relacionada ao fato de que, sendo uma resistência destinada ao aquecimento, seu valor varia com a temperatura.

Rendimento

Vamos repetir aqui um trechinho da nossa aula 14, em que falávamos de rendimento (o símbolo de rendimento será substituído aqui pela letra grega eta, η, porque o r minúsculo, utlilizado anteriormente, será usado para simbolizar outra grandeza). Sabemos que há carros que consomem menos combustível do que outros, e até que um mesmo carro, melhor regulado, pode consumir menos. Da mesma forma, uma lâmpada fluorescente ilumina mais do que uma lâmpada comum de mesma potência. Isso vale também para o organismo humano. Há pessoas que engordam mesmo comendo pouco, e outras que comem muito e não engordam. Em outras palavras, há máquinas que aproveitam melhor o combustível que consomem. Dizemos que essas máquinas têm um **rendimento** maior. Define-se o rendimento η de uma máquina pela razão entre a **potência útil**, P_U, que ela fornece, e a **potência total**, P_T, que ela consome, ou seja:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T}$$

Pode-se escrever essa mesma expressão na forma de porcentagem. Teremos então:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \cdot 100\%$$

Como já dissemos anteriormente, se uma máquina fosse perfeita, o que não existe, ela teria rendimento η **= 1,0** ou η **= 100%**, porque a potência útil seria igual à potência total: ela aproveitaria tudo o que consome. Isso não acontece porque toda máquina gasta parte da energia que recebe para o seu funcionamento. Além disso, sempre há perdas. É impossível, por exemplo, eliminar completamente o atrito, que acaba se transformando em calor. E o calor gerado por atrito raramente é o objetivo de uma máquina. Esse calor é, em geral, um efeito indesejável, mas inevitável. Por essa razão, o rendimento de qualquer máquina será sempre um valor menor que 1,0 ou que 100%."

Em relação aos aparelhos elétricos, todas essas afirmações são igualmente verdadeiras. Não há como evitar o efeito Joule que, com exceção dos aparelhos que baseiam seu funcionamento no aquecimento, provoca a perda de uma parcela substancial da energia. Nas lâmpadas de incandescência, por exemplo, 90% da energia fornecida à lâmpada são transformados em calor, ou seja, apenas 10% da energia consumida são transformados ou aproveitados sob a forma de luz. Portanto, o rendimento de uma lâmpada incandescente, no que se refere à energia luminosa que ela fornece, é de aproximadamente 10%. É importante lembrar que a potência que as usinas hidrelétricas nos fornecem é a potência total, e é por ela que pagamos a conta todo mês.

Passo a passo

9. Suponha que o ebulidor do exemplo anterior tenha um rendimento de 70%. Qual a potência total que esse ebulidor consome?

Solução:

O cálculo da potência do ebulidor estava relacionado ao trabalho que esse ebulidor **fornecia**, portanto o valor obtido de 1.050 W se refere à **potência útil**. Portanto P_U = 1.050 W. O rendimento é η = 70%, que pode também ser escrito como η = 0,7. Temos então:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T} \Rightarrow P_T = \frac{P_U}{\eta} \Rightarrow P_T = \frac{1.050}{0,7} \Rightarrow P_T = 1.500\ \text{W}$$

$$\mathbf{P_T = 1.500\ W}$$

É interessante observar que, levando em conta o rendimento, a resistência do ebulidor, para fornecer os 1.050 W à água, tem de consumir 1.500 W. Nesse caso, o valor da resistência deve ser recalculado utilizando-se o valor da potência total, 1.500 W. Obtemos, então, aproximadamente, R = 10,8 Ω.

Você pode achar estranho que, para produzir uma potência **maior**, o valor da resistência elétrica seja **menor**. Isso acontece porque, nesse caso, a potência é **inversamente proporcional** à resistência.

Basta examinar a expressão $P = \dfrac{V^2}{R}$.

É fácil verificar que, para uma mesma diferença de potencial V, quanto menor a resistência R, maior será o valor da potência P.

Vimos nesta aula que a corrente elétrica que percorre um condutor depende da sua resistência elétrica. A resistência elétrica, por sua vez, depende das características desse condutor: comprimento, espessura (área de seção transversal) e resistividade do material de que é feito o condutor. Vimos ainda que o movimento da corrente elétrica no condutor dissipa calor – um fenômeno conhecido como efeito Joule, que dá nome à nossa aula. É esse calor que aquece a água nos chuveiros elétricos, faz brilhar o filamento das lâmpadas incandescentes e, às vezes, chega a "queimar" um fusível doméstico – ele esquenta tanto que derrete. Foi o que ocorreu na nossa história do banho interrompido.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- a lei de Ohm e a definir resistência elétrica;
- o que são resistores lineares e não lineares;
- como se associam os resistores, em série e em paralelo;
- o que é o efeito Joule e qual o rendimento de dispositivos elétricos.

Mas restam ainda muitas perguntas sem resposta. Não sabemos ainda de onde vem a corrente elétrica – como ela é produzida? Como ela circula ou se movimenta ? E, principalmente, não sabemos ainda por que na casa dos nossos amigos não se pode tomar banho com a televisão ligada... Esses serão os assuntos das nossas próximas aulas.

Mãos à obra

Exercício 1

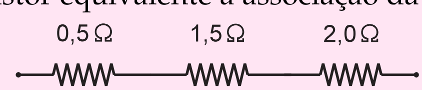
Um fio condutor, ligado a uma diferença de potencial de 6 V, é percorrido por uma corrente elétrica de 1,5 A. Qual a resistência elétrica desse fio?

Exercício 2

Determine a resistência elétrica de um fio de alumínio de 25 m de comprimento e 0,75 mm^2 de área de seção transversal. Veja a resistividade do alumínio na tabela da página 165.

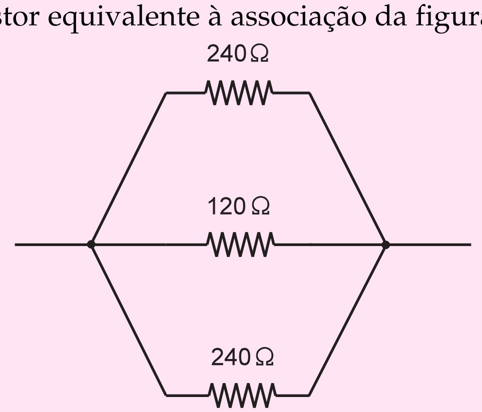
Exercício 3

Determine o resistor equivalente à associação da figura abaixo.



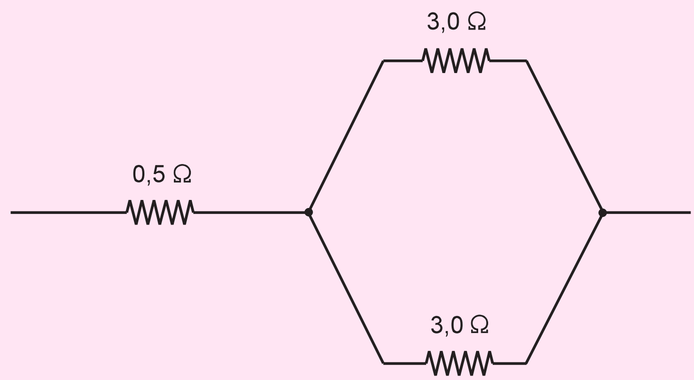
Exercício 4

Determine o resistor equivalente à associação da figura abaixo.



Exercício 5

Determine o resistor equivalente à associação da figura abaixo.



Exercício 6

Uma lâmpada de incandescência (lâmpada comum) tem as seguintes especificações impressas no seu bulbo de vidro: 110 V/40 W.

a) o que significam esses valores?

b) qual a corrente que percorre o filamento?

c) qual a energia que ela consome em um mês, admitindo-se que ela fica ligada 5 horas por dia? Dê a resposta em joules e quilowatts-hora.

d) qual a potência que essa lâmpada vai dissipar se for ligada em 127V, supondo que a sua resistência permaneça constante?

Exercício 7

Um fabricante de ebulidores pretende colocar no seu aparelho uma resistência elétrica capaz de ferver 1 litro de água em 2 minutos. Suponha que esse aparelho vai ser utilizado ao nível do mar, em lugares onde a tensão (diferença de potencial) é de 220 V e a temperatura ambiente é, em média, de 20 ºC. Qual o valor da resistência elétrica que ele deve usar?

Dados: densidade da água: 1,0 g/cm^3
calor específico da água: 1,0 cal/g ºC
equivalente mecânico do calor: 1,0 cal = 4,2 J

Exercício 8

Suponha que o ebulidor do exercício 7 tenha um rendimento de 80%. Pede-se:

a) qual a potência total que esse ebulidor consome?

b) qual deveria ser o valor da resistência, nessas condições?

AULA

42

Ele deu... a luz

PARA COMEÇAR

Era noite e chovia torrencialmente. Roberto, prevenido, deu a sua ordem preferida:

– Desliga a televisão que é perigoso, está trovejando!

Mal ele acabou a frase, surgiu um clarão, seguido de um estrondo violento. Tudo ficou às escuras, o bairro inteiro. Seguiu-se aquela agitação típica dessas ocasiões. Todo mundo procurando fósforo, isqueiro, vela, qualquer coisa que produzisse uma claridadezinha, pelo menos. Mas, como sempre, nessas horas ninguém acha nada. Até que um clarão iluminou a casa. Era Roberto, sempre prevenido, com uma lanterna na mão.

– Olha aí, mãe – gritou o garotão debochado. – O pai deu a luz!

– É, queria ver ele ligar o chuveiro com essa lanterninha, que eu estou querendo tomar um banho – provocou a mãe, sempre na oposição.

Ernesto não perdeu a deixa:

– E aí, pai, mostra pra ela!

– Você já viu chuveiro elétrico a pilha? É impossível, filho! A gente ia precisar de uma pilha do tamanho desta casa!

A resposta não foi muito convincente. Ernesto exigiu maiores esclarecimentos. Roberto não se apertou muito. Mostrou uma pilha de relógio, pequenininha, as pilhas pequenas do rádio e as maiores da lanterna. O tamanho da pilha, explicou, dependia do consumo de energia exigido pelo aparelho. E arrematou a conversa com uma argumentação definitiva:

– Pilha é que nem bicho. Quanto maior, mais forte!

Como nas ocasiões anteriores, as explicações de Roberto estavam corretas, embora nem sempre sua linguagem seja muito precisa. As pilhas, de fato, têm a sua “força” relacionada com o seu tamanho. Mas a palavra “força”, embora aqui também seja usada costumeiramente pelos físicos, não expressa bem o papel que a pilha desempenha.

Na realidade, as pilhas não fazem força. Elas transformam a energia originária de reações químicas que ocorrem entre as substâncias nela contidas em energia elétrica. Assim como as baterias e acumuladores, elas são **geradores**, dispositivos que transformam outras formas de energia em energia elétrica. O nome gerador, como se vê, também não é fisicamente correto – gerar quer dizer criar, não transformar – , mas continua a ser usado por razões históricas, por tradição.

Existem dispositivos que funcionam no sentido oposto ao dos geradores, isto é, que transformam a energia elétrica em outra formas de energia. É o caso dos motores que transformam a energia elétrica em energia mecânica, por exemplo, ou do rádio e da televisão, que a transformam em luz e som. Esses dispositivos ou aparelhos são chamados de **receptores**. Nesta aula vamos estudar os geradores e receptores.

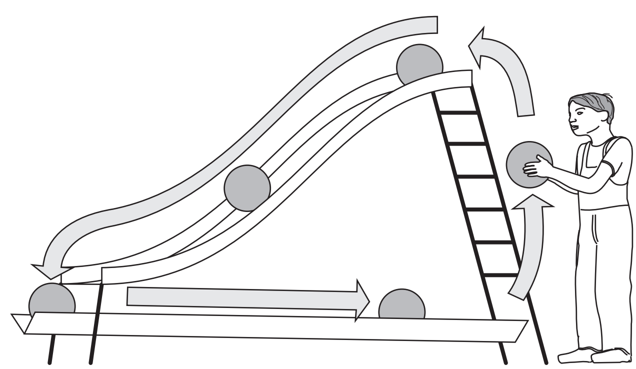
Fique ligado

Geradores

Gerador, como já foi dito, é qualquer dispositivo que transforma outras formas de energia em energia elétrica. Por enquanto, não vamos nos preocupar com o processo de transformação de energia, apenas com os seus resultados. Em outras palavras, não vamos estudar como uma pilha transforma a energia química em energia elétrica. Sabemos que isso ocorre, e esse vai ser o nosso ponto de partida.

Para você entender como essa transformação ocorre, vamos fazer uma analogia. Suponha que uma criança coloque algumas bolas, de uma em uma, na parte mais alta de um escorregador. E que, à medida que as bolas vão chegando ao chão, a criança as recoloque lá em cima. É fácil ver que se estabelece uma "corrente de bolas" no escorregador. Veja a Figura 1. É mais ou menos isso o que um gerador faz. Ele fornece energia à cargas elétricas (as bolas, na nossa analogia) estabelecendo uma diferença de potencial entre seus terminais (o que equivale à diferença de altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do escorregador). Em outras palavras, o gerador realiza, sobre cada carga elétrica **q**, um trabalho τ, elevando o seu potencial elétrico.

Figura 1
Observe que a criança fornece energia às bolas para que a corrente se mantenha. Esse é o papel do gerador.



A relação entre o trabalho realizado sobre a carga e o valor dessa carga é chamada de **força eletromotriz (fem)** do gerador, cujo símbolo é ε. Define-se, portanto, força eletromotriz pela relação:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{q}$$

A unidade da fem é o **volt**, a mesma da diferença de potencial, pois ambas as grandezas são definidas a partir da razão entre o **joule**, unidade de trabalho, e o **coulomb**, unidade de carga. Na realidade, força eletromotriz é um nome inadequado, utilizado até hoje tanto por tradição como pela falta de um nome melhor.

A força eletromotriz de um gerador não é uma força. É a diferença de potencial que ele poderia fornecer se não houvesse perdas dentro do próprio gerador. Como isso é inevitável (o gerador também oferece uma resistência à passagem da corrente), a diferença de potencial fornecida é sempre menor do que aquela originária do trabalho do gerador. Por essa razão, a representação simbólica de um gerador costuma estar acompanhada de um pequeno resistor. Veja a Figura 2. Para distinguir a diferença de potencial que o gerador fornece, de fato, da diferença de potencial que ele poderia fornecer em condições ideais, denomina-se esta última de força eletromotriz.

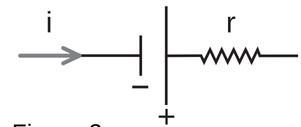


Figura 2
Representação simbólica de um gerador. O traço maior corresponde ao pólo positivo. Observe que o sentido da corrente deve estar presente nesta representação.

Essas considerações nos permitem escrever a equação do gerador, a partir da lei de Ohm. Vamos chamar de **r** a resistência interna do gerador. Se ele for percorrido por uma corrente elétrica **i**, de acordo com a lei de Ohm, haverá uma queda na diferença de potencial entre os seus terminais, correspondente ao produto **r · i**. Assim, a diferença de potencial **V** que um gerador fornece nos seus terminais será a sua força eletromotriz ε menos a diferença de potencial correspondente ao produto **r · i**. Teremos então:

$$V = \varepsilon - r \cdot i$$

Essa expressão é conhecida como **equação do gerador**. Pode-se notar que numa situação ideal, em que não haja perdas no gerador, ou seja, quando a sua resistência interna r for nula, teremos $\mathbf{V} = \varepsilon$. Embora isso seja impossível, essa é uma condição que costuma aparecer nos problemas para simplificar sua solução.

Passo a passo

1. Uma pilha tem força eletromotriz de 1,5 V e resistência interna de 0,5 Ω quando percorrida por uma corrente elétrica de 0,4 A. Determine, nessas condições, a diferença de potencial entre seus terminais.

Solução:

Basta aplicar a equação do gerador, uma vez que o que se quer é a diferença de potencial V entre seus terminais. Portanto:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}5 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}2 \Rightarrow \mathbf{V = 1{,}3V}$$

2. Vamos admitir que a resistência interna de uma bateria de fem $\varepsilon = 9{,}0$ V seja constante e valha $r = 1{,}5\,\Omega$.

a) a partir da equação do gerador, preencha a tabela abaixo:

V (volts)							
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) com os dados da tabela, construa o gráfico V (volts) × i (ampères)

Solução:

a) Aplicando a equação do gerador, temos: $V = 9{,}0 - 1{,}5 \cdot i$

Fazendo a substituição pelos valores de i sugeridos, completamos a tabela:

V (volts)	9,0	7,5	6,0	4,5	3,0	1,5	0
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) Colocando os valores num gráfico, obtemos uma reta de inclinação negativa. Isso significa que, à medida que a intensidade da corrente aumenta, diminui a tensão ou diferença de potencial fornecida pela bateria. Como você vê, a resistência interna é um fator que limita a utilização de uma pilha ou bateria.

Esse gráfico costuma ser chamado de curva característica do gerador. É fácil mostrar também que o coeficiente angular dessa reta é numericamente igual à resistência interna r do gerador

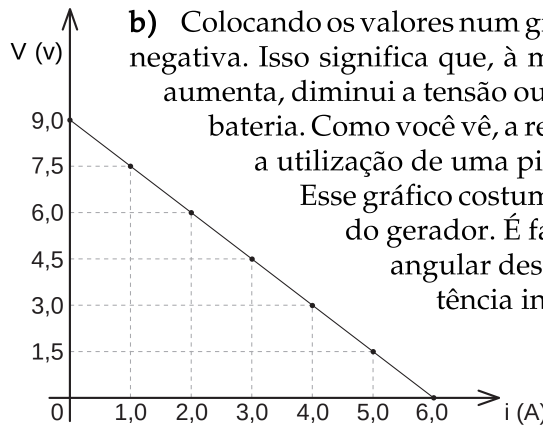


Figura 3. Gráfico V × i

Potência de um gerador

Se você reparar com atenção, vai notar que todas as pilhas – das pequeninas pilhas de relógio às pilhas maiores, usadas em lanternas – fornecem sempre a mesma diferença de potencial, 1,5 volts. (Existem baterias de 9,0 volts que, na verdade, são uma associação de 6 pilhas de 1,5 volts ligadas em série). Por que, então, essa diferença de tamanho? Por que não colocamos uma pilha de relógio numa lanterna, se ela fornece a mesma diferença de potencial que a pilha grande?

A resposta é simples: para que um aparelho elétrico funcione, não basta ligá-lo à diferença de potencial correta; é preciso que ele seja percorrido, também, pela corrente elétrica adequada. Em outras palavras, é preciso fornecer a ele a potência elétrica necessária para que ele possa funcionar, para a qual foi projetado.

Um relógio digital de pulso, por exemplo, precisa de uma potência de cerca de 30 microwatts ($30 \cdot 10^{-6}$ watts) para funcionar. Lembrando a aula passada, a relação entre potência, diferença de potencial e corrente elétrica é $P = V \cdot i$. Portanto, a corrente de que esse relógio precisa é:

$$P = V \cdot i \Rightarrow i = P \# V \Rightarrow i = 30 \cdot 10^{-6} \# 1{,}5 \Rightarrow i = 2{,}0 \cdot 10^{-6}\ A$$

Como se vê, esse relógio precisa de uma corrente muito pequena para funcionar, de 0,000002 A. Para fornecer essa corrente, basta uma pilha pequena. No caso de uma lanterna comum, a potência necessária para acender uma lâmpada é, em geral, da ordem de alguns watts (assim como nos relógios, esses valores variam muito). Suponha que essa potência seja de 3 watts. Repetindo os cálculos anteriores, temos:

$$P = V \cdot i \Rightarrow i = P \# V \Rightarrow i = 3 \# 1{,}5 \Rightarrow i = 2{,}0\ A$$

Portanto, a corrente elétrica necessária para acender uma lâmpada pode ser até 1 milhão de vezes maior que a necessária para o funcionamento do relógio. Note que a corrente elétrica depende de partículas materiais, os elétrons, e por isso depende da quantidade ou massa das substâncias químicas contidas na pilha, o que não acontece com a diferença de potencial. Por essa razão, a diferença de potencial não depende do tamanho da pilha, mas a corrente depende. Quanto maior a corrente elétrica que uma pilha deve fornecer, maior deve ser o seu tamanho. Como você vê, há, de fato, uma relação direta entre o tamanho da pilha e a sua "força", como foi dito na introdução.

Análise da equação do gerador – Rendimento

Muitas vezes, uma análise matemática pode nos dar indicações físicas muito importantes. É o que vamos fazer agora. Inicialmente, reescrevemos a equação do gerador:

$$V = \varepsilon - r \cdot i$$

Agora, multiplicamos os termos dessa equação por i. Obtemos:

$$V \cdot i = \varepsilon \cdot i - r \cdot i^2$$

Arrumando os termos de forma mais conveniente, temos:

$$\boldsymbol{\varepsilon \cdot i = V \cdot i + r \cdot i^2}$$

Lembrando a aula passada, notamos que o termo $\mathbf{V \cdot i}$ é a expressão da potência fornecida à corrente elétrica e que $\mathbf{r \cdot i^2}$ é a expressão da potência dissipada pela resistência interna do gerador. Portanto, o termo $\boldsymbol{\varepsilon \cdot i}$ é a soma da potência fornecida pelo gerador à corrente elétrica mais a potência dissipada devido à sua resistência interna. Em outra palavras, se a função do gerador é produzir uma corrente elétrica, $\mathbf{V \cdot i}$ é a **potência útil** por ele fornecida e $\boldsymbol{\varepsilon \cdot i}$ é a **potência total** desenvolvida pelo gerador. O valor $\mathbf{r \cdot i^2}$ é, como já afirmamos, a potência dissipada, ou seja, a diferença entre o a potência total e potência útil. Em outras palavras, temos:

$$\mathbf{P_{TOTAL} = P_{ÚTIL} + P_{DISSIPADA}}$$

A partir dessa relação, podemos obter uma expressão para o rendimento η de um gerador. Basta lembrar a aula passada, em que retomamos a definição de rendimento:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T}$$

Como $P_U = V \cdot i$ e $P_T = \varepsilon \cdot i$, temos:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon}$$

É interessante notar que a tensão ou diferença de potencial fornecida pelo gerador, V, é sempre menor que a sua força eletromotriz ε, o que mais uma vez mostra que o rendimento é sempre menor que a unidade.

Passo a passo

3. Uma pilha tem fem de $\varepsilon = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}4\,\Omega$. Supondo que a sua resistência interna permaneça constante, determine a potência total, a potência útil, a potência dissipada e o rendimento dessa pilha quando percorrida por uma corrente elétrica

a) $i = 0{,}5$ A
b) $i = 3{,}0$ A

Solução:

Em ambos os casos, basta aplicar as relações acima deduzidas. A potência útil poderia ser calculada pela diferença entre a potência total e a potência dissipada. Aqui, no entanto, preferimos determiná-la pela diferença de potencial V fornecida pelo gerador em cada caso.

a) $P_T = \varepsilon \cdot i \Rightarrow P_T = 1{,}5 \cdot 0{,}5 \Rightarrow \mathbf{P_T = 0{,}75\ W}$

Para determinar a potência útil, vamos aplicar a equação do gerador e obter o valor de V:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 0{,}5 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 1{,}3\ \text{V}$$

Podemos agora determinar a potência útil:

$$P_U = V \cdot i \Rightarrow P_U = 1{,}3 \cdot 0{,}5 \Rightarrow \mathbf{P_U = 0{,}65\ W}$$

A potência dissipada pode ser calculada diretamente:

$$P_D = r \cdot i^2 \Rightarrow P_D = 0{,}4 \cdot 0{,}5^2 \Rightarrow \mathbf{P_D = 0{,}10\ W}$$

Observe que a relação $P_T = P_U + P_D$ é verificada.
O rendimento será:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} \Rightarrow \frac{1{,}3}{1{,}5} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}87} \text{ ou } \eta = \mathbf{87\ \%}$$

b) Analogamente ao item a, obtemos:

$$P_T = \varepsilon \cdot i \Rightarrow P_T = 1{,}5 \cdot 3{,}0 \Rightarrow \mathbf{P_T = 4{,}5\ W}$$

Para determinar a potência útil, calculamos o valor de V:

$$V = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow V = 1{,}5 - 3{,}0 \cdot 0{,}4 \Rightarrow V = 0{,}3\ \text{V}$$
$$P_U = V \cdot i \Rightarrow P_U = 0{,}3 \cdot 3{,}0 \Rightarrow \mathbf{P_U = 0{,}90\ W}$$

A potência dissipada pode ser calculada diretamente:

$$P_D = r \cdot i^2 \Rightarrow P_D = 0{,}4 \cdot 3{,}0^2 \Rightarrow \mathbf{P_D = 3{,}60\ W}$$

O rendimento será:

$$\eta = \frac{V}{\varepsilon} \Rightarrow \eta = \frac{0{,}3}{1{,}5} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}2} \text{ ou } \eta = \mathbf{20\ \%}$$

É interessante notar como a **mesma pilha** pode ter rendimentos tão diferentes, dependendo da corrente que passa por ela. É por isso que, às vezes, uma pilha usada que não funciona mais para uma lanterna pode ainda ser útil para um rádio, por exemplo. Isso ocorre porque o rádio, em geral, utiliza correntes bem menores que as lanternas.

Receptores

Assim como os geradores transformam outras formas de energia em energia elétrica, existem dispositivos ou aparelhos que desempenham o papel oposto, ou seja, transformam a energia elétrica em outras formas de energia. Os exemplos mais comuns são os motores, que transformam a energia elétrica em energia mecânica, os inúmeros aparelhos eletrônicos que transformam a energia elétrica em energia sonora e luminosa e os acumuladores ou pilhas recarregáveis, que transformam a energia elétrica em energia química. Em todos esses casos, a força eletromotriz atua no sentido oposto. Não é o dispositivo ou equipamento que realiza trabalho sobre as cargas elétricas: são as cargas elétricas que realizam trabalho sobre o dispositivo. É a corrente elétrica que gera o movimento do eixo no motor; da mesma forma, é ela que aciona os componentes eletrônicos que geram luz e som nos aparelhos de som e imagem e desencadeia as reações químicas que recarregam os acumuladores ou pilhas recarregáveis. É importante lembrar que, assim como nos geradores, a corrente elétrica também percorre os receptores e depende da resistência interna de seus componentes. Por isso, costuma-se adotar para os receptores um símbolo semelhante ao do gerador, invertendo-se apenas o sentido da corrente. Veja a Figura 4.

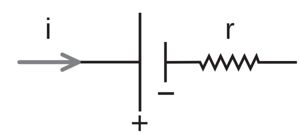


Figura 4
Representação simbólica de um receptor. Observe que, na prática, a única diferença dessa representação, em relação ao gerador, é o sentido da corrente.

A diferença entre os símbolos do gerador e do receptor expressa claramente a diferença no papel exercido pela corrente ou pelas cargas elétricas nesses dois dispositivos. O gerador realiza trabalho sobre as cargas, daí a definição de fem:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{q}$$

No receptor, são as cargas que realizam trabalho. Por isso, define-se uma grandeza análoga à força eletromotriz, chamada de **força contra-eletromotriz** (**fcem**), que representaremos por ε':

$$\varepsilon' = \frac{\tau}{q}$$

As definições são iguais, porque as grandezas envolvidas são iguais, mas muda o agente que realiza o trabalho. A unidade da fcem também é a mesma, o volt. Analogamente à equação do gerador, pode-se também escrever uma **equação do receptor**. Chamando de **r**' a resistência interna do receptor, a diferença de potencial ou tensão, V, nos terminais de um receptor, será dada por:

$$\mathbf{V = \varepsilon' + r' \cdot i}$$

A interpretação física dessa expressão é simples: a diferença de potencial nos terminais de um receptor equivale ao trabalho que as cargas realizam sobre ele (é o fator ε') mais a perda devida à sua resistência interna (o fator **r' · i**).

É importante notar que um dispositivo que transforma a energia elétrica **apenas em calor** não é considerado um receptor. Ele não tem força contra-eletromotriz – é, simplesmente, um resistor.

Potência e rendimento em um receptor

Se multiplicarmos ambos os termos da equação do receptor por i, como fizemos com a equação do gerador, podemos fazer um estudo matemático das relações de potência num receptor:

$$V \cdot i = \varepsilon' \cdot i + r' \cdot i^2$$

Uma análise física dessa expressão mostra que o primeiro termo, $\mathbf{V \cdot i}$, é a potência total fornecida ao receptor. O segundo termo, $\varepsilon' \cdot \mathbf{i}$, é a potência útil consumida pelo receptor. O último termo, $\mathbf{r' \cdot i^2}$, é a potência dissipada devido à sua resistência interna. Em outras palavras, no receptor a relação de potências é a mesma do gerador:

$$P_{TOTAL} = P_{ÚTIL} + P_{DISSIPADA}$$

invertendo-se, porém, as expressões de cálculo da potência útil e da potência total. A expressão do rendimento:

$$\eta = \frac{P_U}{P_T}$$

aplicada ao receptor, será, também, invertida. Teremos, portanto:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V}$$

Como a tensão aplicada ao receptor é sempre maior que a sua fcem, aqui também, como em todo rendimento, o valor de η é sempre menor que 1,0.

Passo a passo

4. Um motor de brinquedo de fcem 2,0 V só funciona dentro de suas especificações quando submetido a uma tensão de 3,0 V e é percorrido por uma corrente elétrica de 0,8 A. Determine a resistência interna e o rendimento desse motor.

Solução:

Para determinar a resistência interna do receptor, basta aplicar a sua equação:

$$V = \varepsilon' + r' \cdot i \Rightarrow 3{,}0 = 2{,}0 + r' \cdot 0{,}8 \Rightarrow \mathbf{r' = 1{,}25\,\Omega}$$

Aplicando a expressão do rendimento para o receptor, temos:

$$\eta = \frac{\varepsilon'}{V} \Rightarrow \eta = \frac{2{,}0}{3{,}0} \Rightarrow \eta = \mathbf{0{,}67} \text{ ou } \eta = \mathbf{67\%}$$

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o conceito de gerador e de força eletromotriz;
- como calcular a potência de um gerador;
- a equação do gerador e o cálculo do seu rendimento;
- o conceito de receptor, sua equação e rendimento.

Nas três últimas aulas estudamos a corrente elétrica, os resistores e, agora, os geradores e receptores. Estamos, portanto, em condições de reunir todos esses elementos em conjuntos, os circuitos elétricos. Um circuito elétrico é um caminho fechado pelo qual as cargas elétricas se movimentam, realizam trabalho e perdem energia nos receptores e resistores e recebem energia de volta nos geradores, repetindo o ciclo. Nossas casas têm sempre um ou mais circuitos elétricos ligados à rede de transmissão da companhia de eletricidade, que é também um enorme circuito elétrico. Esse circuito imenso é o que nos liga a gigantescos geradores localizados, às vezes, a centenas de quilômetros de distância – as **usinas elétricas**.

Há circuitos elétricos extraordinariamente complexos, como aqueles dos aparelhos eletrônicos e computadores, por exemplo. Nós vamos estudar alguns circuitos mais simples. Felizmente, os circuitos domésticos são relativamente simples, e nós poderemos saber, enfim, por que na casa dos nossos amigos não era possível assistir televisão com o chuveiro ligado. Este será o assunto da próxima aula.

Exercício 1

Uma bateria tem uma força eletromotriz de 9,0 V e resistência interna de 0,5 Ω quando percorrida por uma corrente elétrica de 0,8 A. Determine, nessas condições, a diferença de potencial entre seus terminais.

Exercício 2

No exercício anterior, qual seria a máxima corrente que essa bateria poderia fornecer, supondo que a sua resistência interna seja constante?

Exercício 3

Vamos admitir que a resistência interna de uma pilha de fem $\varepsilon = 1{,}5$ V seja constante e valha $r = 0{,}25\ \Omega$.

a) a partir da equação do gerador, preencha a tabela abaixo:

V (volts)							
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b) com os dados dessa tabela, construa o gráfico V (volts) $\times$ i (ampères).

Exercício 4

Uma pilha tem uma fem de $\varepsilon = 1{,}5$ V e resistência interna $r = 0{,}2\ \Omega$. Supondo que a resistência interna permaneça constante, determine a potência total, a potência útil, a potência dissipada e o rendimento dessa pilha quando percorrida por uma corrente elétrica

a) $i = 0{,}4$ A

b) $i = 5{,}0$ A

Exercício 5

Um motor de brinquedo de fcem 6,0 V só funciona dentro de suas especificações quando submetido a uma tensão de 9,0 V e é percorrido por uma corrente elétrica de 1,2 A. Determine a resistência interna desse motor.

Exercício 6

Nas condições do problema anterior, qual é o rendimento do motor?

AULA

43

Deu curto!

PARA COMEÇAR

Como o nosso assunto é a eletricidade, poderíamos dizer que a história do banho interrompido serviu para melhorar a ligação entre o pai e o filho. Ernesto, percebendo que aquele era um assunto de que seu pai gostava e do qual entendia um pouco, sempre que podia puxava a conversa para esse lado:

– Pai, você viu o incêndio que mostraram ontem no jornal? O bombeiro disse que deve ter sido por causa de um curto-circuito na instalação elétrica. Que negócio é esse?

– Decerto foi algum fio descascado que encostou em outro. Aí dá curto mesmo! – respondeu Roberto, categoricamente.

– Mas você não disse o que é curto – desafiou Ernesto.

– Curto é porque encurta, é claro!

Notando que a explicação também tinha sido muito curta, Roberto foi buscar uma pilha grande, nova, e um pedacinho de fio com as pontas descascadas. Apertou uma das pontas do fio num dos pólos da pilha e começou a raspar o outro pólo com a outra ponta, fazendo sair pequenas faíscas.

– Olha aqui, filho. Se aqui, nesta pilha, esse fiozinho curto já faz faísca, imagine aí numa tomada. Sai até fogo! Isso é que é curto – concluiu Roberto, vitorioso.

– Mas e o circuito? – arriscou Ernesto.

– O circuito é esse fiozinho aqui passando pela pilha. Como ele é muito curto, puxa muita corrente. Por isso que sai faísca e até fogo – arrematou Roberto, saboreando de antemão o elogio que seu político filho certamente faria:

– Legal, pai, você devia ser professor de Física...

As explicações paternas estão de certo modo corretas, mas nem sempre suas palavras são as mais adequadas. Na realidade, não é o fio que, por ser muito curto, "puxa" muita corrente da pilha. É a pilha que, como qualquer gerador, produz uma corrente elétrica sempre que nos seus pólos é ligado um conjunto de elementos que forme um caminho fechado. Esse caminho fechado é um circuito elétrico.

Os elementos são resistores e receptores ligados por fios condutores, que têm apenas a função de conduzir a corrente. Um fio curto, como o próprio nome indica, produz um curto-circuito porque é um percurso de baixa resistência elétrica. E, como vimos na Aula 41, se a resistência elétrica diminui a corrente elétrica aumenta, podendo atingir valores de alta intensidade e ter conseqüências desastrosas. Mas isso nós vamos ver depois. Os circuitos elétricos são o assunto desta aula.

Circuitos elétricos

Um circuito é, a rigor, uma linha fechada que contorna ou circunda uma região. Em geral, todo caminho que começa e termina no mesmo lugar é um circuito, como os circuitos de corridas de automóvel. Quando ligamos um fio condutor ou um conjunto de dispositivos elétricos aos pólos de uma pilha, estabelecemos um caminho que possibilita a passagem da corrente elétrica de um pólo ao outro, isto é, fazemos com que ela percorra um circuito elétrico.

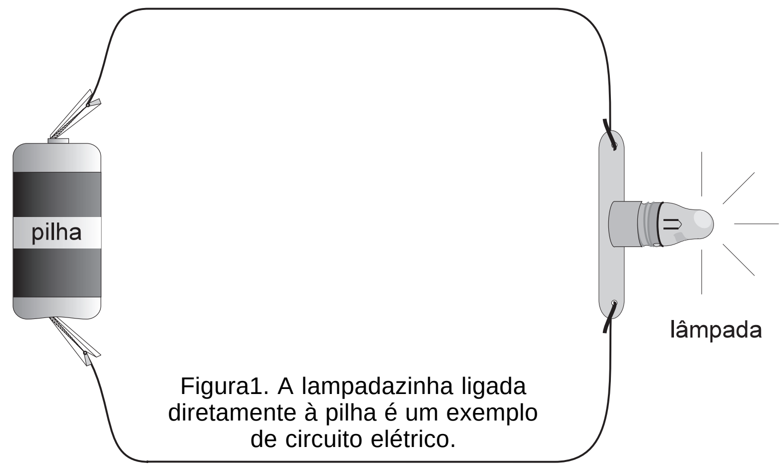


Figura1. A lampadazinha ligada diretamente à pilha é um exemplo de circuito elétrico.

Existem circuitos elétricos extremamente simples – uma pequena lâmpada de lanterna ligada diretamente aos pólos de uma pilha, por exemplo. Outros são muito complexos, como os de uma placa de computador.

No nosso curso vamos estudar apenas alguns circuitos elétricos simples. Costuma-se chamar de circuito simples o circuito em que todos os elementos estão dispostos em série, sem ramificações. Nesses casos, como só há um caminho para o movimento das cargas elétricas, todos os elementos do circuito são percorridos pela mesma corrente. Por isso, a equação que fornece o valor dessa corrente costuma ser chamada de **equação do circuito**.

Para estabelecer essa equação, basta percorrer todo o circuito, somando, algebricamente, todas as variações de potencial que ocorrem em cada um de seus elementos. Quando chegarmos ao fim do circuito, estaremos no mesmo potencial de início. Portanto, essa soma deve ser sempre nula.

Para entender melhor essa afirmação, imagine que você vai fazer uma caminhada e que dispõe de um altímetro, instrumento que mede a altura que você sobe ou desce. Se você somar tudo que subiu e subtrair do que desceu, ao final da caminhada, quando chegar ao ponto de partida, o resultado dessa soma será obrigatoriamente zero. Se não fosse zero você não estaria no ponto de partida, porque ou teria subido mais do que desceu, ou descido mais que subiu...

O mesmo ocorre num circuito elétrico. Alguns dos seus elementos, os geradores, elevam o potencial das cargas elétricas; os outros elementos, receptores e resistores, reduzem esse potencial, porque retiram energia dessas cargas. Se nós pudéssemos acompanhar uma carga elétrica no seu percurso, a partir de um certo ponto, veríamos que ela ganha energia em alguns trechos e perde em outros, mas tem sempre, nesse mesmo ponto, a mesma energia. Por isso, no percurso fechado de um circuito elétrico, a soma de todas as variações de potencial é nula.

Para estabelecer a equação do circuito elétrico simples, basta somar as diferenças de potencial que são fornecidas pelos geradores – que chamaremos de V_G – e subtrair todas as diferenças de potencial consumidas pelos receptores – que serão chamadas de V_R – e pelos resistores, V_r. A soma total, como vimos, deve ser nula. Portanto, devemos igualar tudo isso a zero. Vamos incluir nos resistores as resistências internas dos próprios geradores e receptores. Temos:

I. Soma de todas as diferenças de potencial fornecidas pelos geradores (forças eletromotrizes, ε_1, ε_2, ... ε_n):

$$V_G = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + ... + \varepsilon_n$$

$$V_G = + \Sigma\, \varepsilon$$

A letra grega Σ (sigma) é utilizada para representar a soma de vários termos. Lê-se como **somatório**.

II. Subtração de todas as diferenças de potencial provocadas pelos receptores (forças contra-eletromotrizes, ε'_1, ε'_2, ... ε'_n):

$$V_R = -(\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2 + ... + \varepsilon'_n)$$

$$V_R = - \Sigma\, \varepsilon'$$

III. Subtração de todas as diferenças de potencial provocadas pelos resistores

$$-(R_1 + R_2 + ... + R_n) \cdot i = - \Sigma\, (R \cdot i)$$

pela resistência interna dos geradores

$$-(r_1 + r_2 + ... + r_n) \cdot i = - \Sigma\, (r \cdot i)$$

e pela resistência interna dos receptores:

$$-(r'_1 + r'_2 + ... + r'_n) \cdot i = - \Sigma\, (r' \cdot i)$$

Reunindo as três últimas parcelas, temos:

$$V_r = - \Sigma\, (R \cdot i) - \Sigma\, (r \cdot i) - \Sigma\, (r' \cdot i)$$

$$V_r = - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i$$

A equação do circuito será portanto:

$$V_G + V_R + V_r = 0$$

ou

$$\Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i = 0$$

Passo a passo

1. No circuito representado na Figura 2, temos um gerador de fem $\varepsilon = 6{,}0$ V e resistência interna $r = 2{,}0\ \Omega$, um motor de fcem $\varepsilon' = 2{,}5$ V e resistência interna $r' = 1{,}5\ \Omega$ e dois resistores em série, $R_1 = 5{,}5\ \Omega$ e $R_2 = 5{,}0\ \Omega$. Determine a corrente que percorre esse circuito.

Solução:

Aplicando a equação do circuito, temos:

$\Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i = 0$
$\varepsilon - \varepsilon' - (R_1 + R_2 + r + r') \cdot i = 0$
$6{,}0 - 2{,}5 - (5{,}5 + 5{,}0 + 2{,}0 + 1{,}5) \cdot i = 0$
$3{,}5 - 14 \cdot i = 0 \Rightarrow\ i = 3{,}5 \ \#\ 14$
$i = 0{,}25A$

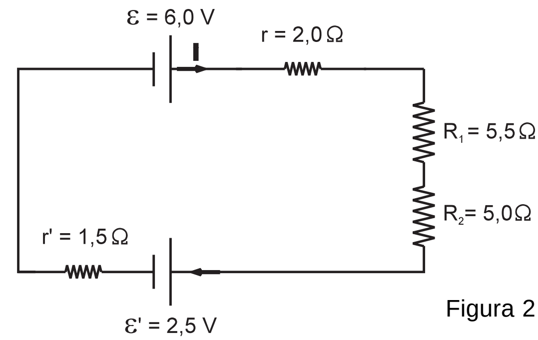


Figura 2

2. No circuito da Figura 3, o gerador tem fem $\varepsilon = 3{,}0$ V e resistência interna $r = 0{,}5\ \Omega$. Não há receptor. Os resistores valem $R_1 = 2{,}5\ \Omega$, $R_2 = 6{,}0\ \Omega$ e $R_3 = 3{,}0\ \Omega$. Determine a corrente que atravessa o gerador.

Solução:

Inicialmente, observa-se que o circuito, a rigor, não é simples, porque os resistores R_2 e R_3 estão associados em paralelo. Para que ele se torne um circuito simples é necessário substituir essa associação pelo seu resistor equivalente R'. Veja a Figura 4. Para isso, vamos aplicar a relação simplificada para resistores em paralelo, vista na Aula 41:

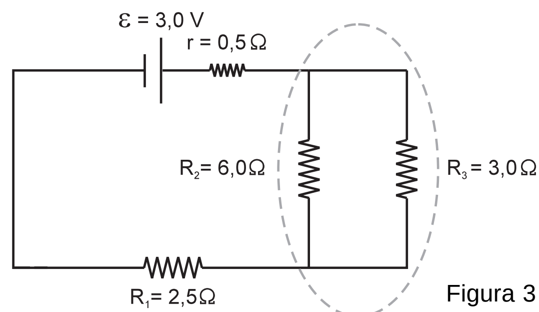


Figura 3

$$R' = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R' = \frac{6{,}0 \cdot 3{,}0}{6{,}0 + 3{,}0} \quad \Rightarrow \quad R' = 2{,}0\Omega$$

Agora podemos aplicar a equação do circuito:

$\Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i = 0$
$\varepsilon - (R_1 + R' + r) \cdot i = 0$
$3{,}0 - (2{,}5 + 2{,}0 + 0{,}5) \cdot i = 0$
$3{,}0 - 5{,}0 \cdot i = 0 \Rightarrow\ i = 3{,}0 \ \#\ 5{,}0$
$i = 0{,}6A$

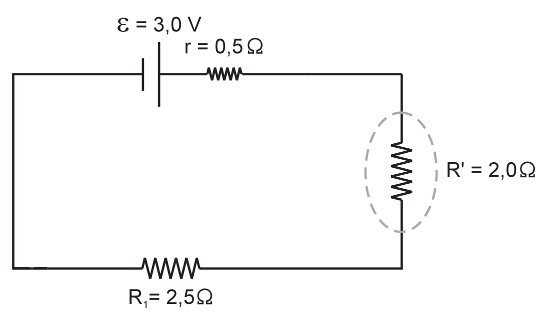


Figura 4. Observe que os resistores R_2 e R_3 foram substituídos pelo resistor equivalente R'. Agora temos um circuito elétrico simples.

Análise de um trecho de circuito: generalização da lei de Ohm

Nem sempre precisamos ou queremos estudar um circuito elétrico por inteiro. Muitas vezes estamos interessados em um único trecho do circuito. Suponha que pretendemos estudar um trecho AB de um circuito qualquer, no qual o sentido da corrente vai de A para B. O ponto A tem um determinado potencial elétrico V_A e o ponto B tem um potencial V_B.

Vamos caminhar de A para B, como fizemos no circuito elétrico. Partimos de um potencial V_A. Somando os acréscimos de potencial devidos aos geradores que existirem nesse trecho, e subtraindo as quedas devidas aos receptores e resistores, vamos chegar a B com um potencial V_B. Veja a Figura 5.

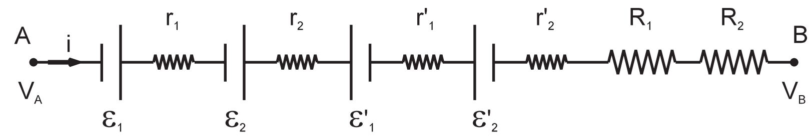


Figura 5. Observe que, percorrendo o trecho AB, no sentido da corrente, o potencial varia, passando de V_A para V_B

Matematicamente, isso pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\boxed{V_A + \Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i = V_B}$$

ou ainda:

$$\boxed{V_B - V_A = \Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i}$$

A expressão acima costuma ser interpretada como uma generalização da lei de Ohm. Isso porque ela permite a determinação da diferença de potencial entre dois pontos, como na lei de Ohm, quando entre esses dois pontos, além de resistores, há geradores e receptores.

Passo a passo

3. A Figura 6 representa um trecho AB de um circuito elétrico percorrido por uma corrente i = 1,0 A. Nesse trecho existem um gerador de fem ε = 2,0 V e resistência interna r = 0,5 Ω, um receptor de fcem ε' = 12 V e resistência interna r' = 2,5 Ω e um resistor de resistência R = 4,0 Ω. Determine a diferença de potencial entre os pontos A e B.

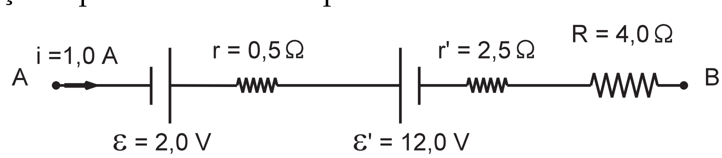


Figura 6

Solução:

Aplicando expressão da generalização da lei de Ohm, temos:

$V_B - V_A = \Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i$
$V_B - V_A = \varepsilon - \varepsilon' - (R + r + r') \cdot i$
$V_B - V_A = 2{,}0 - 12 - (4{,}0 + 0{,}5 + 2{,}5) \cdot 1{,}0$
$V_B - V_A = -\,17$ V

Observe que, nesse caso, o resultado tanto poderia ser negativo como positivo. O resultado foi negativo porque, nesse trecho, as cargas elétricas cederam mais energia ao circuito do que receberam.

Associação de geradores - baterias

Você já deve ter reparado que a maioria dos aparelhos eletrônicos funciona com mais de uma pilha. Elas são associadas, quase sempre, em série. Também podem ser associadas em paralelo, mas isso é muito raro.

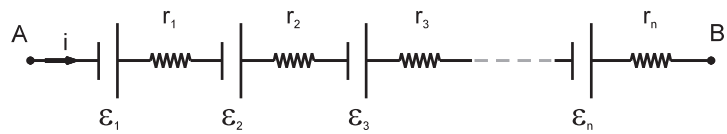


Figura 7. Associação de geradores em série.

Na associação em série, como no caso dos resistores, todos os geradores são percorridos pela mesma corrente. Observe, na Figura 7, que cada gerador tem seu pólo negativo ligado ao positivo do gerador seguinte. Se houvesse um gerador com polaridade invertida, ele funcionaria como receptor.

As características do gerador equivalente a essa associação podem ser determinadas pela generalização da lei de Ohm. Vamos determinar a diferença de potencial entre os pontos A e B da Figura 7, em que estão associados n geradores de forças eletromotrizes ε_1, ε_2, ..., ε_n e resistências internas r_1, r_2, ..., r_n. Pela generalização da lei de Ohm, temos:

$$\boxed{V_B - V_A = \Sigma\,\varepsilon - \Sigma\,\varepsilon' - \Sigma\,(R + r + r') \cdot i}$$

Como não há receptores nem resistores, temos:

$$\boxed{V_B - V_A = \Sigma\,\varepsilon - \Sigma\,r \cdot i}$$

Portanto, numa associação em série de geradores, o gerador equivalente tem uma fem ε_E igual à soma das forças eletromotrizes de todos os geradores dessa associação

$$\boxed{\varepsilon_E = \Sigma\,\varepsilon}$$

e uma resistência interna r_E igual à soma de todas as resistências internas de todos os geradores

$$\boxed{r_E = \Sigma\,r}$$

É por essa razão que não se devem misturar pilhas novas e pilhas usadas numa mesma associação. As pilhas usadas têm resistência interna muito grande e, se contribuem um pouco para o valor da fem da associação, prejudicam muito mais, com a sua alta resistência interna. Essa é, também, a principal desvantagem de uma associação em série de geradores.

Figura 8. O símbolo de uma bateria se assemelha a uma associação em série de geradores.

A expressão da fem da associação de geradores mostra também por que as baterias, em geral conjuntos de geradores associados em série (veja símbolo da bateria na Figura 8), têm sempre valores de fem múltiplos de 1,5 V, que é a fem de cada pilha.

As associações em paralelo de geradores são menos freqüentes porque implicam em alguns problemas técnicos de difícil controle. Como você pode ver na Figura 9, podem se formar vários pequenos circuitos elétricos entre dois ou mais geradores; nesse caso, o circuito maior, no qual essa associação está incluída, fica prejudicado. Por essa razão, caso se utilizem pilhas nessas associações, elas devem ser rigorosamente iguais. Como estão ligadas em paralelo, a fem da associação é a mesma de qualquer das pilhas, mas a resistência interna será muito menor. Essa redução da resistência interna faz com que a associação, embora tenha a mesma fem de um de seus geradores, forneça uma corrente maior.

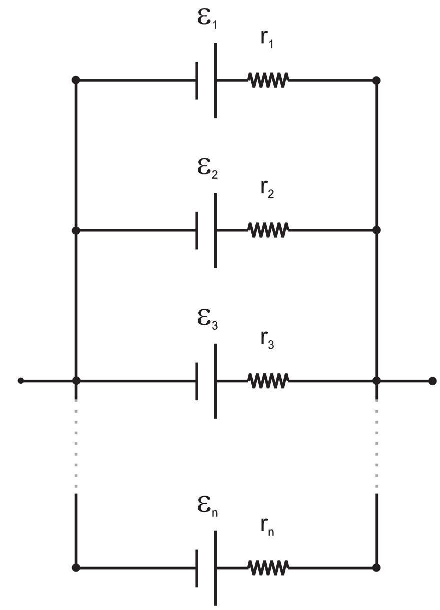


Figura 9. Associação de geradores em paralelo.

Chaves e fusíveis

Nem todos os elementos de um circuito elétrico fornecem ou consomem energia. Há dispositivos de controle que podem ligar ou desligar um circuito ou acoplar outros circuitos a um circuito maior, por exemplo. São as chaves ou interruptores, cujo símbolo você pode ver na Figura 10a.

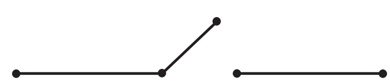


Figura 10a
Símbolo de uma chave ou interruptor.

Figura 10b
Símbolo de um fusível e de um disjuntor.

Há ainda dispositivos de proteção, como os fusíveis e disjuntores, que desligam o circuito quando a corrente elétrica ultrapassa valores estabelecidos previamente e que põem em risco a instalação elétrica em que estão colocados. Funcionam como chaves que se abrem e interrompem o circuito automaticamente.

Um fusível de 20 A, por exemplo, é simplesmente um pequeno fio colocado em série com o circuito. Devido ao aquecimento, esse fio derrete ou se funde quando a corrente ultrapassa 20 ampères.

Atualmente os fusíveis têm sido substituídos pelos disjuntores, dispositivos com a mesma função mas que não se queimam – apenas desligam ou "desarmam", como dizem os eletricistas. Os disjuntores não precisam ser substituídos quando desarmam, basta religá-los. Essa é uma grande vantagem em relação aos fusíveis. No entanto, um disjuntor com defeito de fabricação pode não desarmar, o que não acontece com os fusíveis. Os fusíveis, portanto, são menos práticos, mas mais seguros. Veja na Figura 10b os símbolos dos fusíveis e disjuntores.

Passo a passo

4. Um chuveiro elétrico tem os seguintes valores nominais: 220 V / 4.400 W. Em geral, os eletricistas colocam o chuveiro num circuito separado dos demais circuitos da casa, colocando um fusível ou disjuntor adequado a esse circuito. Qual deve ser a especificação (corrente elétrica) desse fusível ou disjuntor?

Solução:

A especificação de um fusível ou disjuntor é, em geral, a corrente elétrica mínima exigida pelo circuito em que ele está inserido. Assim, o circuito em que o chuveiro está instalado deve fornecer a corrente elétrica capaz de fazê-lo funcionar dentro de suas especificações. Isso significa que, quando ligado a uma diferença de potencial de 220 volts, deve passar pelo chuveiro uma corrente elétrica tal que ele dissipe uma potência de 4.400 watts. Lembrando que a relação entre a potência dissipada P, a diferença de potencial V e a corrente elétrica i é $P = V \cdot i$, temos:

$$P = V \cdot i \Rightarrow 4.400 = 220 \cdot i \Rightarrow i = 4.400 \# 220 \Rightarrow i = 20 \text{ A}$$

Portanto, o fusível deve ser de, no mínimo, 20 ampères. Caso contrário, ele queimará sempre que o chuveiro for ligado.

Medidores elétricos

Na prática, os valores da corrente elétrica e da diferença de potencial podem ser medidos diretamente com a utilização de dois instrumentos: o amperímetro e o voltímetro. Não vamos, por enquanto, estudar o funcionamento desses instrumentos, apenas a forma correta de utilizá-los.

Amperímetro

Como o próprio nome indica, o amperímetro é um "medidor de ampères", ou seja, um medidor de corrente elétrica. Simbolicamente, ele é representado, em geral, por um A maiúsculo colocado dentro de um pequeno círculo. Para medir a corrente, ele deve ser atravessado por ela. Por isso, deve ser colocado sempre em série com o trecho de circuito em que se deseja quer medir a corrente. Veja Figura 11. É interessante notar que, se a corrente atravessa o amperímetro, ela vai ser reduzida devido à resistência interna dos componentes elétricos do próprio amperímetro. Isso faz com que ele interfira ou altere a sua própria medida. (Isso, aliás, ocorre com todo instrumento de medida de qualquer grandeza física). Para que essa interferência seja a menor possível, ele deve oferecer uma resistência muito pequena à passagem da corrente. Um bom amperímetro, portanto, tem resistência interna muito pequena. Um amperímetro ideal teria resistência interna nula.

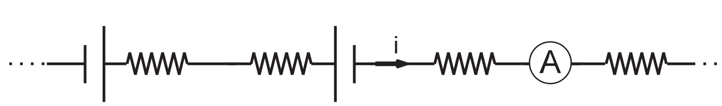


Figura 11. Um amperímetro colocado num trecho de circuito.

AULA
43

Voltímetro

Um voltímetro é um "medidor de volts", ou seja, um medidor de diferença de potencial. Costuma-se simbolizar o voltímetro com um V maiúsculo colocado num círculo. Para medir a diferença de potencial entre dois pontos de um circuito, o voltímetro deve ser ligado a esses dois pontos sempre em paralelo com o trecho de circuito. Veja a Figura 12.

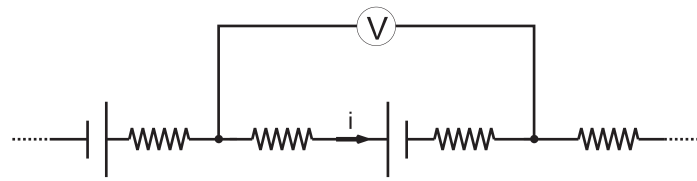


Figura 12. Um voltímetro colocado num trecho de circuito.

Para que a interferência do voltímetro no circuito seja mínima, é preciso que ele desvie a menor corrente possível do circuito. Isso porque ele também funciona (é acionado) por uma parcela da corrente elétrica que atravessa o trecho de circuito em que está inserido. Essa parcela de corrente só aparece quando o voltímetro é colocado. Por isso, ela deve ser muito pequena. Para tanto, a resistência interna do voltímetro deve ser muito grande, ao contrário do que ocorre com o amperímetro. Um voltímetro ideal teria uma resistência interna infinita.

Passo a passo

5. No circuito da Figura 13, determine as leituras do amperímetro e do voltímetro. Suponha que eles são ideais, isto é, não interferem no circuito.

Solução:

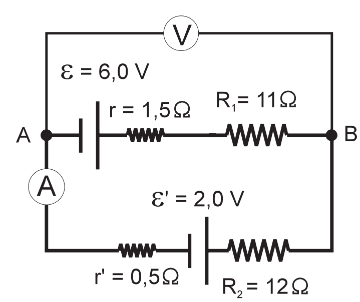


Figura 13

Como o circuito é um circuito simples, a leitura do amperímetro é a corrente elétrica i que passa pelo circuito. Aplicando a equação do circuito, obtemos:

$$\Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i = 0$$
$$\varepsilon - \varepsilon' - (R_1 + R_2 + r + r') \cdot i = 0$$
$$6{,}0 - 2{,}0 - (11 + 12 + 1{,}5 + 0{,}5) \cdot i = 0$$
$$4{,}0 - 25 \cdot i = 0 \Rightarrow 25\, i = 4$$
$$i = 0{,}16 \text{ A}$$

A leitura do voltímetro é a diferença de potencial entre os pontos A e B aos quais ele está ligado. Aplicando a expressão da generalização da lei de Ohm a esses pontos, obtemos:

$$V_B - V_A = \Sigma\, \varepsilon - \Sigma\, \varepsilon' - \Sigma\, (R + r + r') \cdot i$$
$$V_B - V_A = \varepsilon - (R_1 + r) \cdot i$$
$$V_B - V_A = 6{,}0 - (11 + 1{,}5) \cdot 0{,}16$$
$$V_B - V_A = 6{,}0 - 2{,}0$$
$$V_B - V_A = 4{,}0 \text{ V}$$

Portanto, a leitura do amperímetro é 0,16 A e a do voltímetro é 4,0 V.

Os circuitos que acabamos de estudar são bem mais simples que os circuitos de nossas casas. É importante notar que, nos circuitos elétricos de nossas casas, não existe o gerador – ele está, às vezes, a dezenas ou centenas de quilômetros de distância, numa usina hidrelétrica, por exemplo. Nós temos acesso a esse grande gerador por meio das redes de distribuição de energia elétrica; elas podem ser consideradas macrocircuitos aos quais os nossos circuitos caseiros estão ligados.

As tomadas elétricas fixadas nas paredes são terminais desses grandes geradores. É por essa razão que os curtos-circuitos são tão perigosos. Além das diferenças de potencial serem altas – 110 V, 127 V ou 220 V –, a potência de tais geradores é muito grande, possibilitando o aparecimento de correntes elétricas também muito altas.

Isso explica, enfim, aquela providência dramática tomada por Roberto, descrita no início da Aula 40, quando o chuveiro pifou: "Enquanto alguém toma banho, desliga-se a televisão!" Lembre-se, de novo, da relação entre potência, diferença de potencial e corrente, $P = V \cdot i$. A corrente elétrica que percorre um circuito é, portanto, $i = P \# V$. Suponha que a diferença de potencial da casa seja 110 V, que o chuveiro tenha potência de 3.300 watts e que a televisão tenha potência de 440 watts. Suponha, ainda, que a tomada da televisão esteja no mesmo circuito do chuveiro. E que, para proteger esse circuito, foi instalado um fusível de 30 ampères.

Quando só o chuveiro está ligado, a corrente elétrica do circuito será:

$$i = \frac{P_{chuveiro}}{V} \Rightarrow i = \frac{3.300}{110} \Rightarrow i = 30A$$

Como você vê, esse é o valor-limite da corrente que o fusível suporta sem queimar. Como esse valor não foi ultrapassado, o fusível não queima. Se, no entanto, a televisão for ligada, a corrente vai aumentar. Veja:

$$i = \frac{P_{chuveiro} + P_{televisão}}{V} \Rightarrow i = \frac{3.300 + 440}{110} \Rightarrow i = 34A$$

Esse valor supera a máxima corrente que o fusível suporta. Por isso, o fusível queima.

Você pode estar pensando: por que Roberto não instalou um fusível mais forte, de 40 ampères, por exemplo? Não seria uma solução mais inteligente? Na realidade, seria uma solução, mas muito mais perigosa que inteligente!

Os fusíveis são dimensionados de acordo com os fios utilizados na instalação (que, por sua vez, devem levar em conta os aparelhos elétricos que vão ser ligados nessa instalação). Se o eletricista colocou fusíveis de 30 ampères é porque, acima dessa corrente, os fios vão se aquecer demais, suas capas de plástico podem derreter e eles podem perder a isolação. Nesse caso, o risco de um curto-circuito, e de todas as suas conseqüências desastrosas, é muito grande. A melhor solução, nesses casos, é refazer toda a instalação – substituir a fiação, separar o circuito do chuveiro dos demais circuitos da casa e, se possível, ligá-lo em 220 volts.

Se você refizer os nossos cálculos com a diferença de potencial de 220 volts em vez de 110 volts, vai notar que, só com o chuveiro, a corrente elétrica seria de apenas 15 ampères. Com o chuveiro e a televisão, ela seria de 17 ampères. São valores bem menores, que permitem a utilização de uma fiação mais leve e barata e, principalmente, menos sujeita a curtos-circuitos. Mas é preciso lembrar que a tensão de 220 volts é mais perigosa para as pessoas. Por isso, a instalação elétrica com tensão de 220 voltas deve ser muito bem feita. Como você viu, a teoria dos circuitos elétricos até que não é muito complicada, mas instalação elétrica é coisa muito séria. Não é para amadores e curiosos.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que são circuitos elétricos e como equacioná-los matematicamente;
- a generalização da lei de Ohm para circuitos elétricos;
- como se associam os geradores, formando as baterias;
- outros elementos de um circuito: chaves e fusíveis;
- o que são medidores elétricos e como utilizá-los num circuito.

Mãos à obra

Exercício 1

Uma calculadora tem uma potência de 450 microwatts ($450 \cdot 10^{-6}$ watts) e sua bateria fornece uma tensão de 3,0 volts. Desprezando a resistência interna da bateria, determine a corrente elétrica total que percorre seus circuitos.

Exercício 2

No circuito representado na Figura 14, temos um gerador de fem $\varepsilon = 6{,}0$ V e resistência interna $r = 1{,}0\ \Omega$, um motor de fcem $\varepsilon' = 4{,}5$ V e resistência interna $r' = 2{,}0\ \Omega$ e dois resistores em série, $R_1 = 9{,}0\ \Omega$ e $R_2 = 3{,}0\ \Omega$. Determine a corrente que percorre esse circuito.

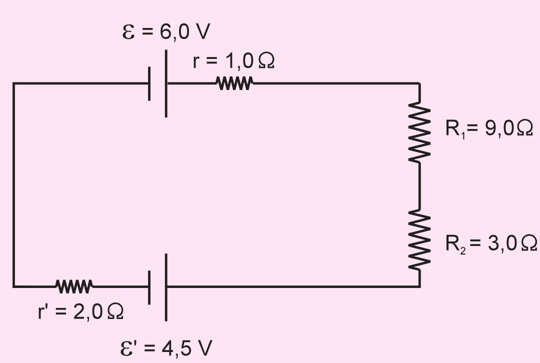


Figura 14

Exercício 3

No circuito da Figura 15, o gerador tem fem ε = 6,0 V e resistência interna r = 1,5 Ω. Não há receptor. Os resistores valem R_1 = 4,0 Ω, R_2 = 6,0 Ω e R_3 = 3,0 Ω.
Determine a corrente que atravessa o gerador.

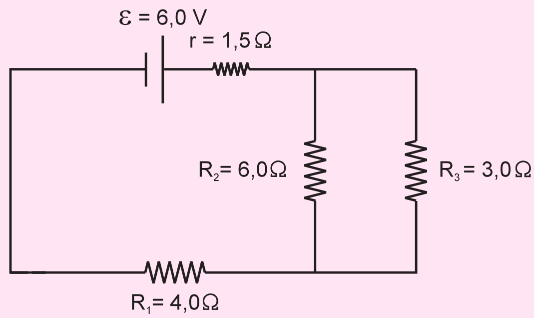


Figura 15

Exercício 4

A Figura 16 representa um trecho AB de um circuito elétrico percorrido por uma corrente i = 0,5 A. Nesse trecho existem um gerador de fem ε = 2,5 V e resistência interna r = 0,5 Ω, um receptor de fcem ε' = 12 V e resistência interna r' = 2,5 Ω e um resistor de resistência R = 5,5 Ω. Determine a diferença de potencial entre os pontos A e B.

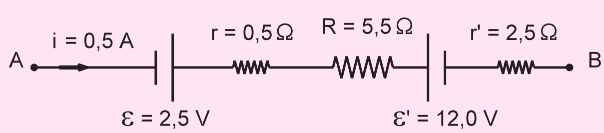


Figura 16

Exercício 5

Um chuveiro elétrico tem os seguintes valores nominais: 220 V/3.300 W. Em geral, os eletricistas colocam o chuveiro num circuito separado dos demais circuitos da casa, instalando um fusível ou disjuntor adequado a esse circuito. Qual deve ser a especificação (corrente elétrica) desse fusível ou disjuntor?

Exercício 6

Suponha que a diferença de potencial de uma casa seja 110 V, que o chuveiro tenha uma potência de 4.400 watts e a televisão, de 440 watts. Suponha, ainda, que a tomada da televisão esteja no mesmo circuito do chuveiro. Qual deve ser a especificação de um fusível para esse circuito?

Exercício 7

No circuito da Figura 17, determine as leituras do amperímetro e do voltímetro. Suponha que eles são ideais, isto é, não interferem no circuito.

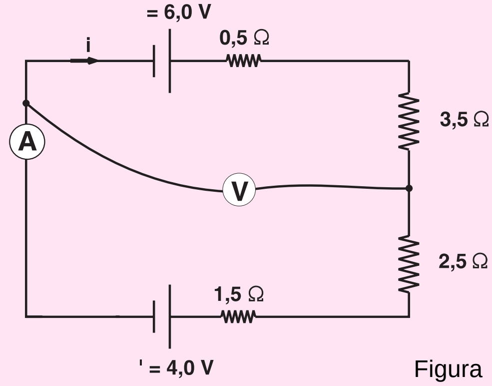


Figura 17

AULA

44

Estou desorientado!

PARA COMEÇAR

A televisão noticiava com estardalhaço: um grupo de estudantes estava perdido na Serra do Mar. As buscas prosseguiam, as informações eram desencontradas. Os pais, aflitos, davam entrevistas: “Não sei como isso foi acontecer”, dizia um deles. “Eu dei ao meu filho uma bússola novinha!”

– Ô, pai – comentou Ernesto, preocupado, assistindo ao noticiário. - Se você me desse uma bússola também não ia adiantar nada, eu não sei como se usa!

– Que vergonha, meu filho! – respondeu Roberto indignado. – É muito fácil. A bússola aponta sempre para o norte, aí você se orienta e pronto!

– Não sei não, pai – duvidou Ernesto – Eu estou no meio do mato, olho para a bússola e vejo que o norte é para lá. E daí? Se eu não sei para onde eu preciso ir, de que isso me adianta?

– Bom, sei lá! Eu sempre ouvi dizer que a bússola serve para a gente se orientar, deve haver um jeito, ué! – desconversou Roberto.

– É, pai, seu forte é eletricidade mesmo – comentou, irônico, Ernesto. E acrescentou, para arrematar a conversa:

– Nesse negócio de bússola, acho que não sou só eu que estou desorientado...

Será que alguém consegue se orientar **só com uma bússola**? É claro que não! Aqui a razão está com Ernesto. A bússola indica apenas uma direção, e só isso não é suficiente, embora seja necessário. Essa direção nos permite utilizar adequadamente um mapa, por exemplo, colocando-o na posição correta. Mas, sem um mapa, sem que a pessoa saiba onde está e para onde quer ir, a bússola é inútil.

Figura 1. Sem os mapas, as bússolas seriam inúteis.

Quando se fala da época das grandes navegações, quando o Brasil foi descoberto, sempre se destaca muito o papel da invenção da bússola. Mas, se não existissem os mapas – mesmo os da época, muito imperfeitos –, tais viagens teriam sido impossíveis.

Para nós, entretanto, a importância maior da bússola não está ligada às grandes navegações, mas a outras descobertas igualmente importantes. Foi estudando as propriedades da bússola, em 1600, que William Gilbert, médico da rainha da Inglaterra, chegou à conclusão de que a Terra era um grande ímã. Também foi com o auxílio de uma bússola que, em 1820, Hans Christian Oersted, um professor de Física dinamarquês, demonstrou que a eletricidade e o magnetismo eram aspectos diferentes de um mesmo fenômeno, o **eletromagnetismo**. Este é o assunto das nossas próximas aulas.

Magnetismo

Fique ligado

O magnetismo já era conhecido, séculos antes de Cristo, pelos antigos gregos. Seu nome deriva de uma pedra, a magnetita, muito encontrada na Magnésia, uma região da Ásia Menor próxima à Grécia. Os gregos sabiam que essa pedra era capaz de atrair pedaços de ferro, ou seja, era um **ímã natural**. Logo se percebeu que outros pedaços de ferro, em contato com a magnetita, podiam também se transformar em ímãs. Esses pedaços de ferro eram **ímãs artificiais** que, há cerca de 1.000 anos, permitiram aos chineses a invenção da bússola – agulhas imantadas que podem girar livremente e se orientam sempre na mesma direção.

A bússola, por sua vez, nos levou à descoberta de que a própria Terra é um grande ímã. As regiões de um ímã nas quais o magnetismo é mais intenso, em geral as extremidades, são chamadas de pólos. Isso porque, quando um ímã é posto a girar livremente num plano horizontal, essas regiões apontam para os pólos terrestres.

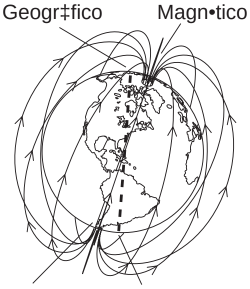


Figura 2. Os pólos do ímã apontam para os pólos da Terra. Observe que o Pólo Norte geográfico está próximo do **pólo sul magnético** e que o Pólo Sul geográfico está perto do **pólo norte magnético**.

Veja a Figura 2. O pólo norte de um ímã, ou de uma bússola, é aquele que aponta para o Pólo Norte terrestre. O Pólo Sul, claro, é o que aponta para o Pólo Sul terrestre. Os pólos magnéticos têm uma propriedade semelhante às cargas elétricas: pólos iguais se repelem, pólos diferentes se atraem. Mas a semelhança pára por aí. Não existem pólos magnéticos separados, como existem as cargas positivas e negativas. Por isso não é possível ter um ímã com uma só polaridade. Quando um ímã se parte, cada pedaço se torna um novo ímã com dois pólos, norte e sul, qualquer que seja o número de pedaços ou o tamanho de cada um.

Os processos de imantação também são diferentes dos processos de eletrização. A primeira diferença reside no material. Só é possível imantar alguns poucos materiais, chamados de ferromagnéticos: o ferro, o níquel e o cobalto. Esses elementos também entram em algumas ligas metálicas que são magnéticas, como o aço, por exemplo. Qualquer corpo de material ferromagnético – um prego, por exemplo – colocado junto a um ímã também se torna um ímã temporário. Se o prego for afastado do ímã, perde a imantação. Costuma-se dizer que o prego adquire uma imantação induzida. Veja a Figura 3. Essa imantação, no entanto, pode se tornar permanente, se o ímã for muito forte ou se alguma ação for exercida sobre o prego. Uma dessas ações pode ser esfregar o prego com o ímã, sempre com o mesmo pólo e no mesmo sentido.

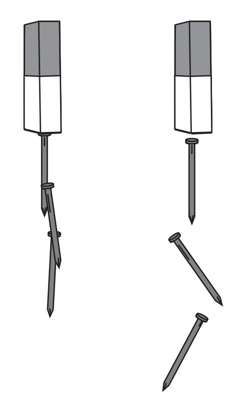


Figura 3. O prego mantém a imantação enquanto ligado ao ímã. Quando se separa do ímã ele perde a imantação

Outra ação pode ser aquecer o prego ou bater nele com um martelo, mantendo-o próximo do ímã.

É interessante notar que essas mesmas ações também podem desfazer o magnetismo de um corpo. Um ímã de ferro perde a imantação quando aquecido a 770ºC. Essa temperatura recebe o nome de **ponto Curie**, em homenagem a Pierre Curie, físico francês que descobriu essa propriedade, em 1895.

Mas o que faz um corpo se magnetizar? Qual a origem dos ímãs naturais? Não é uma pergunta fácil de responder. Há muitos fatores envolvidos e nem todos são, ainda, bem conhecidos. Vamos tomar como ponto de partida os ímãs naturais: eles existem porque se formaram na Terra e o nosso planeta é um grande ímã. Além disso, a Terra, como todo ímã, cria em torno de si uma região que pode influir ou criar outros ímãs. Essa região é chamada de **campo magnético**.

Campo magnético

A primeira idéia de campo, em Física, sempre se refere a uma região do espaço que tem uma certa propriedade. Um campo gravitacional é uma região do espaço que atua sobre a massa dos corpos; um campo elétrico atua sobre cargas elétricas. Da mesma forma, um campo magnético é uma região do espaço que atua sobre ímãs. Embora seja uma idéia abstrata, ela pode ser visualizada com o auxílio de linhas que, no caso do campo magnético, chamam-se **linhas de indução magnética**.

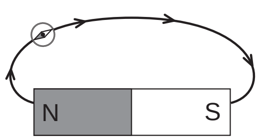


Figura 4. Uma pequena bússola nos permite mapear as linhas de indução magnética de um ímã.

É possível desenhar essas linhas com o auxílio de uma bússola. Se movimentarmos uma pequena bússola ao redor de um ímã em forma de barra, por exemplo, vamos observar que a agulha se movimenta como se tangenciasse uma linha que passa pelos pólos do ímã. Veja a Figura 4.

Outra forma de visualizar as linhas de indução magnética de um ímã envolve a utilização de limalhas ou pó de ferro. Cada pequenino fragmento de ferro, quando colocado num campo magnético, adquire uma imantação induzida e se comporta como uma bússola. Se colocarmos um ímã em forma de barra sob uma folha de papel e espalharmos cuidadosamente as limalhas sobre a folha, vamos observar a formação de linhas desenhadas por essas limalhas. Como se fossem milhares de pequeninas bússolas, essas limalhas mostram como o campo magnético do imã influencia aquela região do espaço. Veja a Figura 5.

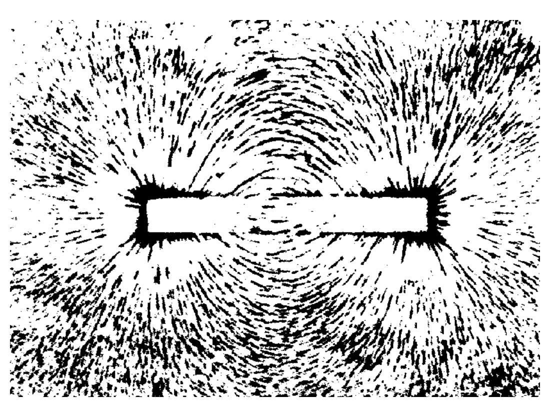


Figura 5. A configuração de um campo magnético de um ímã em forma de barra, formada por limalhas de ferro.

Outras configurações poderão se formar quando utilizamos dois ímãs em forma de barra, por exemplo, ou imãs em forma de ferradura. Veja a Figura 6. Cada uma das figuras mostra as diferentes configurações que um campo magnético pode assumir. É interessante notar que as figuras são planas porque se formam numa folha de papel – mas o campo magnético é sempre tridimensional, não se limita ao plano do papel.

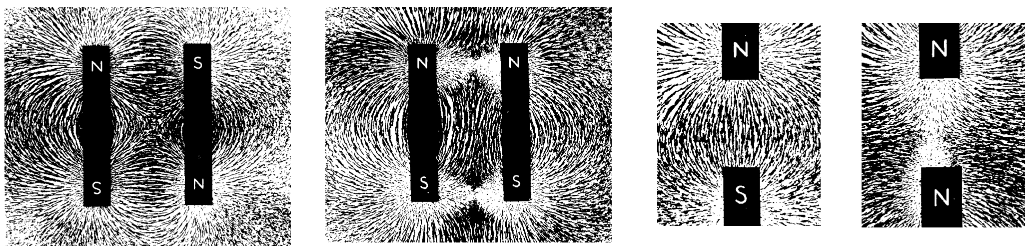


Figura 6. Diferentes configurações de campos magnéticos de dois imãs em forma de barra, formadas com limalhas de ferro.

Todas essas figuras mostram a forma de um campo magnético. Mas como determinar a ação do campo magnético em determinado ponto? É o que vamos ver em seguida.

Vetor campo magnético

Para determinar a ação do campo magnético num determinado ponto é necessário, inicialmente, definir o vetor campo magnético, que será designado por $\vec{B}$. Por analogia à agulha de uma bússola, sua direção será sempre tangente à linha de indução magnética em cada ponto; o sentido é, por definição, de norte para o sul. Veja a Figura 7.

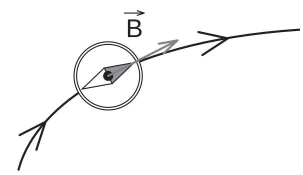


Figura 7. A direção e sentido do vetor campo magnético $\vec{B}$ num ponto é a mesma da agulha de uma bússola colocada nesse ponto.

Mas como determinar o módulo desse vetor? No caso do campo elétrico, o vetor $\vec{E}$ foi definido pela razão entre a força $\vec{F}$ que o campo exercia sobre uma carga e a intensidade dessa carga, **q**. Ou seja:

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}}$$

O vetor campo gravitacional $\vec{g}$ também pode ser definido pela razão entre a força exercida pelo campo sobre um corpo – o seu peso $\vec{P}$ – e a massa desse corpo, **m**. Ou seja:

$$\boxed{\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}}$$

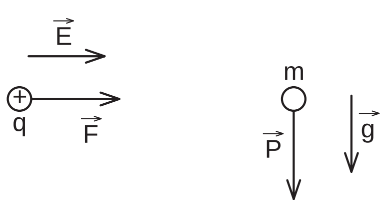


Figura 8. Os vetores campo elétrico $\vec{E}$ e campo gravitacional $\vec{g}$ são definidos a partir das forças que exercem sobre uma carga **q** ou sobre uma massa **m**. No campo magnético um procedimento equivalente não é possível.

No campo magnético, entretanto, não existe uma grandeza específica equivalente a q ou m. Não existe um corpo com uma só polaridade magnética. Veja a Figura 8. Além disso, um ímã colocado num campo magnético está sempre sujeito à ação de **duas forças** resultantes em vez de uma só.

A ação de um campo magnético não se manifesta apenas sobre ímãs. A eletricidade e o magnetismo, como já dissemos, são diferentes aspectos de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo. Isso significa que existem formas de interação entre o campo magnético e cargas ou correntes elétricas. Uma dessas formas de interação vai nos permitir estabelecer a definição matemática do campo magnético $\vec{B}$ e, conseqüentemente, a determinação do seu módulo.

Interação entre campo magnético e uma carga elétrica em movimento

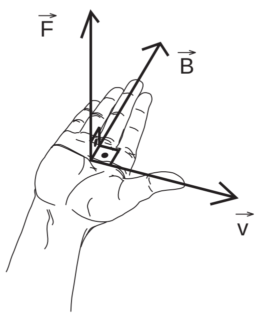


Figura 9. Regra da mão direita para uma carga q positiva: o polegar indica o sentido da velocidade, a palma da mão indica o sentido do campo e a sua perpendicular o sentido da força (sentido do "tapa"). Se a carga for **negativa** a força terá **sentido oposto**.

Vamos supor que numa região do espaço exista um campo magnético $\vec{B}$, uniforme ou constante – isto é, que tem o mesmo valor, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos. Se uma carga elétrica q for colocada nessa região, em repouso, nada vai ocorrer. Mas, se ela for lançada com uma velocidade $\vec{v}$ numa direção que forme um ângulo θ com a direção de $\vec{B}$, ela vai sofrer a ação de uma força $\vec{F}$. Essa força tem características muito peculiares:

- a sua direção é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores $\vec{B}$ e $\vec{v}$;
- o seu sentido depende do sinal da carga q e pode ser determinado por algumas regras práticas, como a regra da mão direita ou regra do "tapa". Veja Figuras 9 e 10;
- o seu módulo é diretamente proporcional ao produto de q pelo módulo de $\vec{v}$ pelo seno do ângulo θ, ou seja: $F \propto q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$

A expressão acima, como toda relação de proporcionalidade, pode se transformar numa igualdade, desde que se defina uma constante de proporcionalidade. Em outras palavras:

$$\boxed{\frac{F}{q \cdot v \cdot \text{sen}\,\theta} = (\text{constante})}$$

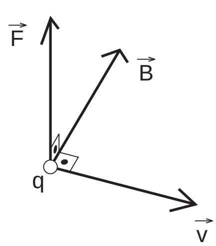


Figura 10. A relação entre os vetores $\vec{F}$, $\vec{B}$ e $\vec{v}$ **para uma carga q positiva**. Se a carga for negativa $\vec{F}$ terá sentido oposto ao representado

Vamos tentar entender por que o valor de F dividido pelo produto $q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$ permanece constante. Matematicamente, isso indica que, quando uma, duas ou as três grandezas do denominador variam, o valor da força também deve variar para que o resultado da fração fique constante. Fisicamente, isso só pode acontecer se uma grandeza envolvida na situação descrita permanecer constante. De acordo com a nossa suposição inicial, essa grandeza é o campo magnético $\vec{B}$, no qual a carga q se movimenta. Como na expressão estão indicados apenas os módulos de $\vec{F}$ e $\vec{v}$, podemos afirmar que essa constante é o módulo de $\vec{B}$. Temos, portanto:

$$\boxed{B = \frac{F}{q \cdot v \cdot \text{sen}\,\theta}}$$

A unidade do vetor campo magnético será dada pela razão N/(C · m/s), uma vez que o seno é uma grandeza adimensional (sem unidade). Essa unidade é chamada de **tesla**, T, em homenagem a **Nikola Tesla**, físico polonês radicado nos Estados Unidos que, no final do século passado, foi responsável pela invenção de inúmeras aplicações tecnológicas do eletromagnetismo, entre elas os motores e dínamos de corrente alternada.

Da definição de campo magnético pode-se obter também uma expressão para a força que atua sobre uma carga em movimento num campo magnético:

$$\boxed{F = B \cdot q \cdot v \cdot \text{sen}\theta}$$

É importante lembrar que, como a expressão da força é um produto, ela será nula se qualquer dos seus fatores for nulo. Isso ocorre quando v = 0, ou seja, quando a carga está em repouso em relação ao campo, como já dissemos. A força também é nula se o ângulo θ for zero ou igual a 180º, pois o seno desses ângulos é zero. Na prática, isso significa que uma carga em movimento, na mesma direção de um campo magnético, independentemente do sentido, não sofre a ação de força desse campo.

Representação tridimensional de vetores

Como vimos, os vetores $\vec{B}$, $\vec{F}$ e $\vec{v}$ sempre se relacionam tridimensionalmente. Isso nos obriga a ampliar a forma de representar os vetores para poder colocá-los no papel, que é bidimensional. Assim, sempre que um vetor for perpendicular ao plano da figura, dirigindo-se para fora ou para o leitor, ele será representado pelo símbolo $\odot$. Essa figura foi escolhida porque dá a idéia de uma flecha vista de frente, dirigindo-se para quem a vê. Se o vetor for perpendicular ao plano da figura, dirigindo-se para dentro, ele será representado pelo símbolo $\otimes$. Aqui a idéia é a mesma – é como se fosse uma flecha vista por trás, pelo penacho, afastando-se de quem a vê.

Passo a passo

1. Nas Figuras 11a, 11b, 11c e 11d estão representados os vetores $\vec{B}$ e $\vec{v}$ atuando sobre uma carga q positiva. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor $\vec{F}$ que atua em cada caso.

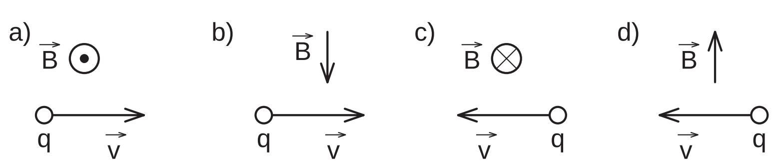


Figura 11

Solução:

Aplica-se a regra da mão direita. Coloca-se a palma da mão na direção e no sentido de $\vec{B}$ e gira-se até que o polegar coincida com a direção e o sentido da velocidade, $\vec{v}$. A direção e o sentido da força $\vec{F}$ serão dados pela perpendicular que sai da palma da mão, para fora. Como se fosse a força de um tapa dado com essa mão. Se a carga fosse negativa, a força teria a mesma direção, mas sentido oposto. Veja a Figura 12.

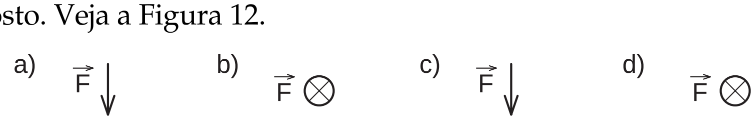


Figura 12

2. Uma carga q de 6μC é lançada com uma velocidade de 100m/s numa região do espaço onde existe um campo magnético $\vec{B}$ de intensidade 0,5 T. Sabendo-se que as direções da velocidade da carga e do campo magnético são perpendiculares entre si, determine a intensidade da força que atua sobre a carga.

Solução:

Basta aplicar a relação:

$F = B \cdot q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$

$F = 0{,}5 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot \text{sen } 90^o$

$\mathbf{F = 3 \cdot 10^{-4}\ N}$

Movimento de uma partícula carregada num campo magnético uniforme

Suponha que numa região do espaço exista um campo magnético $\vec{B}$, uniforme. Se uma carga elétrica q for lançada numa direção perpendicular a esse campo, ela vai sofrer a ação de uma força $\vec{F}$, cujo módulo será:

$$\boxed{F = B \cdot q \cdot v}$$

uma vez que sen 90º é igual a 1. O vetor $\vec{F}$, por sua vez, será perpendicular a $\vec{v}$. Mas, se a força é perpendicular à velocidade, ela só pode mudar a direção e o sentido dessa velocidade. Dessa forma, os valores de todas as grandezas envolvidas, B, q, v e F, são constantes; as únicas coisas que vão mudar são a direção e o sentido de $\vec{v}$. Veja a Figura 13.

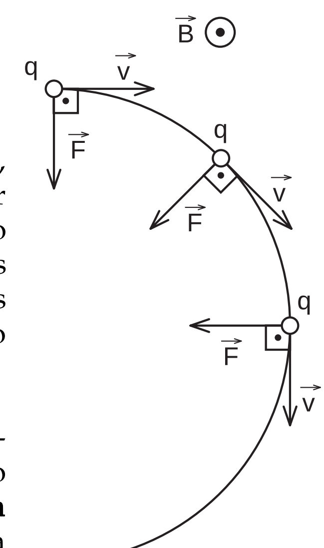


Figura 13. A força $\vec{F}$ atuando sempre perpendicularmente ao vetor velocidade $\vec{v}$ faz com que a partícula de carga q, positiva, execute um movimento circular uniforme.

Ora, uma força constante, atuando perpendicularmente à velocidade de um corpo, faz com que esse corpo execute um movimento circular uniforme. É uma **força centrípeta**. Na Aula 11 você aprendeu que a força centrípeta F_C, que atua sobre uma partícula de massa m que descreve um movimento circular uniforme de raio r, é dada pela expressão:

$$\boxed{F_C = m\frac{v^2}{r}}$$

Por outro lado, sabemos que a força centrípeta é, sempre, a força resultante que faz com que um corpo execute um MCU. Nesse caso, a força centrípeta é a força $\vec{F}$ exercida pelo campo magnético. Teremos então:

$$F = F_C$$

$$B \cdot q \cdot v = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow B \cdot q = m\frac{v}{r}$$

Dessa última relação podem-se obter outras relações importantes sobre o movimento de uma partícula carregada num campo magnético uniforme, como o raio r da circunferência descrita. Por exemplo:

$$\boxed{r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}}$$

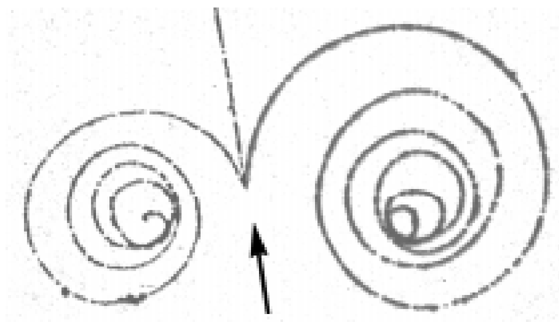


Figura 14. Foto de traços de partículas numa câmara de bolhas.

O estudo da trajetória de partículas carregadas em campos magnéticos é uma das formas que os físicos têm de conhecer as características dessas partículas. É possível ver e fotografar o rastro, isto é, a trajetória deixada por essas partículas, em equipamentos construídos especialmente para esse fim e que são imersos em campos magnéticos. Um desses equipamentos é a câmara de bolhas, uma espécie de aquário cheio de hidrogênio líqüido. As partículas, quando atravessam essas câmaras, deixam rastros de sua passagem. Os rastros são fotografados para estudo posterior. Veja a Figura 14.

Passo a passo

3. Observe a Figura 14. Nela você vê a trajetória de duas partículas numa câmara de bolhas imersa num campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para fora do plano da figura. Qual é o sinal da carga de cada partícula?

Solução:

Observando a figura notamos duas trajetórias circulares que se iniciam a partir de um determinado ponto. A seta, antes desse ponto, indica o sentido de entrada das partículas na câmara – portanto, esse é o sentido da velocidade das partículas. Com a palma da mão direta estendida, orientada para fora do plano da figura e com o polegar no sentido indicado pela seta, determinamos o sentido da força que atua sobre a carga positiva. É fácil ver que a palma da mão indica que a força é para a direita. Portanto, a partícula de carga positiva é a que descreve a trajetória que se curva para a direita. A outra é a de carga negativa.

É interessante observar que, na realidade, as trajetórias não são circulares, mas espirais. Isso acontece porque a velocidade não se mantém constante. Ela vai diminuindo devido às resistências que se opõem ao seu movimento. Por isso o raio da circunferência que ela descreve também vai diminuindo, o que resulta numa trajetória em espiral.

4. Suponha que, na Figura 14, a partícula que descreve a espiral da esquerda seja um elétron que penetrou na câmara de bolhas com uma velocidade de $2,0 \cdot 10^6$ m/s. Se campo magnético for uniforme e tiver intensidade de $5 \cdot 10^{-4}$ T, qual o raio da circunferência descrita inicialmente pelo elétron?
São dados: carga do elétron $\Rightarrow e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C
massa do elétron $\Rightarrow m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg

Solução:

Basta aplicar a relação $r = \dfrac{m \cdot v}{B \cdot q}$, onde q = e:

$$r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 2,0 \cdot 10^{6}}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}$$

$\mathbf{r = 2,275 \cdot 10^{-2}\ m}$

A magnetita e a bússola foram os primeiros indícios que o ser humano teve da existência de algo que seus sentidos não podem detectar, o campo magnético. Muitos séculos foram necessários para que se ligassem os fenômenos magnéticos aos elétricos e surgisse o eletromagnetismo, cujas aplicações estão hoje presentes em todos os momentos de nossa vida. A orientação com o auxilio da bússola ainda hoje é usada com muita freqüência, mas tem, além dos mapas muito mais precisos, dispositivos auxiliares cada vez mais eficientes. Existem, por exemplo, pequenos receptores de sinais provenientes de satélites, capazes de informar com precisão a localização de seu portador. Esses receptores se tornaram possíveis graças às ondas eletromagnéticas, surgidas a partir do desenvolvimento científico e tecnológico originado pelo próprio eletromagnetismo.

Vivemos imersos num mar de ondas eletromagnéticas. Elas nos trazem o som e a imagem dos fatos que ocorrem em todo mundo. Pode-se dizer que, hoje, o eletromagnetismo é mais responsável do que nunca por nossa orientação. Ou desorientação...

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu:

- o que é magnetismo;
- o que é campo magnético e sua configuração em linhas de indução;
- a definição do vetor campo magnético e como determinar suas características;
- como interagem o campo magnético e uma carga elétrica;
- como se representam vetores tridimensionalmente;
- as características do movimento de uma carga elétrica num campo

magnético uniforme.

Exercício 1

Nas Figuras 15a, 15b, 15c e 15d estão representados os vetores $\vec{B}$ e $\vec{v}$ atuando sobre uma carga q positiva. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor $\vec{F}$ que atua em cada caso.

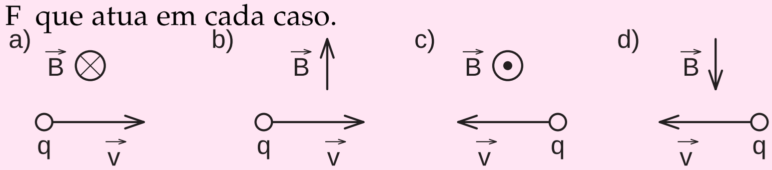


Figura 15

Exercício 2

Uma carga q de 2µC é lançada com uma velocidade de 180m/s numa região do espaço onde existe um campo magnético $\vec{B}$ de intensidade 0,4 T. Sabendo-se que as direções da velocidade da carga e do campo magnético são perpendiculares entre si, determine a intensidade da força que atua sobre a carga.

Exercício 3

Observe a Figura 16. Nela você vê a trajetória de três partículas numa câmara de bolhas imersa num campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para dentro do plano da figura. As setas indicam o sentido do movimento. Qual é o sinal da carga de cada partícula?

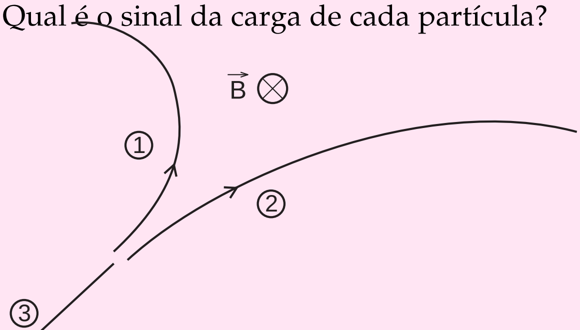


Figura 16

Exercício 4

Uma partícula de massa $m = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ kg e carga positiva $q = 6 \cdot 10^{-9}$ C penetra numa região onde existe um campo magnético uniforme, de intensidade de $5 \cdot 10^{-3}$ T, com velocidade de $6{,}0 \cdot 10^{4}$ m/s e perpendicular à direção do campo magnético. Qual o raio da circunferência descrita pelo elétron?

AULA

45

Hoje não tem vitamina, o liquidificador quebrou!

PARA COMEÇAR

Essa foi a notícia dramática dada por Cristiana no café da manhã, ligeiramente amenizada pela promessa de uma breve solução.

– Seu pai disse que arruma à noite!

– Vai ver que é outro fusível, que nem o chuveiro – palpitou Ernesto.

– Que fusível, que nada, é o motor do liquidificador que não funciona mesmo. Seu pai, o gênio da eletricidade, disse que deve ser um tal de carvãozinho que gastou.

– Carvãozinho?! Vai ver que ele confundiu o liquidificador com a churrasqueira – ironizou o menino.

Nesse ponto, a mãe achou bom liqüidar a conversa:

– O engraçadinho aí não está atrasado para a escola, não?

Aquele carvãozinho ficou na cabeça do Ernesto até a noite, quando Roberto chegou. Não teve nem alô.

– Ô, pai, o que é esse tal de carvãozinho de que a mãe falou?

A resposta foi fácil. Roberto, prevenido, tinha trazido um par de "carvõezinhos": duas barrinhas de grafite presas a duas molinhas, que os eletricistas costumam chamar de escovas. Conhecendo o filho, o pai foi logo dando a explicação completa.

– É isto aqui, ó. Essas pontas do carvãozinho é que dão o contato com o motor. A mola serve para manter o carvãozinho sempre bem apertado, para dar bom contato. Ele fica raspando no eixo do motor, por isso o pessoal chama isto aqui de escova. Com o tempo o carvãozinho gasta, fica muito curto, e a mola não consegue mais fazer com que ele encoste no motor. Aí não dá mais contato, precisa trocar.

É claro que a troca tinha de ser feita naquela mesma noite, com a palpitante assistência do filho. Roberto mostrou o rotor, as bobinas enroladas, o comutador e os velhos carvõezinhos gastos, com a esperada reação de Ernesto:

– Nossa, como gastou, heim, pai!

E o final, feliz, foi comemorado com o ruído do liquidificador triturando uma vitamina extra...

O contato por escovas é uma das muitas e engenhosas soluções tecnológicas criadas para permitir a aplicação prática dos fenômenos eletromagnéticos. Ele permite a passagem da corrente elétrica por um condutor em movimento, garantindo a continuidade desse movimento. Assim, permite a aplicação prática de um dos fenômenos eletromagnéticos que mais resultados práticos tem produzido: a ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica.

Esse é o assunto da nossa aula de hoje.

A ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica

Na aula passada, vimos que cargas elétricas em movimento estão sujeitas à ação do campo magnético. Uma corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas em movimento. Logo, uma corrente elétrica deve sofrer também a ação de uma força devida ao campo magnético.

Como não existe corrente sem condutor, essa força deve aparecer sempre que um condutor percorrido por uma corrente elétrica esteja imerso num campo magnético.

Para determiná-la, vamos supor, inicialmente, que um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente i, esteja imerso num campo magnético uniforme $\vec{B}$. Lembrando que só há força sobre uma carga em movimento se ela não se mover na mesma direção do campo magnético, o mesmo deve ocorrer para a corrente elétrica.

Vamos admitir, então, que esse condutor forme um ângulo θ diferente de 0^{o} e 180^{o} com o campo magnético $\vec{B}$.

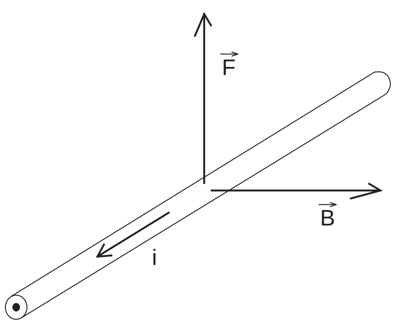


Figura 1. A direção e sentido do vetor $\vec{F}$ que atua sobre um condutor percorrido por uma corrente i, imerso num campo magnético uniforme $\vec{B}$.

Inicialmente, vamos determinar a **direção e o sentido da força** $\vec{F}$ que atua sobre esse condutor. Como, por convenção, o sentido da corrente é o sentido do movimento de cargas positivas, a determinação da direção e do sentido pode ser feita com o auxílio da mesma regra da mão direita utilizada para a determinação da força que atua sobre uma carga em movimento no campo magnético (a regra do tapa).

Basta substituir a velocidade pela corrente elétrica, ou seja, basta colocar o polegar no sentido da corrente elétrica. A palma da mão estendida continua indicando o sentido do campo magnético. A força, como antes, tem a direção e sentido do tapa. Veja a Figura 1.

Para calcular o **módulo da força** $\vec{F}$, vamos relembrar a equação da força sobre uma carga q em movimento num campo magnético, vista na aula passada:

$$\boxed{F = B \cdot q \cdot v \cdot \operatorname{sen}\theta}$$

Agora, porém, não temos apenas uma carga q, mas um condutor percorrido por uma corrente elétrica i. Lembrando a definição de corrente elétrica da Aula 40, temos:

$$\boxed{i = \frac{\Delta q}{\Delta t}}$$

Dessa expressão obtêm-se $\Delta q = i \cdot \Delta t$. A expressão da força pode então ser reescrita da seguinte maneira:

$$\boxed{F = B \cdot i \cdot \Delta t \cdot v \cdot \operatorname{sen}\theta}$$

Suponha agora que apenas uma segmento do condutor, de comprimento ℓ, esteja imerso no campo magnético. A intensidade da força vai depender da carga Δq que percorre esse segmento ℓ. Se a carga Δq percorre o segmento ℓ num intervalo de tempo Δt, a sua velocidade média será:

$$\boxed{v = \frac{\ell}{\Delta t}}$$

Fazendo a substituição na expressão da força, temos:

$$\boxed{F = B \cdot i \cdot \Delta t \cdot \frac{\ell}{\Delta t} \cdot \operatorname{sen}\theta}$$

Cancelando Δt, obtemos o valor da força:

$$\boxed{F = B \cdot i \cdot \ell \cdot \operatorname{sen}\theta}$$

Como seria de se esperar, essa é uma expressão muito semelhante à do módulo da força sobre uma carga em movimento. Também aqui, como no caso das cargas elétricas em movimento, a força será nula se o condutor estiver disposto na mesma direção do campo magnético.

Passo a passo

1. Nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d estão representados os vetores campo magnético $\vec{B}$, nos quais estão imersos condutores retilíneos percorridos por uma corrente elétrica i. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor $\vec{F}$ que atua sobre os condutores em cada caso.

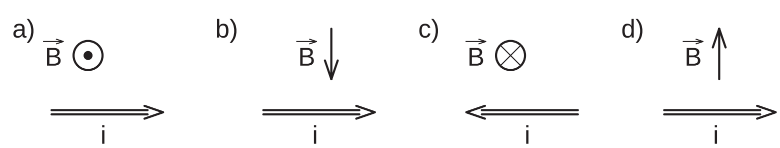


Figura 2

Solução:

Aplica-se a regra da mão direita: coloca-se a palma da mão na direção e sentido de $\vec{B}$ e, girando-a até que o polegar coincida com o sentido da corrente elétrica i, obtêm-se a direção e o sentido da força, que seriam a direção e o sentido de um "tapa" dado com essa mão.

Se a carga fosse negativa, a força teria a mesma direção, mas sentido oposto. Veja a Figura 3.

Figura 3

2. Um fio condutor retilíneo de 0,20 m de comprimento está disposto horizontalmente numa região em que existe um campo magnético também horizontal e uniforme de módulo B = 0,5 T. Suponha que esse fio seja percorrido por uma corrente elétrica i = 0,4 A. Determine o módulo e a direção da força que atua sobre esse fio quando ele:

a) esta na mesma direção do campo magnético $\vec{B}$

b) forma um ângulo de 53º com o campo magnético $\vec{B}$

c) é perpendicular ao campo magnético $\vec{B}$

Solução:

a) Se o fio condutor tem a mesma direção do campo, o ângulo θ é 0º ou 180º, cujo seno é zero. Portanto, **a força é nula**.

b) Se o fio e o campo são horizontais, é fácil ver que a força que atua sobre o fio é vertical. O sentido da força depende dos sentidos do campo e da corrente elétrica. Para calcular o módulo, basta aplicar a expressão $F = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta$.
Temos, então:
$F = 0{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}2 \cdot \text{sen}53^\circ$
Sendo sen 53º = 0,8, obtemos:
$\mathbf{F = 0{,}032N}$

c) Nesse caso, nada muda em relação à direção da força, que continua vertical. Se as direções são perpendiculares, θ = 90º e sen 90º = 1,0. Portanto, o módulo da força será dado pelo produto $F = B \cdot i \cdot \ell$. Temos, então:
$F = 0{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}2 \Rightarrow$
$\mathbf{F = 0{,}04\ N}$

Uma espira imersa num campo magnético - O efeito motor

Espira vem de espiral, nome que se dá a cada uma das voltas de um fio enrolado. Mas esse nome é usado mesmo quando a volta é retangular.

Imagine, então, uma espira retangular imersa num campo magnético uniforme, de maneira que dois de seus lados estejam dispostos perpendicularmente às linhas do campo.

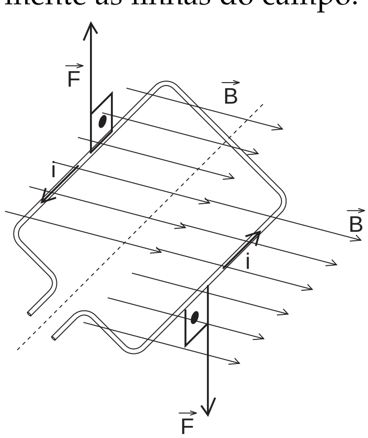


Figura 4. Uma espira retangular imersa num campo magnético: os lados perpendiculares à direção do campo sofrem a ação de forças verticais mas de sentidos opostos.

É fácil ver que uma corrente elétrica i percorrendo essa espira vai ter sentidos opostos em lados opostos. Suponha agora que o campo magnético e o plano da espira sejam horizontais. Pela regra da mão direita, pode-se verificar que os lados da espira que são perpendiculares ao campo magnético vão sofrer a ação de forças verticais, de sentidos opostos. Note que essas forças tendem a fazer a espira girar. Veja a Figura 4.

Os outros dois lados estão na mesma direção do campo e, por isso, não sofrem a ação de força.

Se essa espira tiver de torcer uma pequena mola, por exemplo, que se oponha ao seu movimento, será possível avaliar a corrente elétrica que a percorre. Quanto maior a corrente, maior a torção. Fixando-se um ponteiro à espira (ou a um conjunto de espiras), pode-se medir a intensidade da corrente elétrica. Esse é o princípio de funcionamento do galvanômetro, elemento básico dos medidores elétricos. Veja a Figura 5.

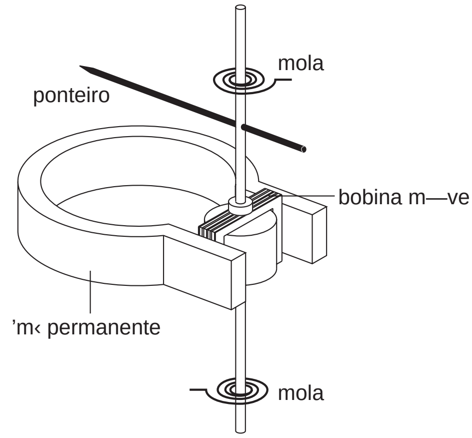


Figura 5. O princípio de funcionamento do galvanômetro: a mola se opõe à rotação da espira permitindo a medida da corrente elétrica que a percorre.

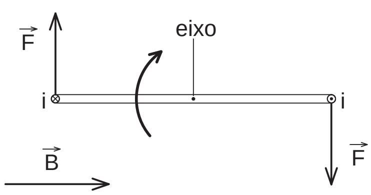


Figura 6a. As forças nos ramos paralelos fazem a espira girar no sentido anti-horário.

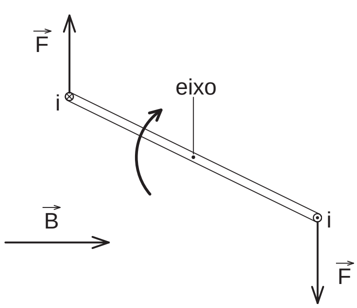


Figura 6b. Mesmo em movimento, as forças se mantêm na mesma direção e sentido.

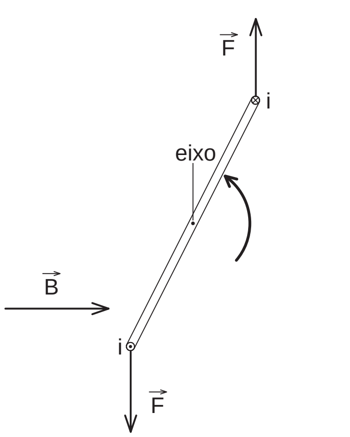


Figura 6c. Quando ela passa do plano vertical o sentido de rotação se inverte. Note que o sentido de percurso da corrente elétrica também se inverteu.

Suponha agora que essa espira esteja apoiada num eixo, de forma que as forças que atuam nos seus lados possam fazê-la, de fato, girar. Veja a Figura 6a.

Vamos acompanhar o seu movimento. É interessante notar que, à medida que a espira se movimenta, a direção e o sentido das forças que atuam nos seus lados não mudam, pois os sentidos da corrente e do campo continuam os mesmos. Veja a Figura 6b.

Por isso, quando o lado de cima fica à esquerda do lado de baixo, o sentido de rotação se inverte. A espira que estava girando no sentido anti-horário passa a girar no sentido horário. Veja a Figura 6c.

A espira, nessas condições, vai adquirir um movimento de vaivém.

Se, de alguma forma, for possível fazer com que o sentido de rotação se mantenha constante, essa espira será o elemento básico de um motor. Isso se consegue com um comutador – dois contatos móveis ligados a um gerador por meio de um par de escovas (os carvõezinhos da nossa história).

Como você pode ver na Figura 7, esses contatos móveis permitem que a corrente elétrica percorra a espira sempre no mesmo sentido, fazendo com que as forças atuem sobre ela de maneira a produzir um sentido único de rotação. Esse é o chamado **efeito motor**, porque nele se baseia a maior parte dos motores elétricos.

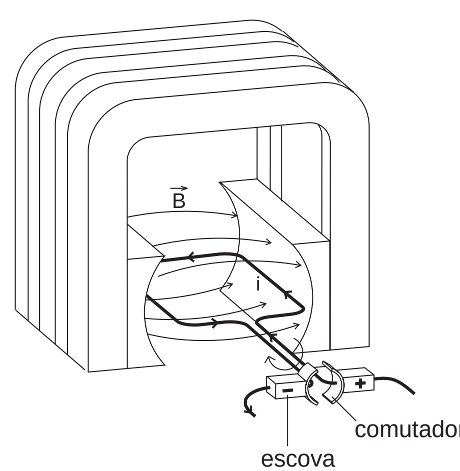


Figura 7. Um sistema de comutadores, contatos móveis por escovas, faz com que a espira seja percorrida pela corrente sempre no mesmo sentido, garantindo um sentido único de rotação

Campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica

Se um campo magnético $\vec{B}$ pode atuar sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica, podemos supor que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gere um campo magnético. Esse efeito, aliás, foi a primeira constatação experimental de que a eletricidade e o magnetismo eram aspectos de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo. Trata-se da experiência de Oersted, a que já nos referimos na aula anterior.

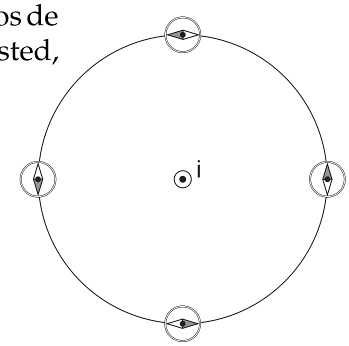


Figura 8. Campo magnético gerado por um condutor retilíneo. Observe que a agulha da bússola é tangente em cada ponto a uma circunferência com centro no condutor.

Quais são as características desse campo magnético $\vec{B}$? Para saber, precisamos dar a direção, o sentido e o módulo de $\vec{B}$. Para isso vamos, inicialmente, descrever uma experiência.

Suponha que se coloque um longo condutor retilíneo verticalmente, atravessando uma mesa horizontal. Sobre essa mesa vamos colocar uma bússola que possa circundar esse condutor.

Vamos supor também que pelo condutor passa uma corrente elétrica suficientemente intensa. Isso é importante para que o campo magnético gerado pelo condutor seja bem mais forte que o campo magnético terrestre, ou seja, para que a orientação da bússola indique apenas a ação do campo gerado pelo condutor.

Movendo, então, a bússola sobre a mesa, vamos perceber que as linhas do campo magnético descrevem círculos em torno do condutor. Veja a Figura 8.

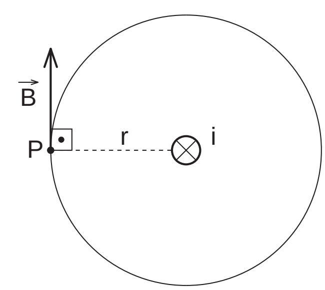


Figura 9. O campo magnético em P tem a direção da tangente à circunferência de raio r e o sentido indicado pela regra da mão direta. A corrente i está orientada para dentro do plano da figura.

Dessa forma podemos determinar a direção, o sentido e o módulo do campo magnético $\vec{B}$ gerado num ponto P, a uma distância r do condutor. A experiência mostrou que esse campo tem a direção da tangente à circunferência que passa por P. Essa circunferência tem raio r, que é a distância de P ao condutor e está contida num plano perpendicular ao condutor. Na nossa experiência, esse plano é o plano da mesa. Veja a Figura 9.

A experiência permite ainda a determinação do sentido do campo. Ele pode ser obtido por uma regra prática, utilizando-se também a mão direita. Basta colocar o polegar no sentido da corrente e dobrar os dedos: eles indicarão o sentido de $\vec{B}$. Veja a Figura 10.

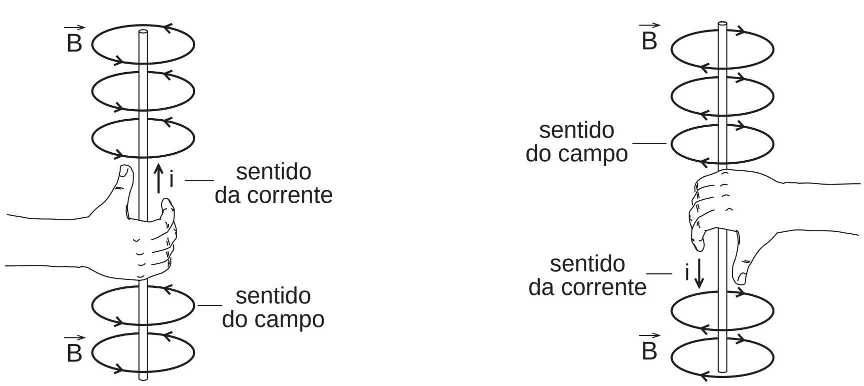


Figura 10. Regra da mão direita para o campo magnético gerado por um condutor

O módulo de $\vec{B}$ é determinado também a partir de verificações experimentais. Verifica-se que para um condutor muito longo, em relação à distância r, o campo magnético gerado por um condutor percorrido por uma corrente elétrica i no ponto P tem as seguintes características:

I) **B** é diretamente proporcional a **i**
II) **B** é inversamente proporcional a **r**

Matematicamente, essas relações pode ser expressas da seguinte maneira:

$$\boxed{B = \text{constante} \cdot \frac{i}{r}}$$

Essa constante, no vácuo, vale $2 \cdot 10^{-7}$T m/A. Portanto, a expressão do módulo de $\vec{B}$ pode ser escrita na forma:

$$\boxed{B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{r}}$$

Passo a passo

3. Na Figura 11 está representado um condutor retilíneo, perpendicular ao plano da figura. Ele é percorrido por uma corrente i = 2,0 A, dirigida para fora do plano da figura (a corrente elétrica não é um vetor, mas utilizamos a mesma representação na figura para facilitar a compreensão).
Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos A e B situados a 0,1 m do condutor.

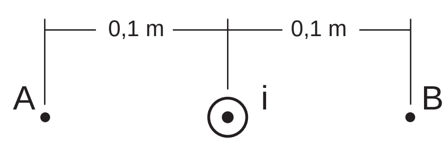


Figura 10

Solução:

O módulo do campo magnético em B é o mesmo nos pontos A e B, pois ambos estão à mesma distância r = 0,1 m do condutor. Aplicando-se a expressão de B, temos, portanto:

$$B_A = B_B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{r}$$

$$B_A = B_B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0 \;\#\; 0{,}1$$

$$B_A = B_B = 4 \cdot 10^{-8} \text{ T}$$

Para determinar a direção e o sentido de $\vec{B}$, basta aplicar a regra da mão direita. Em A o vetor $\vec{B}$ terá direção **vertical** e sentido **para baixo**; em B, **vertical para cima** (estamos supondo que o plano da figura é horizontal).

Força entre condutores retilíneos e paralelos

Se um condutor percorrido por uma corrente elétrica pode gerar um campo magnético, e se um campo magnético pode exercer uma força sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica, pode-se concluir que dois condutores percorridos por corrente elétrica exercem forças entre si.

O caso mais interessante de ação mútua entre dois condutores ocorre quando esses condutores são paralelos. Vamos inicialmente examinar o caso em que as correntes têm o mesmo sentido. Veja a Figura 12.

O condutor 1, percorrido por uma corrente elétrica i_1, gera um campo magnético $\vec{B}_1$, onde se encontra o condutor 2 percorrido pela corrente elétrica i_2. Aplicando as duas regras da mão direita que aprendemos, podemos determinar a direção e o sentido de $\vec{B}_1$ atuando no condutor 2, e qual a força $\vec{F}_1$ que esse campo faz aparecer nesse condutor. Essa força vai ter o sentido de aproximar o condutor 2 do condutor 1.

Se fizermos o mesmo raciocínio para determinar a força que o condutor 2 exerce sobre o condutor 1, vamos obter também uma força que tende a aproximar 1 de 2.

Conclui-se, portanto, que **condutores paralelos percorridos por correntes elétricas no mesmo sentido se atraem**.

Repetindo o mesmo raciocínio para correntes de sentidos opostos, vamos observar forças de repulsão entre eles. Veja a Figura 13.

Portanto, **condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de sentidos opostos se repelem**.

É interessante notar que esse fenômeno originou a definição da unidade fundamental de corrente elétrica do SI, o **ampère**:

O ampère é a corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de espessura desprezível e comprimento infinito, separados por uma distância de 1 metro, gera em, cada um desses condutores, uma força de $2 \cdot 10^{-7}$ newtons por metro de comprimento.

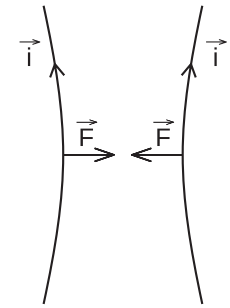


Figura 12
Forças de interação entre condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de mesmo sentido

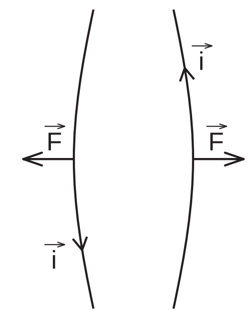


Figura 13
Forças de interação entre condutores paralelos percorridos por corrente elétricas em sentidos opostos.

Campo gerado por uma bobina ou solenóide

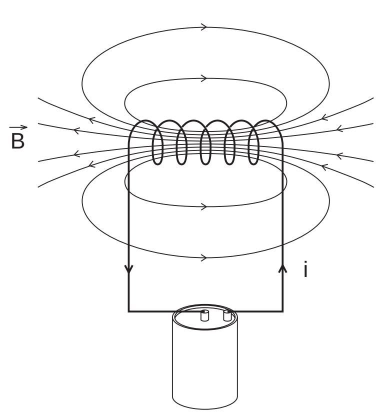


Figura 14. Campo magnético gerado por um solenóide

Se um condutor retilíneo gera um campo magnético circular, pode-se imaginar que um condutor circular, formando uma espira, gere um campo magnético retilíneo.

Isso de fato pode ocorrer quando, em vez de uma única espira, tivermos um conjunto de espiras enroladas formando uma bobina ou solenóide. Veja a Figura 14.

Pode-se notar na figura que, quanto maior o número de espiras, maior o solenóide e, conseqüentemente, mais retilíneas serão as linhas do campo magnético no interior do solenóide.

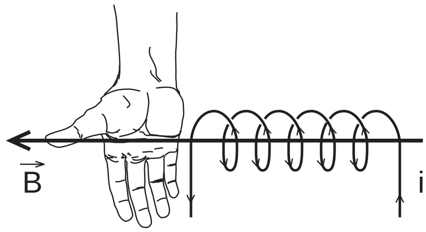


Figura 15. Campo no interior de um solenóide – regra da mão direita.

Note que a mesma regra da mão direita que indica o sentido do campo gerado por um condutor retilíneo é aplicada ao solenóide, invertendo-se o papel dos dedos e do polegar. Nesse caso, devemos colocar os dedos em curva de acordo com o sentido da corrente elétrica que percorre o solenóide. O sentido do campo, no interior do solenóide, será indicado pelo polegar. Veja a Figura 15.

O campo no interior de um solenóide é diretamente proporcional ao número de espiras e à intensidade da corrente que as percorre. Se o interior, o núcleo do solenóide, for preenchido com um material ferromagnético, a intensidade do campo magnético aumenta enormemente.

Aliás, é dessa forma que se constróem os eletroímãs, bobinas enroladas em núcleos de ferro que, quando percorridas por uma corrente elétrica geram um intenso campo magnético.

A grande vantagem do eletroímã, além do intenso campo magnético que pode gerar, é a possibilidade de ser acionado, ou não, bastando uma chave que permita, ou não, a passagem da corrente elétrica. Os eletroímãs têm inúmeras aplicações tecnológicas, desde simples campainhas e relês a gigantescos guindastes. Veja a Figura 16.

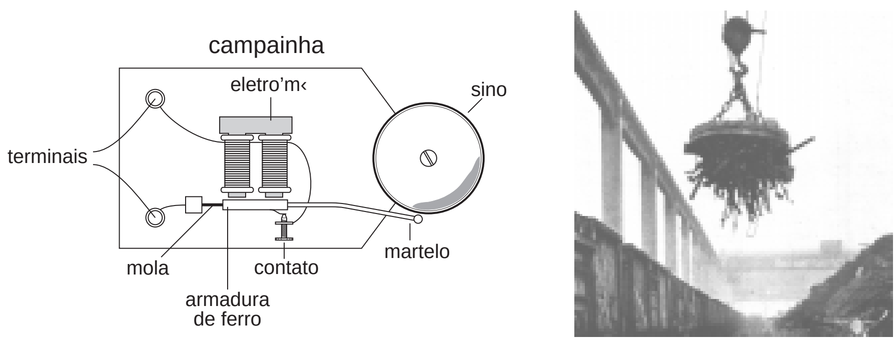


Figura 16. Aplicações tecnológicas do eletroímã

A ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica e o fenômeno inverso, a geração de um campo magnético por uma corrente elétrica, são conhecidos há quase dois séculos. São, certamente, fenômenos responsáveis por uma revolução tecnológica que modificou drasticamente a nossa vida.

Mas essa revolução não surgiu imediatamente. Embora já se conhecesse a tecnologia dos eletroímãs, com suas inúmeras aplicações, demorou ainda algumas décadas para que tudo isso pudesse de fato ser aplicado na prática. Faltava desenvolver uma tecnologia capaz de gerar a enorme quantidade de energia que esses dispositivos exigiam. As pilhas eram as únicas fontes de energia elétrica, mas eram (e ainda são...) caras e muito pouco práticas. Para iluminar alguns metros de rua eram necessárias enormes pilhas que utilizavam substâncias químicas incômodas e poluentes.

Essa nova tecnologia começou a surgir em 1831, quando foi descoberto um novo fenômeno eletromagnético: a **indução eletromagnética**. Um campo magnético variável, junto a um circuito elétrico, faz aparecer uma corrente elétrica nesse circuito. É o princípio básico dos geradores e das grandes usinas de eletricidade, que tornaram possível uma nova era – a era da eletricidade.

Nesta aula você aprendeu:

- como um campo magnético atua sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica;
- como determinar as características da força de interação entre o campo magnético e a corrente elétrica;
- a ação de um campo magnético sobre uma espira de corrente;
- as características de um campo magnético gerado por uma corrente elétrica;
- como interagem dois condutores paralelos percorridos por correntes elétricas;
- as características do campo magnético gerado por um solenóide.

Exercício 1

Nas Figuras 17 a, 17 b, 17 c e 17 d estão representados os vetores campo magnético $\vec{B}$ de diferentes regiões, nos quais estão imersos condutores retilíneos percorridos por uma corrente elétrica i. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor $\vec{F}$ que atua sobre os condutores em cada caso.

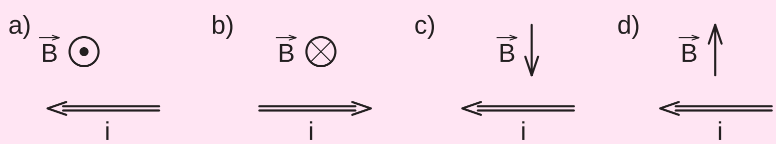


Figura 17

Exercício 2

Um fio condutor retilíneo de 0,50 m de comprimento está disposto horizontalmente em uma região na qual existe um campo magnético, também horizontal e uniforme, de módulo B = 0,35 T. Suponha que esse fio seja percorrido por uma corrente elétrica i = 0,8 A. Determine o módulo e a direção da força que atua sobre esse fio quando ele:

a) está na mesma direção do campo magnético $\vec{B}$.
b) forma um ângulo de 37º com o campo magnético $\vec{B}$.
c) é perpendicular ao campo magnético $\vec{B}$.

Exercício 3

Na Figura 18 está representado um condutor retilíneo, muito comprido, perpendicular ao plano da figura, percorrido por uma corrente i = 2,5 A, dirigida para dentro do plano da figura. Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos A e B, situados a 0,05 m do condutor.

Figura 18

AULA

46

Alguém aí tem um transformador para emprestar?

PARA COMEÇAR

A família veio de muito longe. Mudara-se de São Luís para São Paulo. A turma falou sobre a nova vizinha, uma moreninha encantadora. Ernesto foi lá conferir. Teve sorte. Ela apareceu na janela e, muito preocupada, reclamava com a mãe, que estava cuidando do jardim:

– Vixe, mainha! A televisão não funciona! Será que quebrou na mudança?

– Quebrou não, filhinha – tranqüilizou a mãe. – É que a força aqui em São Paulo é diferente da de São Luís. A gente vai precisar de uma porção de transformadores.

E, comunicativa como ela só, botou o garotão na jogada:

– O menino aí não tem um transformador em casa pra emprestar pra gente?

– Não sei, não, senhora, só falando com meu pai – respondeu Ernesto. E não perdeu a deixa:

– Mas, se a sua filha quiser, pode ir ver televisão lá em casa!

– Precisa não, garoto, a gente dá um jeito – respondeu a zelosa mãe ludovicense, esfriando o entusiasmo do garotão.

À noite, é claro, o assunto foram os novos vizinhos, a moreninha e os transformadores. Por que em São Luís a "força" era diferente da de São Paulo? E os transformadores, transformavam o quê no quê?

Roberto agora teve mais dificuldades. Explicou que as linhas de transmissão, que traziam a energia elétrica das usinas para as nossas casa, tinham alta voltagem. E que os transformadores iam reduzindo essa voltagem pelo caminho, conforme as necessidades ou exigências de cada região.

– Quer dizer que a gente pode aumentar ou diminuir a voltagem quanto quiser? – animou-se o Ernesto.

– Claro, é só ter o transformador certo para isso – arriscou Roberto.

– Então a gente podia ligar um transformador numa pilha e ligar na televisão da vizinha?

Roberto embatucou.

– Agora você me pegou, filho. Nunca vi ninguém ligar uma pilha num transformador, mas não sei por quê – confessou Roberto.

Será que isso é possível? Afinal, o que o transformador transforma?

Tudo isso tem a ver com a indução eletromagnética, o assunto desta aula.

A indução eletromagnética

A possibilidade de existência do fenômeno da indução eletromagnética resulta de uma observação e de um raciocínio simples. Se cargas elétricas em movimento – uma corrente elétrica – geram um campo magnético, então um campo magnético em movimento deve gerar uma corrente elétrica.

Em 1831, os físicos Joseph Henry, norte-americano, e Michael Faraday, inglês, conseguiram verificar experimentalmente esse fenômeno. Aproximando e afastando um ímã de uma bobina ligada a um galvanômetro (um medidor de corrente elétrica), eles puderam notar que o ponteiro do galvanômetro se movia. Isso mostrava o aparecimento de uma corrente elétrica induzida na bobina pelo movimento do ímã.

Como se previa, a variação do campo magnético, provocada pelo movimento do ímã, gerava uma corrente elétrica.

A experiência, no entanto, mostra ainda mais. O movimento do ponteiro tem sentidos diferentes quando o imã se aproxima e quando se afasta. Isso significa que o sentido da corrente induzida na bobina depende da forma como o campo magnético varia. Veja as Figuras 1a e 1b.

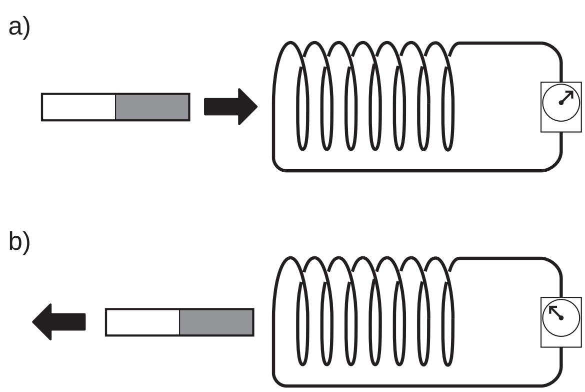


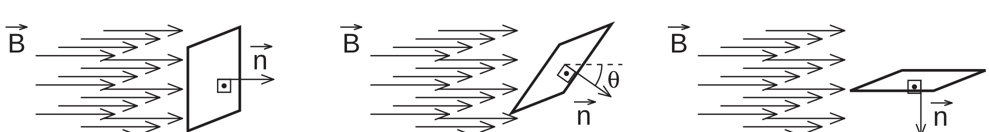
Figura 1. A indução eletromagnética. O ponteiro do galvanômetro indica a passagem de corrente elétrica pela bobina. Veja que, em **a** e **b**, os sentidos do movimento do ponteiro (deflexão) são opostos.

E não é só isso. A intensidade da corrente elétrica, indicada pela maior ou menor deflexão do ponteiro, depende da maior ou menor rapidez do movimento do ímã. Essas observações são muito importantes, pois deram origem às duas leis básicas de indução eletromagnética: as leis de Faraday e Lenz.

O fluxo magnético e a lei de Faraday

Para entender a lei de Faraday é necessário entender um novo conceito: o **fluxo magnético**. Suponha que numa região do espaço exista um campo magnético $\vec{B}$, uniforme. Imagine um retângulo dentro desse campo e uma reta perpendicular ao plano do retângulo.

Conforme a posição em que esse retângulo estiver, varia o número de linhas do campo magnético que o atravessam. Isso significa que o fluxo magnético que atravessa o retângulo varia.



Figuras 2a, 2b e 2c. O fluxo do campo magnético $\vec{B}$ na superfície do retângulo.

Veja as Figuras 2a, 2b e 2c. Em 2a o fluxo é máximo: o plano do retângulo é perpendicular à direção das linhas do campo magnético. Nesse caso, o vetor $\vec{B}$ tem a mesma direção do vetor $\vec{n}$, ou seja: o ângulo θ, entre $\vec{B}$ e $\vec{n}$, é igual a zero.

Em 2b, o número de linhas que atravessam o retângulo é menor, portanto o fluxo é menor. Observe que, aqui, o ângulo θ entre $\vec{B}$ e o vetor $\vec{n}$ já não é mais igual a zero.

Em 2c, o plano do retângulo é paralelo às linhas do campo magnético. Nesse caso, nenhuma linha atravessa o retângulo, ou seja, o fluxo através do retângulo é nulo. Observe que agora o ângulo θ é de 90º.

Mas não é apenas a relação entre as linhas do campo magnético e a superfície do retângulo que importa para a compreensão do conceito de fluxo magnético. Se a intensidade do campo magnético $\vec{B}$ for maior haverá mais linhas e, portanto, o fluxo será maior. Além disso, se a área **A** do retângulo for maior, haverá também mais linhas passando por ele. O fluxo magnético também será maior. Todas essas considerações podem ser reunidas numa expressão matemática que define o fluxo magnético. Representando o fluxo pela letra grega **Φ** (fi, maiúsculo), essa definição é expressa assim:

$$\boxed{\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta}$$

A unidade de fluxo é **T m²**, ou seja, o produto da unidade de campo magnético pela unidade de área, já que o co-seno é um número puro, adimensional. Essa unidade se chama **weber**, cujo símbolo é **Wb**, em homenagem a Wilhelm Weber, físico alemão que viveu no século XIX.

Observe que o co-seno aparece nessa expressão mostrando como varia o fluxo em função do ângulo θ. Quando $\theta = 0º$, o retângulo é atravessado pelo maior número possível de linhas de força. Nesse caso o co-seno é 1, ou seja, o fluxo é máximo. Quando $\theta = 90º$, nenhuma linha de força atravessa o retângulo. O co-seno de 90º é zero, ou seja, o fluxo é nulo.

Imagine agora que o retângulo seja uma espira de fio condutor. Faraday notou que o fator determinante para a geração da corrente elétrica nessa espira de fio condutor é a **variação do fluxo magnético** que a atravessa. Essa variação pode ocorrer de dois jeitos principais. Um deles é aproximar ou afastar um ímã da espira, mantendo a espira fixa. Aproximando-se um ímã da espira, o número de linhas de campo que atravessam a espira aumenta, isto é, o valor de $\vec{B}$ aumenta. Afastando-se o ímã, o valor diminui. Em ambos os casos, o fluxo, **Φ**, varia, e aparece uma corrente elétrica na espira. Mais ainda: quanto maior a rapidez com que o fluxo magnético varia, maior a corrente elétrica induzida.

O outro jeito é fazer a espira girar. Girando, o fluxo magnético varia porque o ângulo θ varia. Nesse caso, a maior rapidez de variação do fluxo também aumenta a intensidade da corrente induzida. Essa rapidez, aqui, está relacionada diretamente com a freqüência de rotação da espira. Veja a Figura 3.

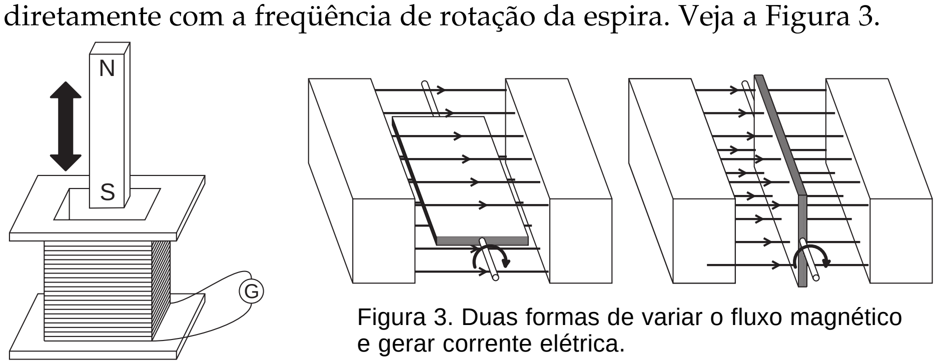


Figura 3. Duas formas de variar o fluxo magnético e gerar corrente elétrica.

No entanto, a corrente elétrica é conseqüência, não é causa. Isso quer dizer que, se aparece uma corrente num circuito, é porque surge alguma coisa fornecendo energia aos elétrons. Alguém faz o papel da criança que coloca bolas no alto do escorregador, como na analogia que fizemos na Aula 42 para explicar como funcionava um gerador e definir força eletromotriz. Esse papel é feito pelo movimento, pela energia cinética do ímã ou da espira. Nesses dois exemplos, portanto, uma energia é fornecida aos elétrons quando se movimenta o ímã ou a espira. E essa energia é que faz os elétrons se mover.

Em outras palavras, na realidade a variação do fluxo magnético numa espira ou circuito gera uma **força eletromotriz induzida** nesse circuito. Essa força eletromotriz, por sua vez, gera uma corrente elétrica. Se o circuito estiver interrompido – se houver uma chave aberta, por exemplo – a corrente não circula, embora a força eletromotriz induzida continue existindo. Por isso é que dissemos que a corrente elétrica é conseqüência, não é causa. E, também por essa razão, a lei de Faraday é definida a partir da fem ε induzida e não da corrente elétrica induzida.

A lei de Faraday, portanto, estabelece que sempre que um circuito elétrico estiver imerso num fluxo magnético variável, surge, nesse circuito, uma fem induzida ε. Essa fem será tanto maior quanto mais rápida for essa variação. Matematicamente essa lei pode ser expressa na forma:

$$\boxed{\varepsilon_{\text{induzida}} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

O fator ΔΦ indica a variação do fluxo e Δt indica o intervalo de tempo em que essa variação ocorre. Como o fator Δt está no denominador, quanto menor o intervalo de tempo, maior o valor de ε.

Passo a passo

1. Suponha que, na Figura 2, o retângulo seja uma espira de área 200 cm^2 (igual a 0,02 m^2), e que a intensidade do campo magnético seja B = 0,5 T. Qual o fluxo magnético que atravessa a espira na posição a, quando o ângulo θ = 90º , e na posição b, supondo que θ = 45º?

Solução

Na posição a, como θ = 90º, cos θ = 1,0. Portanto, o fluxo é dado por:

$\Phi = B \cdot A \Rightarrow F = 0{,}5 \cdot 0{,}02$
$\Phi = 0{,}01$ Wb

Na posição b, temos:

$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta \Rightarrow \Phi = 0{,}5 \cdot 0{,}02 \cdot \cos 45^\circ \Rightarrow F = 0{,}01 \cdot 0{,}71$
$\Phi = 0{,}0071$ Wb

2. Na Figura 4, suponha que uma bobina formada por 100 espiras circulares de 50 cm^2 de área esteja diante de um eletroímã. Suponha que o campo magnético gerado por esse eletroímã tenha intensidade B = 0,8 T e seja uniforme na região onde está a bobina. Suponha ainda que o plano da bobina seja perpendicular às linhas desse campo:

a) qual o fluxo magnético que passa por essa bobina?

b) o que acontece na bobina se o eletroímã for desligado?

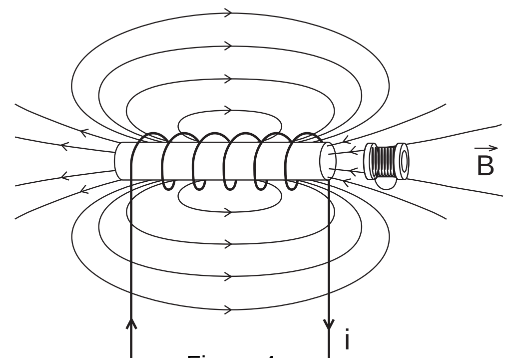


Figura 4

Solução

a) Pela definição de fluxo, cada espira estará sujeita ao fluxo $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$. No entanto, se a bobina tiver N espiras iguais, o fluxo na bobina será N vezes maior que o fluxo em cada espira. Teremos então:

$\Phi_{BOBINA} = N \cdot \Phi_{ESPIRA}$
$\boldsymbol{\Phi_{BOBINA} = N \cdot B \cdot A \cdot \cos\theta}$

Como a espira é perpendicular às linhas de campo, $\theta = 0^{\circ}$, portanto $\cos\theta = 1$ e, portanto:

$\Phi_{ESPIRA} = B \cdot A$. Então o fluxo na bobina será:
$\Phi_{BOBINA} = N \cdot B \cdot A$

Sendo N = 100, B = 0,8 T e A = 50 cm^2 = 0,0050 m^2, temos:

$\Phi_{BOBINA} = 100 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}005$
$\boldsymbol{\Phi_{BOBINA} = 0{,}4\ Wb}$

b) Quando o eletroímã é desligado, o campo magnético deixa de existir e, conseqüentemente, o fluxo na bobina torna-se nulo. Ele sofre, portanto, uma variação, passando de 0,4 Wb a zero. Logo, em módulo, $\Delta\Phi = 0{,}4$ Wb. Se há uma variação no fluxo, deve surgir uma força eletromotriz induzida na bobina. A intensidade dessa fem, entretanto, depende do intervalo de tempo Δt em que essa variação ocorre. Esse intervalo de tempo não é nulo, porque há uma espécie de inércia na corrente elétrica que percorre o eletroímã e que impede o seu desligamento imediato. Vamos admitir, apenas para exemplificar, que esse intervalo de tempo seja $\Delta t = 0{,}1$ s. Nesse caso, a fem na bobina seria de

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Rightarrow \varepsilon = \frac{0{,}4}{0{,}1}$$

$\boldsymbol{\varepsilon = 4{,}0\ V}$

A lei de Lenz

Heinrich Lenz foi um físico russo que, três anos depois de Faraday e Henri, em 1834, enunciou a lei que complementa a nossa compreensão da indução eletromagnética. Toda vez que introduzimos ou retiramos um ímã de uma bobina ou solenóide ligada a um circuito fechado, sentimos uma força contrária ao movimento desse ímã. Ela se opõe tanto à entrada como à saída do ímã do interior do solenóide. Veja a Figura 5. Lenz interpretou corretamente esse fenômeno, ao perceber que essa oposição se devia ao campo magnético que o próprio ímã induzia na bobina.

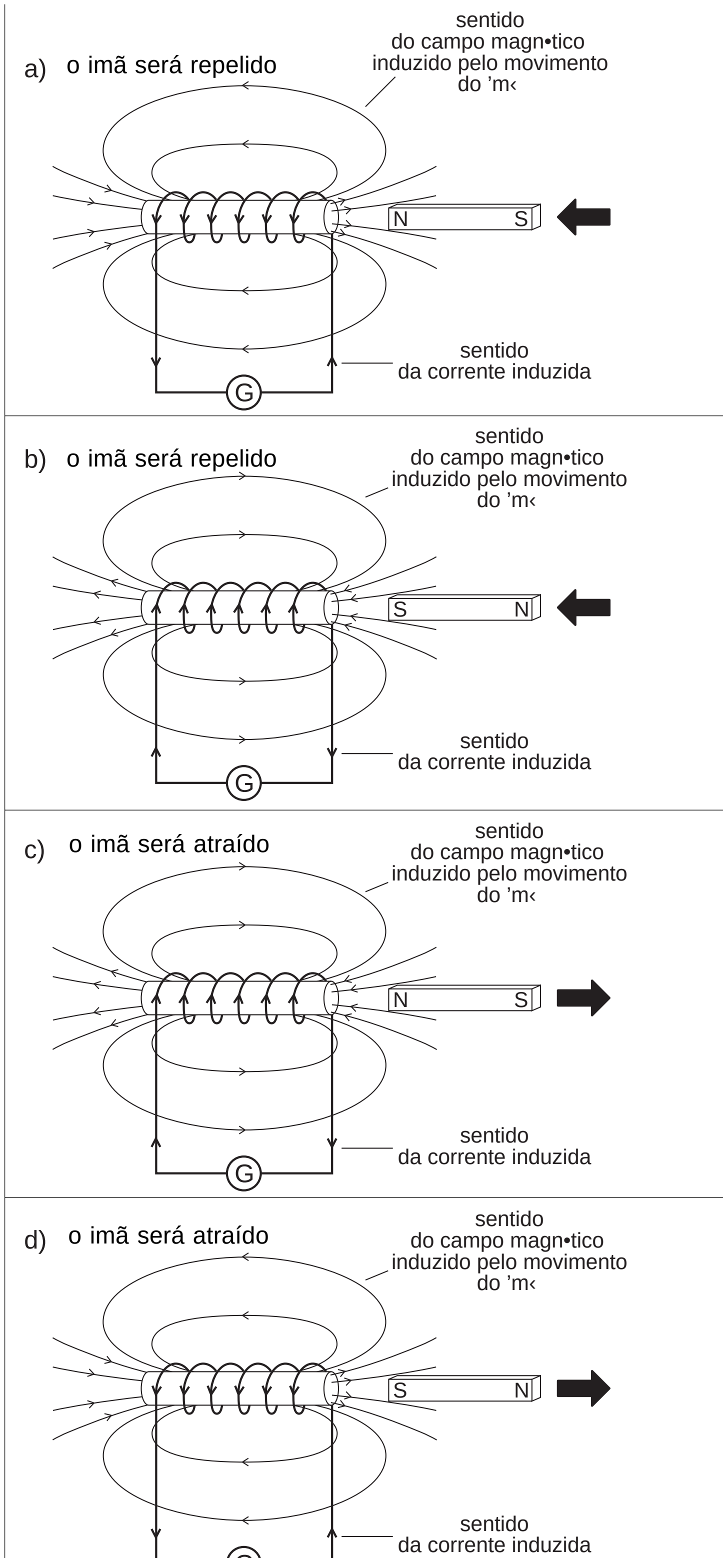
Pela lei de Faraday, quando o ímã se aproxima da bobina, surge na bobina uma fem induzida. Essa fem faz aparecer uma corrente elétrica na bobina, que, por sua vez, gera um campo magnético. Lenz concluiu que esse campo magnético terá sempre um sentido que se opõe ao movimento do ímã. Se o ímã se **aproxima** da bobina pelo seu pólo norte, a corrente elétrica induzida na bobina tem um sentido tal que faz aparecer um pólo norte na extremidade da bobina em frente ao ímã.

Como se sabe, pólos iguais se repelem, e por isso surge uma oposição à entrada do ímã. Veja a Figura 5a. Se o ímã se **aproximasse** pelo pólo sul, a corrente induzida teria o sentido oposto, fazendo aparecer um pólo sul nessa extremidade da bobina. Veja a Figura 5b. Se retiramos ou **afastamos** o pólo norte do ímã, surge na bobina uma corrente elétrica que cria um pólo sul, "segurando" o ímã. Veja a Figura 5c. Da mesma forma, se afastamos o pólo sul do ímã, aparece um pólo norte na bobina para segurar o ímã. Veja a Figura 5d.

Observe que, utilizando a regra da mão direita, podemos, a partir dessas observações, determinar facilmente o sentido da corrente elétrica induzida na bobina em cada caso.

É importante notar que essas observações são válidas para todas as situações em que o fluxo magnético varia num circuito elétrico, qualquer que seja a forma pela qual isso for feito. O campo magnético induzido por esse circuito sempre atua de maneira a se opor à ação que o criou. Esse é, em síntese, o enunciado da lei de Lenz:

Figura 5. Campo magnético induzido numa bobina devido à aproximação ou afastamento de um ímã



A variação do fluxo magnético num circuito induz, nesse circuito, uma corrente elétrica que gera um campo magnético que se opõe ao fenômeno responsável por essa variação.

O gerador de corrente alternada

A principal aplicação da indução eletromagnética é a possibilidade de construir geradores de corrente elétrica a partir da transformação da energia mecânica em energia elétrica. Imagine um circuito elétrico, formado por um determinado número de espiras, girando imerso num campo magnético. Como vimos na Figura 2, o fluxo magnético nesse circuito varia e, em conseqüência, aparece nesse circuito uma fem induzida.

Esse é o princípio dos geradores mecânicos, também chamados de dínamos. Esse tipo de gerador forneceu a energia elétrica necessária para inúmeras aplicações tecnológicas e trouxe inúmeras outras, devido principalmente à nova forma de corrente elétrica que ele gera, a **corrente alternada**. Para entender como funciona esse gerador e o que significa uma corrente alternada, vamos examinar a Figura 6, abaixo.

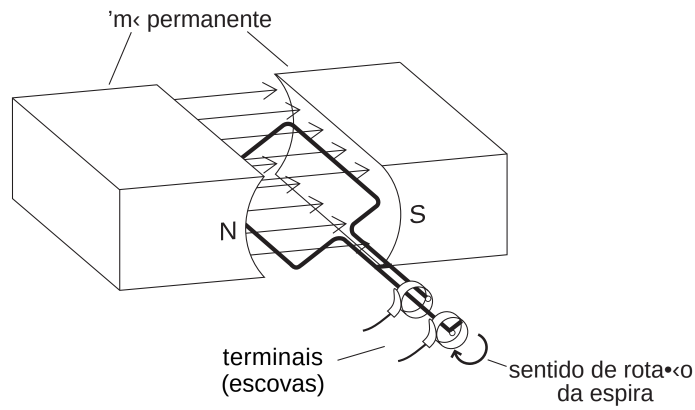
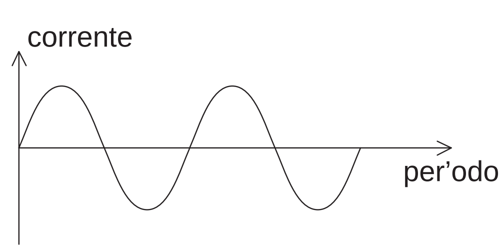


Figura 6. Um gerador de corrente alternada.

Na Figura 6 você pode observar como funciona um gerador de corrente alternada. À medida que a espira vai girando, o fluxo do campo magnético $\vec{B}$, gerado pelos ímãs, varia. De zero ele aumenta até atingir um valor máximo, depois diminui a zero novamente e assim sucessivamente. A corrente induzida na bobina, pela lei de Lenz, deve ter um sentido que produza um campo magnético que se oponha rotação da espira. Por isso ela tem um sentido variável ou oscilante, porque ora ela deve se opor a um fluxo que aumenta, ora deve se opor a um fluxo que diminui. É, portanto, uma **corrente alternada**. Veja a Figura 7.

É interessante notar que, diferentemente do que ocorre na **corrente contínua**, gerada pelas pilhas, na corrente alternada os elétrons em geral não se movimentam continuamente, ao longo do condutor, como naquela analogia que fizemos com a escola de samba. Eles apenas se mantêm oscilando entre posições fixas. Para utilizar a analogia da escola de samba, seria como se essa escola avançasse e recuasse, incessantemente, de uma determinada distância fixa.

Figura 7
Gráfico da intensidade da corrente em função do período T de rotação da espira.



A utilização prática da corrente alternada tem vantagens em relação à corrente contínua. Uma das grandes vantagens está na possibilidade de a corrente alternada ser gerada diretamente pelo movimento de rotação, que pode ser obtido facilmente com a utilização de turbinas impulsionadas pelo movimento da água, do vapor ou do vento. Essas fontes de energia são muito mais acessíveis e de potência muito maior do que as pilhas ou baterias que geram a corrente contínua. Outra vantagem da corrente alternada é que só com ela é possível o uso dos transformadores.

Transformadores

O funcionamento dos transformadores baseia-se diretamente na indução eletromagnética. Para entender melhor, vamos descrever uma experiência semelhante a uma das experiências realizadas por Faraday. Suponha que uma espira 1, circular, ligada a uma pilha com uma chave interruptora, está colocada em frente a outra espira 2, também circular, ligada a um galvanômetro muito sensível. Veja a Figura 8.

Se a chave estiver ligada, a corrente elétrica que passa pela espira 1, gera um campo magnético que vai atravessar a espira 2. Como a corrente produzida pela pilha é contínua, o campo magnético é constante e o fluxo magnético que atravessa a espira 2 não varia. Conseqüentemente, nada se observa no galvanômetro ligado à espira 2.

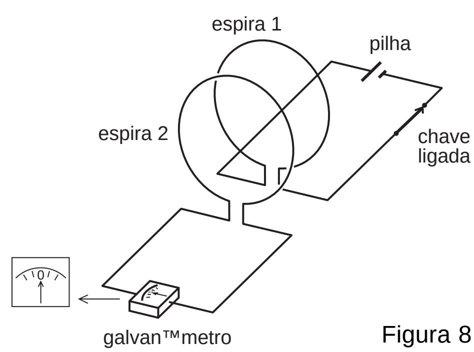


Figura 8

Se, no entanto, nós ligarmos ou desligarmos a chave, o fluxo varia, pois não existia e passa a existir e vice-versa. Observa-se então que o ponteiro do galvanômetro vai oscilar ora num sentido, no momento em que a chave é ligada, ora noutro, quando a chave é desligada. Se ficarmos ligando e desligando a chave sem parar, o ponteiro do galvanômetro vai ficar oscilando sem parar.

É fácil perceber que podemos substituir a pilha e a chave à qual está ligada a espira 1 por um gerador de corrente alternada, oscilante, que produz um efeito equivalente ao liga-desliga da chave. Nesse caso, o galvanômetro ligado à espira 2 também vai oscilar. Ou seja, a espira 1, percorrida por uma corrente alternada, induz uma outra corrente alternada na espira 2. Veja a Figura 9.

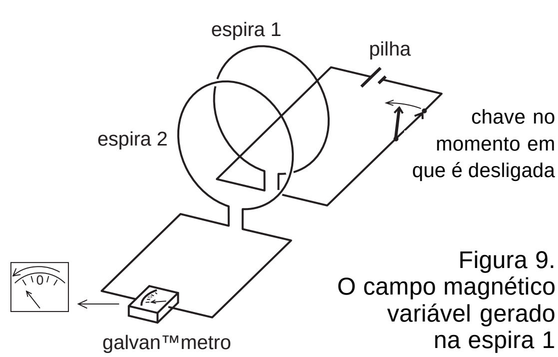
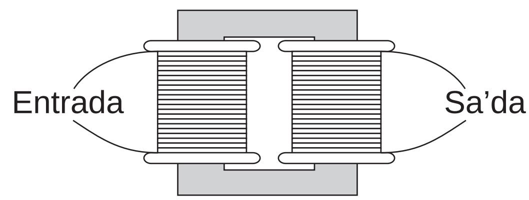


Figura 9.
O campo magnético variável gerado na espira 1 induz uma fem na espira 2.

Mas, como já dissemos anteriormente, a corrente elétrica existe porque existe uma fem ou diferença de potencial que a origina. O liga-desliga da chave, ou do gerador de corrente alternada, é, na verdade, uma fonte variável de fem ou de diferença de potencial. Assim, uma diferença de potencial variável V_1 na espira 1 induz uma diferença de potencial variável V_2 na espira 2.

No caso da Figura 9, apenas uma parte das linhas do campo magnético geradas pela espira 1 passa pela espira 2. Isso significa que só uma parte dessas linhas produz a variação do fluxo que gera a fem induzida na espira 2. A maior parte do campo magnético gerado na espira 1 não é aproveitada pela espira 2 (lembre-se de que as linhas do campo magnético não se localizam apenas no plano da figura: elas são espaciais, isto é, avançam para a frente e para trás desse plano). Sabemos, no entanto, que materiais ferromagnéticos têm a propriedade de concentrar as linhas de campo. Por isso, se enrolarmos as espiras 1 e 2 num mesmo núcleo de material ferromagnético, praticamente todas as linhas de campo geradas pela espira 1 vão passar pela espira 2. Veja a Figura 10. Esse é o princípio de funcionamento do transformador.

Figura 10
Um transformador utilizado para demonstrações didáticas.



Mas por que ele se chama transformador? Para responder a essa pergunta vamos supor que, em lugar das espiras 1 e 2, tenhamos bobinas 1 e 2, com diferentes números de espiras enroladas em cada uma. Suponhamos que a bobina 1 tenha N_1 espiras e que a bobina 2 tenha N_2 espiras. Se a bobina 1 for ligada a uma fonte de fem variável ε_1, ela vai gerar um fluxo magnético variável. Vamos admitir que ε_1 forneça uma diferença de potencial que valha, em média, V_1, num intervalo de tempo Δt. Se nesse intervalo de tempo Δt o fluxo variar de zero a Φ_1, pela lei de Faraday,

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$, pode-se dizer que:

$$\boxed{\Delta\Phi_1 = V_1 \cdot \Delta t}$$

Se todas as N_1 espiras da bobina 1 forem atravessadas perpendicularmente pelas linhas de campo, a definição de fluxo (reveja o exemplo 2) nos permite concluir que:

$$\boxed{\Delta\Phi_1 = N_1 \cdot B \cdot A}$$

Portanto, igualando essas duas expressões, temos:

$$\boxed{V_1 \cdot \Delta t = N_1 \cdot B \cdot A}$$

O que nos permite escrever:

$$\boxed{\frac{V_1}{N_1} = \frac{B \cdot A}{\Delta t}}$$

Podemos repetir esse mesmo raciocínio para a bobina 2 de N_2 espiras. Observe que o intervalo de tempo Δt em que o fluxo varia numa bobina é igual ao da outra, que as espiras podem ser construídas de maneira a ter a mesma área A e que o valor do campo magnético B que as atravessa também pode ser praticamente o mesmo, devido à ação do núcleo. Dessa forma, sendo V_2 a diferença de potencial média induzida nessa bobina, vamos obter:

$$\boxed{\frac{V_2}{N_2} = \frac{B \cdot A}{\Delta t}}$$

Portanto, como B, A e Δt são constantes, obtemos:

$$\boxed{\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}}$$

Costuma-se chamar a bobina 1 de **enrolamento primário** ou simplesmente **primário**; a bobina 2 é chamada de **secundário**. Pode-se concluir então que a diferença de potencial ou voltagem no primário e no secundário pode variar, dependendo do número de espiras de cada enrolamento. Pode-se, facilmente, "transformar" uma voltagem V_1 numa voltagem V_2 – basta, para isso, construir bobinas ou enrolamentos com o número adequado de espiras. Por isso o dispositivo se chama transformador. Veja o exemplo a seguir.

Passo a passo

3. Um transformador tem 20 espiras no primário e 300 espiras no secundário.

a) se o primário for ligado a uma tensão alternada de 5,0 V, qual será a tensão induzida no secundário?

b) se o secundário for ligado a uma tensão alternada de 45 V, qual será a tensão induzida no primário?

Solução

Em ambos os casos, basta aplicar a relação $\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \Rightarrow V_1 \cdot N_2 = V_2 \cdot N_1$

a) $V_1 = 5{,}0$ V, $N_1 = 20$ espiras e $N_2 = 300$ espiras. Portanto, para determinar V_2 basta aplicar a relação:

$V_1 \cdot N_2 = V_2 \cdot N_1 \Rightarrow 5{,}0 \cdot 300 = V_2 \cdot 20$

$\mathbf{V_2 = 75\ V}$

b) $V_2 = 45$ V, $N_1 = 20$ espiras e $N_2 = 300$ espiras. Portanto, para determinar V_1 basta aplicar a relação:

$V_1 \cdot N_2 = V_2 \cdot N_1 \Rightarrow V_1 \cdot 300 = 45 \cdot 20$

$\mathbf{V_1 = 3\ V}$

Observe que no primeiro caso houve um aumento de tensão e no segundo, uma diminuição. Os transformadores são usados tanto para aumentar como para diminuir a tensão. É indiferente saber qual é o primário e o secundário: o que importa é relacionar corretamente o número de espiras de uma das bobinas com a tensão nela aplicada.

Os transformadores e a conservação da energia

Às vezes as pessoas têm a impressão de que o transformador é um dispositivo milagroso, porque pode aumentar a tensão do primário para valores muito maiores no secundário. Também pode diminuir, mas isso não impressiona muito...

Na realidade, não existe milagre nenhum. Como nós já vimos na Aula 41, a potência P fornecida a um dispositivo elétrico é dada pelo produto da tensão a que é submetido pela corrente elétrica que passa por ele, ou seja, $P = V \cdot i$. Portanto, se a energia se conserva, a corrente elétrica deve diminuir quando a tensão aumenta. É isso o que ocorre num transformador.

Vamos supor que a potência P_1 fornecida ao primário se conserve no secundário. Isso quer dizer que a potência P_2 do secundário é igual a P_1. Essa é uma hipótese razoável, porque os transformadores têm rendimento muito alto, próximo de 100%. Então, lembrando que $P_1 = V_1 \cdot i_1$ e $P_2 = V_2 \cdot i_2$, temos:

$$\boxed{V_1 \cdot i_1 = V_2 \cdot i_2} \qquad \text{(I)}$$

Mas, como vimos:

$$\boxed{\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \Rightarrow V_1 \cdot N_2 = V_2 \cdot N_1} \qquad \text{(II)}$$

Dividindo as igualdades (I) por (II), temos:

$$\boxed{\frac{i_1}{N_2} = \frac{i_2}{N_1}}$$

É importante notar que os denominadores aqui estão invertidos em relação à expressão das tensões. Isso implica que, sempre que houver um aumento na tensão, haverá, em correspondência, uma diminuição da corrente. Veja o exemplo a seguir.

Passo a passo

4. Um transformador tem uma bobina de 100 espiras no primário e de 3.000 espiras no secundário. Aplicando-se ao primário uma tensão de 12 V, ele é percorrido por uma corrente elétrica de 900 mA. Qual o valor da tensão e da corrente elétrica no secundário?

Solução:

Para determinar a tensão no secundário, aplicamos a relação $V_1 \cdot N_2 = V_2 \cdot N_1$, onde $V_1 = 12$ V, $N_1 = 100$ espiras e $N_2 = 3000$ espiras. Temos, portanto:

$12 \cdot 3000 = V_2 \cdot 100$

$\mathbf{V_2 = 360\ V}$

Para determinar a corrente no secundário, aplicamos a expressão:

$$\frac{i_1}{N_2} = \frac{i_2}{N_1} \Rightarrow i_1 \cdot N_1 = i_2 \cdot N_2$$

Onde i_1 = 900 mA, N_1 = 100 espiras e N_2 = 3000 espiras. Temos, portanto:

$900 \cdot 100 = i_2 \cdot 3000$
$\mathbf{i_2 = 30\ mA}$

Observe que, embora a tensão tenha se tornado 30 vezes **maior**, a corrente elétrica, em compensação, tornou-se 30 vezes **menor**.

O fenômeno da indução eletromagnética completa o nosso estudo do eletromagnetismo. A geração de uma corrente elétrica a partir de um fluxo magnético variável, por meio de bobinas, possibilitou a construção de enormes geradores de fem alternada e, conseqüentemente, de corrente alternada. Isso se tornou viável devido à possibilidade de aproveitamento da energia mecânica de rotação.

No Brasil, essa energia quase sempre tem origem na energia das quedas d'água, nas usinas hidrelétricas.

Ocorre que essas usinas às vezes se localizam a centenas de quilômetros das cidades ou dos centros consumidores. Por isso, a energia elétrica deve ser transportada por fios, em extensas linhas de transmissão. Aqui aparece mais uma aplicação da indução eletromagnética: os transformadores. Eles permitem adequar os valores da voltagem e da corrente elétrica, de maneira a possibilitar seu transporte com maior eficiência.

As linhas de transmissão têm alta voltagem para ser percorridas por correntes de baixa intensidade. Isso reduz as perdas por calor (lembre-se de que a potência dissipada num condutor é proporcional ao quadrado da corrente, $P = R \cdot i^2$). Outros transformadores, colocados ao longo da linha, permitem o fornecimento da tensão adequada a cada consumidor.

Quando um morador de uma cidade como São Luís, onde a voltagem fornecida é 220 V, se muda, por exemplo, para São Paulo, onde a voltagem é 127 V, o uso de transformadores domésticos resolve eventuais problemas.

A corrente alternada, no entanto, também apresenta inconvenientes. Isso acontece, principalmente, em relação ao uso de aparelhos eletrônicos. Esses aparelhos exigem, quase sempre, um fornecimento contínuo de energia elétrica, ou seja, precisam de uma corrente contínua. Por isso, quando não se usam pilhas, é necessário o uso de retificadores de corrente que, como o próprio nome indica, transformam a corrente alternada em corrente contínua.

As pilhas sempre fornecem corrente contínua. Como a corrente contínua não pode gerar fluxo magnético variável, é inútil o uso de transformadores com pilhas. É por isso que, na nossa história, Roberto dizia nunca ter visto alguém usar uma pilha ligada a um transformador. Quando um aparelho a pilha precisa de uma tensão maior que 1,5 V, a única solução é utilizar associações de pilhas em série. Mesmo assim, as voltagem obtidas serão sempre múltiplos de 1,5 V.

Mas o eletromagnetismo não termina aqui. Ele tem aplicações e conseqüências extraordinariamente importantes. Se um campo magnético variável gera uma corrente elétrica, gera também um campo elétrico. Isso porque, como vimos na Aula 40, só existe corrente elétrica se existir campo elétrico.

Esse fenômeno levou o físico escocês James C. Maxwell, em 1864, a postular o fenômeno oposto – um campo elétrico variável deveria gerar um campo magnético variável. Maxwell percebeu claramente que, se isso fosse verdade, esses fenômenos se encadeariam numa seqüência interminável. Um campo magnético variando gera um campo elétrico que, como não existia e passou a existir, também varia. Se esse campo elétrico varia, gera um campo magnético que, como não existia e passou a existir, também varia. Se esse campo magnético varia, gera um campo elétrico que, como não existia... Essa sucessão de campos variáveis foi chamada de **onda eletromagnética**. Mas essa já é uma outra história, que fica para uma outra aula...

Nesta aula você aprendeu:

- o conceito de indução eletromagnética;
- o conceito de fluxo magnético e a lei de Faraday;
- a lei de Lenz;
- como funciona um gerador de corrente alternada;
- como funcionam os transformadores.

Exercício1

Na figura 10, uma espira retangular de área 500 cm^2, igual a 0,05 m^2, está imersa num campo magnético uniforme de intensidade B = 0,08 T. Qual o fluxo magnético que atravessa a espira:

a) na posição a, quando $\theta = 90^\circ$.

b) na posição b, quando $\theta = 45^\circ$.

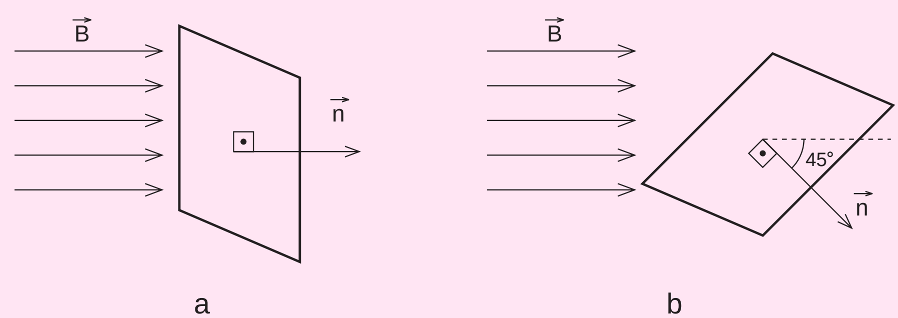


Figura 10

Exercício 2

Suponha que uma bobina formada por 800 espiras circulares de 25 cm^2 de área esteja diante de um eletroímã. Suponha que o campo magnético gerado por esse eletroímã tenha intensidade B = 0,5 T e seja uniforme na região onde está a bobina. Sabendo-se que o plano da bobina é perpendicular às linhas desse campo, determine:

a) qual o fluxo magnético que passa por essa bobina.

b) o que acontece na bobina se o eletroímã for desligado.

Exercício 3

Um transformador tem 25 espiras no primário e 1.500 espiras no secundário. Pede-se:

a) se o primário for ligado a uma tensão alternada de 10 V, qual será a tensão induzida no secundário?

b) se o secundário for ligado a uma tensão alternada de 110 V, qual será a tensão induzida no primário?

Exercício 4

No problema anterior, se a potência do transformador for igual a 22 W, qual a corrente elétrica no primário e no secundário, supondo que não haja perdas?

Exercício 5

Um transformador tem uma bobina de 300 espiras no primário e de 12.000 espiras no secundário. Tem uma potência de 440 W. Aplica-se ao primário uma tensão de 220 V. Pede-se:

a) a corrente elétrica no primário;

b) supondo que não haja perdas, qual o valor da tensão e da corrente elétrica no secundário?

AULA

47

O mundo do átomo

PARA COMEÇAR

Era hora do lanche e Maristela foi comer sua maçã. Pegou uma faquinha e cortou a maçã ao meio. Depois cortou-a ao meio outra vez, e mais outra. De repente, passou-lhe pela cabeça a idéia de continuar a cortar os pedaços da maçã sempre ao meio... e pensou:

- Se eu pudesse continuar cortando esse pedaço de maçã ao meio, chegaria a um pedaço que não poderia mais ser dividido?

Maristela não foi a primeira a ter essa dúvida. Os gregos pensaram muito nesse assunto e foi mais ou menos assim que tudo começou. Há uns 2.500 anos, alguns filósofos passaram a discutir essa questão. Naquela época, porém, não existiam instrumentos como os que existem hoje para investigar a natureza. Por isso, os gregos ficavam apenas imaginando como ela deveria ser...

Fique ligado

1/2 maçã... 1/4 de maçã... 1/8 de maçã... 1/16 de maçã ...maçã?

Um daqueles gregos, chamado **Demócrito**, acreditava que não era possível dividir infinitamente um objeto. Ele achava que qualquer objeto poderia ser dividido muitas vezes e que, após muitas divisões, chegar-se-ia a um pedaço **indivisível**.

Podemos pensar num objeto divisível como um objeto formado por outras **partes**. Em grego, **parte** é **tomo**, e **a** é o prefixo que indica **ausência de**, portanto, Demócrito chamou de **átomo** (a-tomo) aquele pedaço de matéria que não teria partes, isto é, que não poderia mais ser dividido. A idéia de **átomo** era tão forte para Demócrito que ele afirmou: “Nada existe, além dos átomos e do vazio”.

Em nossa vida, porém, não temos evidências diretas da natureza atômica da matéria. Ao contrário, a matéria nos parece contínua. Por exemplo: quando você coloca água num copo, ou quando examina um pedaço de ferro, não percebe a existência de átomos, que são pequenos demais para serem observados a olho nu. Por isso, durante muitos séculos, a idéia de átomo não foi aceita pela maioria das pessoas.

Há uns duzentos anos, cientistas e filósofos perceberam que havia substâncias, os elementos químicos, que se combinavam para formar outras substâncias, os compostos químicos, e que isso poderia ser compreendido mais facilmente se **cada** elemento fosse formado por **um tipo** de átomo, todos iguais entre si. Assim, **elementos** diferentes seriam formados por **átomos** diferentes.

Os compostos são formados por **moléculas**, que podem conter átomos de vários elementos químicos diferentes. Por exemplo: uma molécula de água é formada por dois átomos do elemento hidrogênio (H) e um átomo do elemento oxigênio (O). Essa idéia de átomo foi usada para explicar a existência dos elementos químicos, dos compostos químicos e a ocorrência de reações químicas. Os principais elementos químicos conhecidos são mostrados na tabela abaixo. Cada um é representado por um símbolo de uma ou duas letras: He = Hélio; N = Nitrogênio etc. O número que aparece junto a cada símbolo caracteriza o elemento químico e é chamado de número atômico, representado pela letra Z. O ferro (Fe), por exemplo tem Z = 26.

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57, 58 ≀ 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89, 90 ≀ 103															

Figura 1. Tabela periódica dos elementos (simplificada)

Mesmo assim, no século passado muitos cientistas ainda relutavam em aceitar a existência dos átomos: só neste século é que a idéia foi plenamente aceita. Um fato que contribuiu para dar credibilidade à idéia do átomo foi a descoberta do **elétron**, uma primeira partícula subatômica, isto é, menor do que o átomo, que tem carga elétrica negativa e está presente em todos os átomos.

O elétron foi descoberto na Inglaterra em 1897, por **Joseph J. Thomson**. Thomson estudou a passagem de corrente elétrica por um gás no interior de um tubo de vidro, que continha também duas peças metálicas, uma positiva (anodo) e outra negativa (catodo). Entre essas duas peças havia uma grande diferença de potencial (tensão). Thompson sabia que a baixas tensões, o gás era isolante e não permitia a passagem de corrente elétrica. Mas, quando a tensão era aumentada, ocorria uma descarga elétrica e o gás se tornava condutor. Nesse momento, o gás emitia uma certa luminosidade, e surgia uma fluorescência verde no vidro em frente ao catodo. Thomson chamou este fenômeno de raios catódicos, pois eles vinham do catodo, e descobriu que esses raios eram formados por partículas com carga elétrica negativa, que vinham do gás e que eram repelidas pelo catodo (-) e atraídas para o anodo (+). Essas partículas foram chamadas de elétrons. Thomson verificou que isto ocorria com qualquer gás. Isso o fez concluir que os elétrons existem nos átomos de todos os gases.

Havia também uma outra importante evidência: alguns cientistas, como a polonesa **Marie Curie**, descobriram que certos materiais emitiam "alguma coisa" que não se sabia ao certo o que era. Um desses materiais, descoberto pela própria Marie Curie, foi chamado de rádio e, por isso, esse fenômeno foi chamado **radioatividade** e os elementos que formavam aqueles materiais foram chamados de **elementos radioativos**. A radiação foi chamada de **raios alfa**. Hoje, essas partículas são bem conhecidas; falaremos nelas mais adiante.

A observação de partículas emitidas pelos materiais radioativos e a descoberta dos elétrons levaram os cientistas a acreditar que o átomo era divisível e que deveria ter uma estrutura interna. Assim surgiram os primeiros **modelos atômicos**.

Os cientistas já sabiam que no átomo existiam cargas elétricas positivas e negativas. A questão era: **como essas cargas estão organizadas no interior do átomo**?

O primeiro a propor um modelo atômico foi o próprio Thomson. Ele imaginou que o átomo era formado por uma "massa" composta por cargas elétricas positivas, como a massa de um pudim, na qual estariam espalhados os elétrons, como as passas do pudim. Por isso esse modelo ficou conhecido como **pudim de passas** (Figura 2).

Mas os cientistas queriam saber mais sobre as propriedades da matéria e do átomo. Por isso, esse modelo continuou sendo estudado.

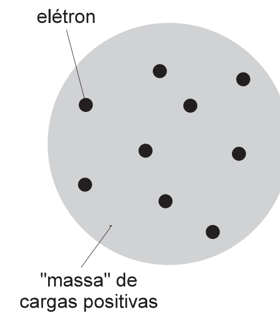


Figura 2. "Pudim de passas" - o modelo atômico de Thomson

Como num túnel escuro...

Imagine a seguinte situação: você está dentro de um túnel escuro. Você quer caminhar por ele e saber o que existe adiante, se é uma parede, um buraco... Mas está escuro e você não pode ver. O que você faria? Essa pode ser a sensação que temos quando estamos diante do desconhecido.

Você poderia sentar no chão e ficar lá, parado, sem tentar descobrir o que há adiante. Ou poderia querer saber o que está lá.

Então você pensa, pensa, e tem uma idéia: se atirasse algo naquela direção, poderia saber se há um buraco, ou uma poça de água, ou uma parede... Então você procura pelo chão algo que possa atirar: encontra algumas pedras e percebe que atirar as pedras adiante é uma maneira de conhecer o que existe. Já que não pode ver, você tenta descobrir as **propriedades** do que está lá adiante!

Como você já sabe, o átomo é muito pequeno e não pode ser visto. A situação dos cientistas na virada do século XX era parecida com a do túnel escuro. Para testar o modelo atômico existente, isto é, verificar as suas propriedades, **Ernest Rutherford**, um cientista que foi aluno de Thomson "atirava pedras na escuridão": em seu laboratório, ele fazia com que partículas **alfa,** emitidas por uma porção do elemento rádio, atingissem uma placa muito fina de ouro.

Rutherford imaginou que, se o modelo de Thomson estivesse correto, todas aquelas partículas atravessariam a folha de ouro. Isso porque, se o átomo fosse como um pudim de passas, nada poderia impedir a passagem de uma partícula alfa, que tem muita energia. Ele observou (Figura 3) que quase todas as partículas alfa atravessavam a placa; algumas eram levemente desviadas e outras (muito poucas, cerca de uma em cada dez mil) eram refletidas e voltavam!

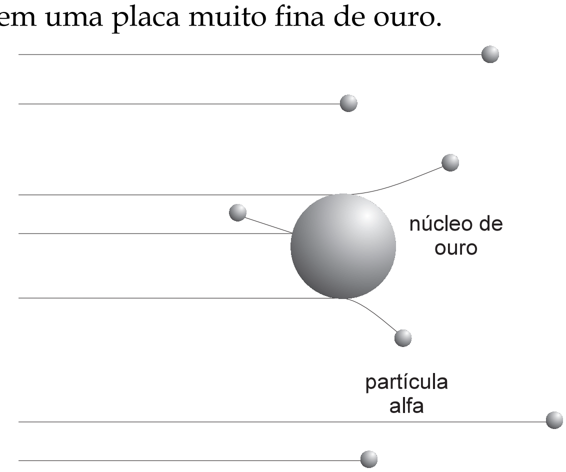


Figura 3. Resultado da experiência de Rutherford

Para explicar o fenômeno observado, Rutherford imaginou que no interior do átomo havia um "caroço duro", capaz de fazer a alfa voltar. Propôs então um novo modelo no qual o átomo tem um núcleo no centro, com carga elétrica positiva. Esse núcleo concentra quase toda a massa do átomo, mas ocupa uma região muito pequena dele. Ao redor do núcleo estão os elétrons, atraídos pela força elétrica do núcleo, como mostra a Figura 4. Esse modelo é semelhante ao Sistema Solar: nele, os planetas, atraídos pela força gravitacional do Sol, orbitam ao seu redor, ocupando pequenos volumes.

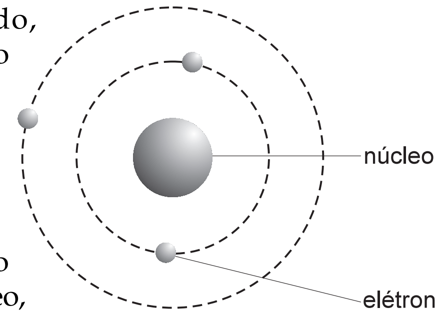


Figura 4. Esquema do átomo de lítio no modelo de Rutherford

Ao atingir a placa de ouro, as partículas alfa só são refletidas se colidem de frente com o núcleo de um átomo - o que ocorre raramente, já que o núcleo ocupa um volume muito pequeno no centro do átomo.

Para dar uma idéia dos tamanhos envolvidos, imagine um átomo de ouro ampliado até o tamanho de um campo de futebol (Figura 5), o que equivale a um aumento de um trilhão de vezes. Neste caso, o núcleo teria o tamanho de uma pequena moeda colocada no centro do campo; o resto seria um espaço vazio com algumas partículas espalhadas, os elétrons, que teriam um décimo do diâmetro de um fio de cabelo! Uma partícula alfa teria o tamanho de uma cabeça de alfinete e por isso poderia atravessar facilmente o campo, isto é, o átomo!

Portanto, o núcleo e os elétrons ocupam pouco espaço no átomo, que é quase todo vazio. Apesar de muito pequeno, o núcleo contém cerca de 99,9% da massa do átomo. Os **elétrons** são cerca de **duas mil vezes mais leves** que o **núcleo do átomo** mais leve, que é o átomo de hidrogênio.

A título de exemplo, colocamos na tabela abaixo os valores da massa do átomo de hidrogênio, do seu núcleo e de um elétron. Para dar uma idéia dos tamanhos, apresentamos a **ordem de grandeza** dos seus raios:

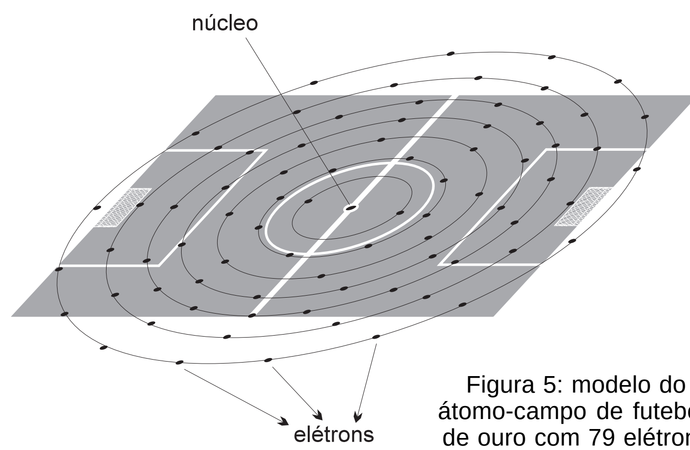


Figura 5: modelo do átomo-campo de futebol- de ouro com 79 elétrons

	MASSA (kg)	RAIO APROXIMADO (m)
átomo H	$1{,}6735 \cdot 10^{-27}$	10^{-10}
núcleo	$1{,}6726 \cdot 10^{-27}$	10^{-14}
elétron	$0{,}0009 \cdot 10^{-27}$	10^{-16}

Então, o **modelo de Rutherford** ficou assim:

O átomo é formado por um núcleo muito pequeno, no qual se concentra praticamente toda a sua massa. No núcleo existem *Z* cargas positivas. *Z* é *número atômico*. Ao seu redor encontram-se *Z* elétrons, que possuem carga elétrica negativa. Note que existe o mesmo número de cargas positivas e negativas, de modo que o átomo é eletricamente neutro.

Para evitar uma catástrofe

O **modelo de Rutherford** apresentava alguns problemas que levaram à elaboração de um **novo modelo para o átomo**. Vamos ver quais eram esses problemas.

Sabia-se que os átomos são **eletricamente neutros** - sua carga elétrica total é zero - e, em sua maioria, **estáveis** - isto é, não se modificam sozinhos. É por isso que estamos aqui, é por isso que estas palavras ainda estão impressas no seu livro, e que o livro está na sua frente! Isto quer dizer: se os átomos que compõem os materiais que formam esses objetos não fossem estáveis, tais objetos não durariam muito tempo.

Os cientistas já sabiam que o átomo era formado pelo núcleo, com cargas positivas, e pelos elétrons que giram ao seu redor. Sabiam também que cargas elétricas interagem pela ação da força elétrica. Então, surgiu uma dúvida: **como estariam os elétrons ao redor do núcleo**? Se estivessem **parados**, seriam atraídos pelo núcleo. Se isso acontecesse, os elétrons cairiam todos no núcleo e, dessa forma, o átomo sofreria um colapso, isto é, teria o tamanho do núcleo e deixaria de ser estável! Mas os cientistas sabiam que isso não era verdade.

Assim, os **elétrons** não podem estar parados: eles **giram ao redor do núcleo** com altas velocidades e, para manter seu movimento circular, têm grande aceleração centrípeta. O problema era que, segundo a teoria do eletromagnetismo, **uma carga acelerada emite radiação, perdendo energia**. Desse modo, os elétrons perderiam sua energia até parar e colidir com o núcleo... o que seria uma catástrofe! E isso demoraria apenas uma fração de segundo. Se isso acontecesse, nós não estaríamos aqui - aliás, não existiria sequer o universo como o conhecemos!

Para contornar todos esses problemas foram feitas algumas **mudanças** no **modelo de Rutherford**, de modo a adaptá-lo aos fatos observados!

Entra então em cena o jovem cientista dinamarquês, **Niels Bohr**, que tinha apenas 28 anos em 1913, quando formulou um novo modelo para o átomo. Segundo ele, os elétrons se movem em **órbitas circulares** em torno do núcleo sob influência da **força eletromagnética**, como proposto por Rutherford, mas:

- os elétrons podem se mover **apenas em certas órbitas**, que estão a certas distâncias do núcleo. Cada órbita corresponde a um **nível de energia** permitido;
- apesar de constantemente acelerados, os elétrons **não perdem energia enquanto permanecem numa mesma órbita**;
- quando o elétron **muda de órbita**, **ganha** ou **perde** uma certa **quantidade de energia**;
- a energia armazenada quando um elétron se encontra numa determinada órbita é chamada **energia potencial elétrica**.

Assim, no modelo de Bohr, a cada órbita está associado um valor de energia. Por isso, as regiões onde se encontram os elétrons correspondem a **níveis de energia**. A Figura 6 mostra um esquema de como deve ser a estrutura atômica, com o núcleo e os níveis de energia.

A energia potencial elétrica foi discutida na Aula 39. Ela é análoga à energia potencial gravitacional: ao erguer um objeto, estamos fornecendo energia potencial gravitacional; ao aproximá-lo, do chão sua energia potencial gravitacional diminui.

Da mesma forma, o elétron que está mais próximo do núcleo tem menos energia do que outro que está mais longe do núcleo. À medida que o elétron se afasta do núcleo, sua energia aumenta, isto é, $E_4 > E_3 > E_2 > E_1$.

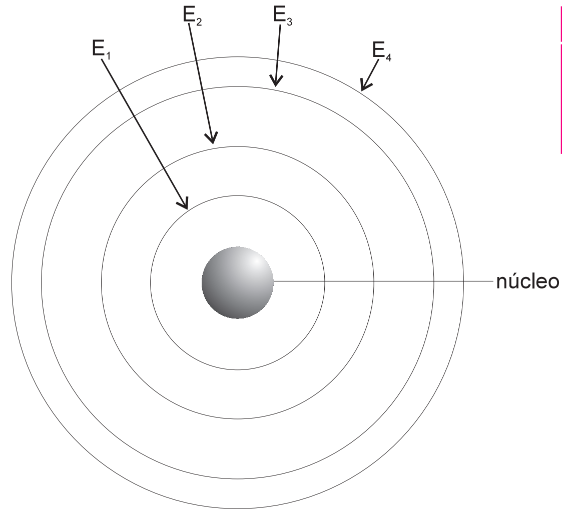


Figura 6. Níveis de energia atômicos

Assim, para que um elétron vá para um nível mais alto, mais energético, precisamos fornecer-lhe energia. Podemos fornecer energia ao átomo iluminando-o, para que ele absorva luz. A energia de que ele precisa é exatamente igual à diferença de energia entre os dois níveis, isto é, $E_2 - E_1$.

Já quando um elétron vai de um nível de energia maior para um de energia menor, ele libera uma quantidade de energia que é igual à diferença de energia entre os dois níveis ($E_2 - E_1$). Esta energia pode aparecer na forma de luz. Observe essas mudanças de nível na Figura 7.

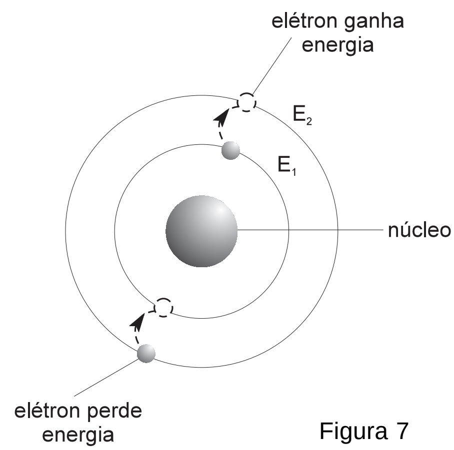


Figura 7

O novo modelo ficou conhecido como **modelo atômico de Rutherford-Bohr**.

O mais simples dos átomos

O átomo mais simples, e também o que existe em maior quantidade na natureza, é o **átomo de hidrogênio**. Ele forma a maior parte do nosso organismo: é só lembrar que o nosso corpo é formado por aproximadamente 70% de água, e que cada molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio. Também no universo, nas estrelas, o hidrogênio é de longe o elemento químico mais numeroso!

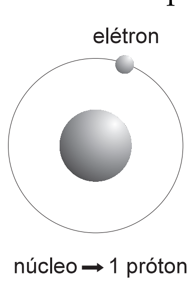


Figura 8
Esquema do átomo de hidrogênio

Sendo o átomo mais simples, seu núcleo é também o mais simples, e recebeu um nome especial: **próton**. Portanto, o **átomo de hidrogênio** é formado por **um próton e um elétron**, como mostra esquematicamente a Figura 8.

Existem mais de cem elementos químicos diferentes na natureza. Cada elemento químico é caracterizado por um número atômico, **Z**, que é o número de prótons que ele tem no núcleo, e é também o número de elétrons que giram ao redor do núcleo. Quanto maior for **Z**, mais pesado é o átomo. Observe a tabela periódica da Figura 1.

Na seção anterior, afirmamos que nem todos os átomos são estáveis, isto é, eles não permanecem como estão por muito tempo. Alguns dos elementos químicos mais pesados (que tem **Z** grande), como o urânio, o polônio e o rádio, se desintegram naturalmente. Isso significa que esses átomos perdem continuamente partes de si e se transformam em átomos de outros elementos químicos. As partes emitidas recebem o nome de **radiação**. Esses elementos são chamados de **elementos radioativos** e serão estudados na nossa próxima aula.

É importante dizer essas descobertas só foram possíveis graças aos grandes avanços tecnológicos deste século. Para fazer pesquisas em física atômica e nuclear são necessários equipamentos como bombas de alto vácuo, fontes de alta tensão, equipamentos eletrônicos e microeletrônicos, entre outros.

Na próxima aula vamos estudar o fenômeno da desintegração radioativa e nos aprofundar um pouco mais na matéria, tentando conhecer um pouco mais de seus mistérios...

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- toda matéria do universo é composta por átomos, que os gregos acreditavam serem indivisíveis; os átomos se unem para formar as moléculas;

- hoje sabemos que os átomos possuem uma estrutura: um **núcleo**, onde se concentra a maior parte da sua massa, e os **elétrons**, que são muito leves, giram ao redor do núcleo;

- no núcleo, que concentra a maior parte da massa do átomo, existem **Z** (Z é chamado de número atômico) partículas com carga elétrica positiva, chamadas **prótons**;

- em volta do núcleo existe uma região onde se encontram **Z elétrons** que não ocupam qualquer lugar ao redor do núcleo, mas se distribuem em camadas, também chamadas de **níveis de energia**;

- um **elétron muda de nível de energia** quando o átomo **absorve** ou **emite** uma certa quantidade de energia;

- o **átomo mais simples** e também **mais abundante** no universo é o **átomo de hidrogênio** (H), formado por um próton e um elétron;

- cada elemento químico é caracterizado por um número atômico **Z**.

Exercício 1

Complete:

Um filósofo grego chamado Demócrito propôs, há mais de 2.500 anos, a teoria de que a matéria não poderia ser indefinidamente **(a)** ...., pois sempre se chegaria a uma parte **(b)** .... que ele chamou de **(c)**....................... Há cerca de um século, Joseph J.Thomson e outros cientistas descobriram que os átomos não são **(d)** ...., mas formados por partículas menores. Uma partícula que está presente em todos os átomos é o **(e)** ...., que tem carga elétrica negativa. Thomson propôs um modelo de átomo no qual essas partículas estão dispersas numa massa de carga positiva, formando um átomo eletricamente neutro. Esse modelo ficou conhecido como **(f)** ....

Exercício 2

Complete:

O modelo de Thomson foi logo superado pelo modelo de **(a)** .... Segundo esse modelo, a carga elétrica positiva e a grande porção da massa do átomo estão concentradas numa pequena região no centro do átomo, chamada **(b)** .... Os elétrons se movem em torno do núcleo, como os planetas em torno do **(c)** ...., mas atraídos pela força elétrica em vez da força **(d)** ....

Exercício 3

Complete:

Bohr modificou o modelo de Rutherford para explicar a estabilidade dos átomos. Quando um átomo **(a)** .... energia, um de seus elétrons passa a se mover numa órbita de maior energia, mais **(b)** .... do núcleo. Esse elétron não fica muito tempo nessa órbita de energia mais alta; assim, o átomo **(c)** .... o excesso de energia, enquanto o elétron retorna à órbita de origem.

Exercício 4

Complete:

O núcleo atômico não é sempre estável, mas pode sofrer **(a)** ....: são os processos de emissão radioativa. Quando o núcleo emite partículas, seu **(b)** .... varia e ele se transforma no núcleo de outro elemento químico. É a radioatividade.

Exercício 5

Complete:

O átomo mais simples é o **(a)** ...., e seu núcleo é formado por um só **(b)** ...., em torno do qual orbita um único **(c)** ....

AULA

48

Mergulhando no núcleo do átomo

PARA COMEÇAR

Outro dia, Maristela chegou atrasada ao trabalho. Também, não é para menos: estudar de noite e trabalhar de dia não é nada fácil! Ela estava muito cansada e, para piorar as coisas, o despertador quebrou: simplesmente parou de funcionar, e ela continuou dormindo. Acontece!

Quando finalmente acordou, Maristela pegou o despertador e olhou bem para ele. Não sabia o que tinha acontecido e, além disso, não entendia nada sobre o seu funcionamento. Mas, muito curiosa, resolveu investigar...

– Vou tentar abrir este despertador. Quem sabe eu consigo arrumá-lo! Assim não preciso levá-lo para consertar, e ainda faço um pouco de economia!

Maristela ficou surpresa ao verificar que no despertador não havia nenhum parafuso!

– Se eu não abrir o despertador, como vou poder estudá-lo e tentar compreender o seu funcionamento? O que vou fazer?

Maristela ficou furiosa!

– Estou com vontade de atirar esta "coisa" na parede! Assim eu poderia ver o que tem lá dentro! Mas acho que ele nunca mais iria funcionar... – concluiu, desanimada.

Se atirasse o relógio contra a parede com muita força, para que ele se dividisse em muitos pedacinhos, Maristela iria pelo menos saber o que havia dentro dele. É claro que essa não é uma maneira muito esperta de estudar o funcionamento e os componentes de um relógio, mas pode ser uma excelente idéia para estudar a matéria! Você vai descobrir por quê.

Fique ligado

Mergulhando mais fundo na matéria

No início deste século, o modelo adotado para descrever o átomo era o de **Rutherford-Bohr,** que estudamos na aula passada. Muitos cientistas trabalhavam nesse campo, o da **física atômica**. Eles sabiam que alguns materiais emitem **radiação** e algumas formas diferentes de radiação já haviam sido observadas – inicialmente por **Wilhelm Röntgen** (raios X, que estudaremos mais adiante), em 1895, depois por **Henri Becquerel** e por **Marie Curie** (raios alfa), em 1896.

Uma dessas formas de radiação são as partículas **alfa**, de que falamos na aula passada. Você deve lembrar que as alfas foram usadas por Rutherford para investigar a estrutura do átomo. Mais tarde elas também foram usadas para investigar o próprio **núcleo atômico**. As alfas são partículas com carga positiva, e hoje nós sabemos que cada alfa é igual ao núcleo do átomo de **hélio** – um elemento químico que possui dois prótons no núcleo, isto é, Z=2. Portanto, uma partícula alfa é um átomo de hélio, mas sem os elétrons.

Quando investigamos o núcleo atômico, mergulhamos mais fundo na matéria e entramos no campo da **física nuclear**.

Juntamente com Rutherford, um cientista que contribuiu muito para a física nuclear foi **James Chadwick.** Em 1932, ele bombardeou o elemento **berílio** com partículas alfa e observou um tipo de radiação capaz de atravessar camadas muito grossas de matéria. Concluiu que essa radiação era formada por partículas diferentes das alfas, por duas razões: não tinham carga elétrica (eram neutras) e eram mais leves (tinham massa quase igual à do **próton**).

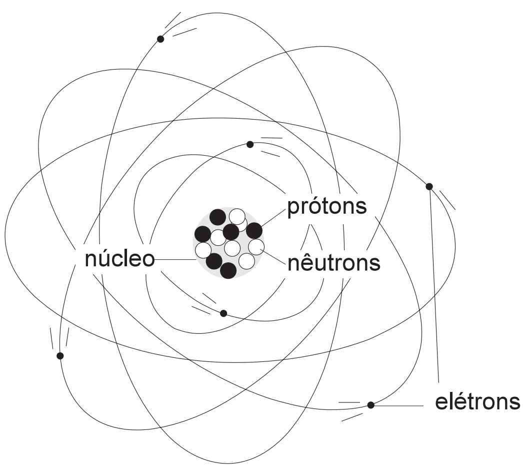


Figura 1. Esquema do átomo com prótons, nêutrons e elétrons

Por ser neutra, a nova partícula foi chamada de **nêutron**. Chadwick concluiu que os **nêutrons** vinham de dentro do **núcleo**, onde estavam junto com os **prótons**. Prótons e nêutrons compõe o **núcleo do átomo**, como mostra a Figura 1. É claro que nesta figura o núcleo aparece bem maior do que realmente é: para as órbitas que foram desenhadas, o núcleo seria invisível.

Como o núcleo se mantém unido?

Devido à força elétrica repulsiva, os prótons deveriam se afastar uns dos outros. Os nêutrons não possuem carga elétrica, logo não interagem por meio da força elétrica. Então, **como é que todas essas partículas se mantêm unidas, formando o núcleo**?

Se não é a força elétrica que as mantém juntas, você pode imaginar que talvez isso ocorra por causa da atração gravitacional. Vamos ver. Na Aula 37 você teve oportunidade de calcular a intensidade da força elétrica e da força gravitacional entre um próton e um elétron. Deve lembrar que a força gravitacional é muito menor que a força elétrica. Portanto, podemos concluir que também não é a força gravitacional o que mantém as partículas nucleares unidas!

Para explicar a existência do núcleo atômico foi necessário imaginar a existência de um novo tipo de força: a **força nuclear**. A idéia é que entre duas partículas nucleares existe uma **força muito intensa** – muito mais intensa que a força gravitacional e que a força elétrica – que é responsável pela união dos prótons e nêutrons no núcleo.

No quadro abaixo relacionamos as forças fundamentais que você já conhece, e indicamos também entre que tipos de partículas elas existem:

TIPO DE FORÇA	ENTRE...	INTENSIDADE	ATRATIVA OU REPULSIVA?
gravitacional	massas	muito fraca	sempre atrativa
elétrica	partículas com carga elétrica	fraca	atrativa ou repulsiva
nuclear	partículas nucleares	forte	sempre atrativa

Mas nem todos os núcleos permanecem unidos...

Na aula passada falamos na **radioatividade**. Esse fenômeno é conhecido desde o final do século passado e é caracterizado pela emissão de radiação. Naquela época, eram conhecidas três formas de radiação: os raios **alfa**, **beta** e **gama**. As alfa você já conhece. As betas são partículas bem mais leves do que as alfas, iguais aos elétrons que existem ao redor do núcleo. As betas, porém, são produzidas em reações que ocorrem no interior do núcleo atômico. A radiação gama é semelhante à luz.

Mais tarde descobriu-se que existem dois tipos de betas: as negativas, como os elétrons, e as positivas, chamadas também de **pósitrons**, que são semelhantes aos elétrons, sendo também produzidas em reações nucleares, mas possuem carga elétrica positiva.

Observe o quadro abaixo:

PARTÍCULA	SÍMBOLO	O QUE É?	CARGA ELÉTRICA
alfa	α	2 prótons + 2 nêutrons	positiva
beta^+	β^+	pósitron	positiva
beta^-	β^-	elétron	negativa

Você deve ter observado, pela tabela acima, que essas partículas **possuem carga elétrica**. Essa característica da radiação torna-a muito perigosa. Vamos entender por que estudando o processo de emissão de partículas.

Nem todos os elementos químicos são radioativos. O hidrogênio, o nitrogênio, o oxigênio – a maioria dos elementos – são estáveis e não emitem nenhum tipo de radiação. Mas alguns elementos são instáveis e emitem partículas.

Ao emitir radiação, o núcleo de um elemento químico radioativo perde partes de si. Veja o seguinte exemplo: no núcleo do elemento urânio existem 92 prótons, portanto $Z = 92$. O que ocorre quando ele emite uma partícula alfa, formada por dois prótons e dois nêutrons? Observe o esquema:

$$\mathbf{U\ (Z=92) - \alpha\ (Z=2)} \rightarrow \text{outro elemento com } \mathbf{Z = 90}$$

Você já sabe que cada elemento químico é caracterizado pelo seu número atômico, **Z**. Ao emitir a alfa, o núcleo de urânio perde dois prótons e dois nêutrons, transformando-se em outro elemento químico, que tem $Z = 90$ e se chamado tório.

E o que acontece com a alfa que foi emitida? Ela caminha solta pelo espaço até encontar matéria, onde é absorvida. O problema é quando essa alfa encontra, por exemplo, o nosso corpo...

Os perigos da radiação

As partículas saem do núcleo radioativo com bastante energia cinética. Ao penetrar na matéria, elas transferem energia aos átomos e moléculas que encontram, até perder toda a sua energia e parar.

Se essa matéria for o corpo humano podem ocorrer lesões, leves ou mais graves, dependendo da energia das partículas. Essas lesões podem ocorrer na pele ou em órgãos internos do corpo: com grande energia, a radiação é capaz de destruir as moléculas que compõem esses órgãos.

O principal problema da radiação formada por partículas carregadas é o fato de que elas podem arrancar elétrons dos átomos que constituem o meio por onde passam. Quando o átomo perde elétrons, deixa de ser neutro: ele se transforma num **íon**. Esse fenômeno é conhecido como **ionização**.

Apesar de todos os efeitos negativos da radiação, ela tem também aspectos muito positivos. Usada controladamente, pode ajudar no combate de doenças. É o caso da radioterapia aplicada ao tratamento de câncer.

Nas usinas nucleares, esses elementos radioativos são de grande utilidade. O núcleo de certos elementos, como o urânio, sofre uma divisão, chamada de **fissão nuclear**. Nesse processo, o núcleo libera uma enorme quantidade de energia que, por vir do núcleo, se chama energia nuclear.

Essa energia pode ser transformada em outras formas de energia - térmica e elétrica – úteis ao homem. A energia nuclear produzida de forma controlada nas usinas nucleares também pode ser gerada sem controle por **bombas nucleares**, as armas mais destrutivas já inventadas pela humanidade.

A energia do Sol, que permite a vida na Terra, tem sua origem nas **reações nucleares** que ocorrem no interior do Sol: vários prótons se fundem para formar um núcleo de hélio e liberam grandes quantidades de energia nesse processo, que se chama de **fusão nuclear**.

Além da energia que vem do Sol, a Terra é bombardeada continuamente por partículas de alta energia vindas do espaço interestelar. São os **raios cósmicos**, formados principalmente por prótons. Os raios cósmicos penetram na atmosfera terrestre, onde colidem com átomos dos vários gases que compõem a atmosfera. Essa colisão provoca reações nucleares, a partir das quais são criadas várias partículas subnucleares.

Em 1947, o físico brasileiro César Lattes participou da descoberta de uma nova partícula na radiação cósmica, chamada de **píon**. Essa partícula é mais leve que o próton e o nêutron, porém mais pesada do que o elétron. Além do píon, outras partículas foram descobertas nos raios cósmicos, como os **múons**.

E o que mais?

Você deve ter notado o caminho seguido pela ciência: primeiro acreditava-se que o átomo era indivisível. Então descobriu-se que ele tem um núcleo e os elétrons. Depois descobriu-se que também o núcleo tem uma estrutura, sendo formado por prótons e nêutrons.

A pergunta mais natural agora seria: **serão os prótons e nêutrons indivisíveis**? Ou eles também têm uma estrutura? Existirão outras partículas ainda menores formando prótons e nêutrons? É esse conhecimento que os chamados **físicos de partículas** vêm perseguindo desde a segunda metade do século: eles buscam conhecer a estrutura das partículas subnucleares!

A situação deles é parecida com a de Maristela às voltas com o despertador: como fazer para saber o que há lá dentro, se não é possível “abrir e olhar”?

A idéia que os físicos tiveram foi “atirar as partículas contra a parede”! Rutherford fez algo semelhante para estudar o átomo, ao atirar partículas alfa sobre uma fina placa de ouro. Ocorre que, para “quebrar” as partículas nucleares, é preciso muita, muita energia: é preciso atirá-las com muita força contra um alvo!

As partículas dos raios cósmicos têm muita energia e foram utilizadas para descobrir novas partículas. Mas, à medida que o conhecimento foi avançando, tornou-se necessário atingir energias ainda maiores. Então, a partir de 1960, começaram a ser construídos os chamados **aceleradores de partículas**: equipamentos supersofisticados que foram construídos graças a grandes avanços tecnológicos, como os equipamentos eletrônicos e digitais, a obtenção de superfícies metálicas superlimpas e lisas, medidores de correntes e de voltagens de alta precisão, amplificadores, osciloscópios e outros, além dos já citados na aula anterior.

Esses equipamentos produzem campos elétricos intensos, que fornecem uma grande quantidade de energia cinética às partículas carregadas eletricamente; assim, elas são aceleradas a grandes velocidades. Essas partículas colidem com átomos e da colisão surgem novas partículas que são estudadas.

Tais estudos mostram que os prótons, os nêutrons e os píons têm uma estrutura: são formados por partículas ainda menores, chamadas de **partículas elementares**. As partículas elementares recebem esse nome porque se acredita que elas sejam os menores componentes da matéria. Portanto, não seriam formadas por outras partículas menores. Daí vem o nome elementar.

Quais são as partículas elementares que conhecemos hoje? Para não complicar muito a história, vamos conhecer apenas dois tipos.

Uma partícula elementar é o elétron. Até hoje acredita-se que o elétron é indivisível.

A outra partícula elementar tem um nome estranho: **quark**. Existem seis tipos de quarks, mas por ora só nos interessam aqueles que formam os prótons e os nêutrons. São dois tipos, que também têm nomes estranhos: **up** (que vem do inglês e significa “para cima”) e **down** (que significa “para baixo”). No próton existem dois quarks up e um quark down. No nêutron existem um quark up e dois quarks down, como mostra a figura abaixo:

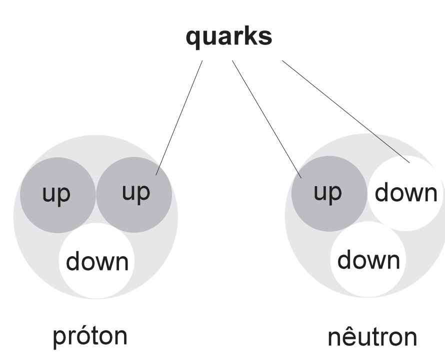


Figura 2. Esquema do próton e do nêutron com os quarks

Alguns homens continuam a investigar a natureza, tentando desvendar ainda mais os seus mistérios. À medida que aumenta o nosso conhecimento sobre a natureza, aprendemos novas formas de estudá-la: novas e mais sofisticadas técnicas experimentais. Utilizando esses métodos mais poderosos para estudar a natureza, podemos aprofundar ainda mais o nosso conhecimento. Muitas vezes descobrimos novos fenômenos que não eram observados antes; para explicar esses novos fenômenos, somos incentivados a criar novos modelos teóricos. Testando esses novos modelos, aprofundamos nosso conhecimento e nossa capacidade de investigar a natureza... e assim continua! O processo segue em frente. Até quando? Não sabemos, e não sabemos sequer se um dia ele irá terminar...

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- o núcleo do átomo é formado por dois tipos de partículas: os **prótons** e os **nêutrons**;
- existe uma força que mantém prótons e nêutrons, unidos formando o núcleo: a **força nuclear**. Ela é muito mais intensa que a força elétrica e que a força gravitacional;
- os átomos são eletricamente **neutros** (carga elétrica total é zero) e a maioria deles é **estável**;
- os átomos de alguns elementos químicos emitem partículas e se transformam em átomos de outros elementos químicos: esse fenômeno é conhecido como **radioatividade**;
- existem várias formas de radiação, entre elas as partículas alfa, beta e os raios gama;
- a radiação pode ser prejudicial à saúde, causando queimaduras e lesões, destruindo moléculas do nosso organismo, mas também pode ser usada no tratamento de doenças;
- quando os núcleos se dividem, liberam grandes quantidades de energia. Esse processo é chamado de **fissão nuclear** e a energia liberada por ele é a **energia nuclear**, que pode ser transformada em outras formas de energia úteis ao homem;
- a energia proveniente do Sol também é de origem nuclear: ela é gerada pelo processo de **fusão nuclear**;
- os **raios cósmicos** são formados por partículas de alta energia, vindas do espaço interestelar, que bombardeiam continuamente a Terra;
- prótons, nêutrons e píons são formados por outras partículas ainda menores: os **quarks**. Os **quarks** e os **elétrons** são **partículas elementares**, isto é, os cientistas acreditam que estes sejam os menores componentes do universo.

Exercício 1

Complete:

O núcleo atômico é formado por dois tipos de partículas: **(a)** ...., que têm carga elétrica de valor igual à do elétron, mas de sinal **(b)** ...., e **(c)** ...., que tem massa igual à anterior, mas são eletricamente **(d)** .... Entre essas partículas age a força **(e)** ...., muito mais intensa do que as outras forças fundamentais que conhecemos, que são a força **(f)** .... e a força **(g)** .... A força nuclear age em pequenas distâncias, dentro do núcleo, e não faz efeito em distâncias maiores.

Exercício 2

Complete:

Existem outras partículas que interagem por meio da força nuclear, como os píons. O físico brasileiro **(a)** .... participou da sua descoberta em 1947. A massa dos píons é cerca de um sétimo da massa dos prótons.

Exercício 3

Complete:

Existem núcleos radioativos que emitem partículas espontaneamente. É o caso do urânio, que tem 92 **(a)** .... no núcleo. Ao emitir uma partícula alfa, que possui dois **(b)** .... e dois **(c)** ...., o urânio se transforma em outro elemento químico, que tem apenas **(d)** .... prótons no núcleo e se chama tório.

Exercício 4

Complete:

Os raios cósmicos são partículas de alta **(a)** .... que incidem sobre a Terra vindas do espaço. Quando penetram na atmosfera, provocam reações nucleares em que são produzidas outras partículas, como os **(b)** ....

Exercício 5

Complete:

Hoje sabemos que os prótons e nêutrons, são compostos por "partículas elementares”, isto é, que não podem mais ser subdivididas. Essas partículas se chamam **(a)** .... Os prótons e nêutrons são formados por **(b)** .... quarks cada.

Exercício 6

Complete:

As grandes energias devidas à força nuclear aparecem no processo de **(a)** .... nuclear. Ele ocorre quando um núcleo pesado, como o do urânio, se divide em vários núcleos mais leves, e no processo de **(b)** .... nuclear que ocorre no interior de estrelas, como o Sol, quando vários núcleos leves se unem para formar núcleos mais pesados.

Em Brasília, 19 horas...

Assim que saiu do trabalho, Roberto passou no hospital para fazer uma **radiografia** do pulmão e foi para casa. Ao entrar, acendeu a **luz**. Era uma linda noite de Lua cheia, mas muito fria, e por isso ele ligou o **aquecedor elétrico**. Foi até a cozinha e, no forno de **microondas**, esquentou uma xícara de água para preparar um chá. Então, voltou para a sala, ligou o **rádio** e sentou-se para tomar o chá e ouvir um pouco de música. De repente, ouviu uma voz que dizia:

Em Brasília, dezenove horas...

Esta parece uma situação bastante familiar, não é mesmo? Você deve ter notado que algumas palavras do texto foram **destacadas**...

Você saberia dizer por quê? O que será que elas têm de especial? Isto é o que você vai descobrir nesta aula!

Nas aulas passadas discutimos a **estrutura da matéria**. Você aprendeu que a matéria é feita de átomos. Aprendeu, também, que o átomo é composto por um núcleo central que contém prótons e nêutrons, no qual se concentra praticamente toda a sua massa, e por uma região ao redor na qual se encontram os elétrons.

Você aprendeu também que os elétrons ocupam certas regiões que correspondem aos **níveis de energia**, aos quais está associado um valor de **energia E**. Outra coisa muito importante que você estudou é que, quando um elétron muda de nível, o átomo emite ou absorve uma certa **quantidade de energia**, que é igual à diferença de energia entre os dois níveis.

Você deve estar se perguntando: "Mas qual a relação disso tudo com a luz, as radiografias, as microondas, o aquecedor, o rádio?"

Na Aula 35 falamos sobre o **efeito fotoelétrico**: quando uma certa quantidade de **luz incide sobre uma placa de metal**, surge uma **corrente elétrica**. Experimentalmente verificou-se que a corrente elétrica não depende da intensidade da luz, mas depende da **cor de luz** que incide sobre a placa.

Havia, então, duas questões a esclarecer. A primeira é o **aparecimento** da corrente elétrica. A segunda é o fato de que **só com alguns tipos de luz essa corrente aparece**. Quem explicou o efeito fotoelétrico foi Albert Einstein.

A primeira conclusão de Einstein foi: **a luz fornece energia para os elétrons** contidos na placa de metal. Esses elétrons ficam na placa de metal devido à presença de um campo elétrico. Se o elétron recebe energia suficiente, pode se liberar deste campo, e então ocorre o efeito fotoelétrico, isto é, observa-se a presença de uma **corrente elétrica** na placa de metal. Assim está explicada a primeira questão.

A outra questão a explicar é mais complicada: por que só alguns tipos de luz (cores) provocam o aparecimento da corrente elétrica? Para explicar esse fenômeno, Einstein imaginou que a luz é formada por pequenos "**pacotes de energia"** aos quais deu o nome de **fótons**. Esses "pacotes" podem ser interpretados como partículas e podem carregar diferentes quantidades de energia, dependendo da cor da luz.

Vamos retomar o raciocínio de Einstein:

- a luz é formada por **fótons**;
- fótons são "pacotes" ou partículas, que carregam quantidades de energia de acordo com o tipo de luz;
- o fóton deve ter uma quantidade de energia suficiente para arrancar o elétron da placa de metal. Por isso, o efeito fotoelétrico só ocorre quando um certo tipo de luz incide sobre a placa.

Assim Einstein foi capaz de responder à segunda questão e explicar o efeito fotoelétrico.

Essa teoria permitiu também explicar os processos de emissão e de absorção de luz. Na Aula 47 você estudou o modelo de Rutherford-Bohr para o átomo. Viu que neste modelo os elétrons do átomo se distribuem em níveis, e cada um desses níveis está associado a um valor de energia. A Figura 1 mostra o esquema do átomo do átomo de sódio (Na), que tem 11 elétrons. Lembre-se de que quanto mais afastado do núcleo estiver o elétron, maior será sua energia, portanto: $E_3 > E_2 > E_1$.

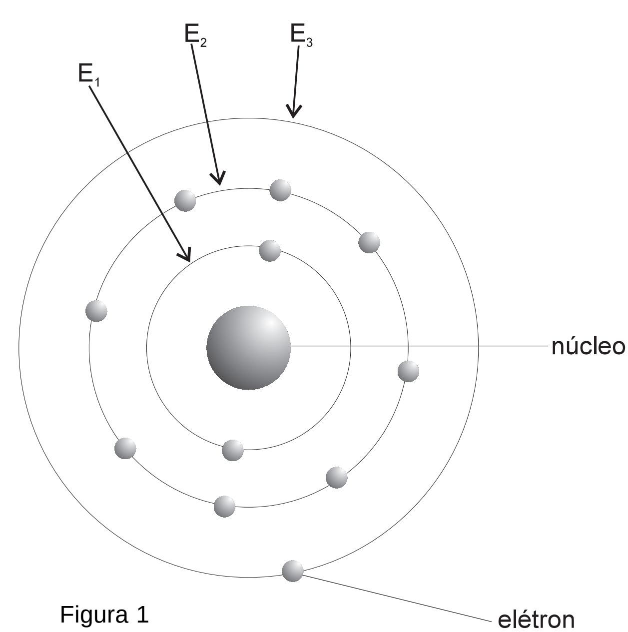


Figura 1

Na Figura 2a, um fóton é absrovido por um átomo de Na. Note que o fóton transfere energia a um elétron do átomo, que muda de nível. Mas, após um certo tempo, o elétron volta para o nível de energia mais baixa e emite um fóton, como mostra a Figura 2b. Dependendo da energia do fóton emitido, podemos observá-lo, isto é, pode ser um fóton que compõe a luz visível.

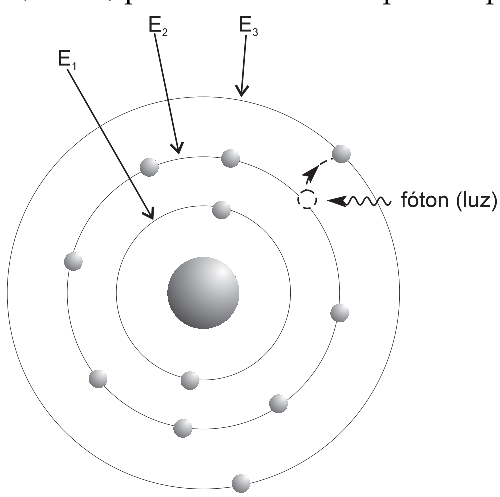


Figura 2a. Absorção de luz

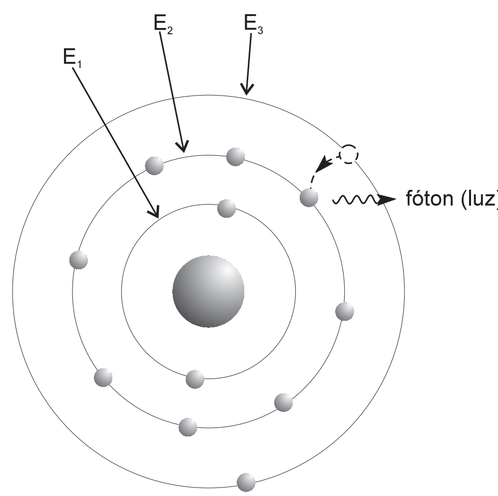


Figura 2b. Emissão de luz

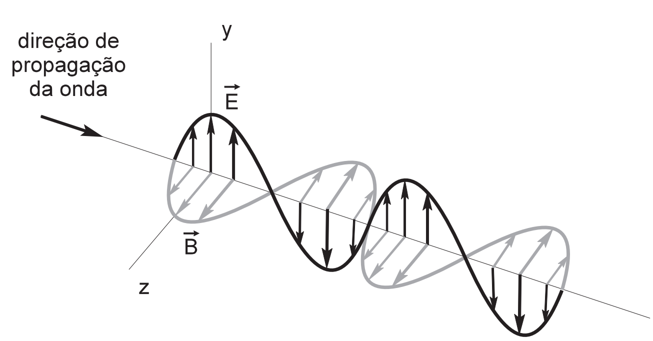
Dessa forma, Einstein propôs que a **luz**, quando interage com a matéria, se comporta como uma partícula, o **fóton**. Os fótons podem ser interpretados como partículas que não possuem massa; às vezes, sendo chamados de "partículas de luz".

É importante notar que é muito difícil dizer **o que a natureza é realmente**: o que os cientistas fazem é imaginar modelos que representem melhor a natureza, isto é, criam modelos para tentar explicar os fenômenos observados.

Luz é onda ou partícula?

Na Aula 35 nós discutimos a **natureza da luz**. Você viu que **Maxwell** chegou à conclusão de que **a luz é um tipo de onda** chamada **onda eletromagnética**. No final da Aula 46 nós falamos sobre as ondas eletromagnéticas. Dissemos que uma onda eletromagnética é formada por **campos elétricos e magnéticos** que se propagam pelo espaço: quando um campo elétrico varia, ele cria um campo magnético. Mas esse campo magnético é variável e, desse modo, dá origem a um campo elétrico variável que cria um campo magnético, e assim por diante. Essa sucessão de campos elétricos e magnéticos são as **ondas eletromagnéticas**. Note que esses campos são perpendiculares à direção de propagação da onda. Por isso, dizemos que ela é um tipo de onda **transversal**.

Figura 3. Representação de uma onda eletromagnética



As ondas eletromagnéticas têm semelhanças com as ondas mecânicas – que estudamos nas Aulas 29 e 30. Isso porque elas também se propagam pelo espaço e são caracterizadas por um comprimento de onda e uma freqüência. Mas existem algumas diferenças. Por exemplo: as ondas mecânicas precisam de um meio material para se propagar, enquanto que as eletromagnéticas não necessitam desse meio – elas se propagam também na ausência de matéria, isto é, no vácuo!

Neste curso nós vamos discutir apenas alguns aspectos das ondas eletromagnéticas e ver como elas estão presentes na nossa vida!

Até agora, vimos que:

As ondas eletromagnéticas, como a luz, tem um comportamento duplo: elas se propagam como ondas, mas quando interagem com a matéria comportam-se como partículas, os fótons. O importante é que quando falamos em fótons ou em ondas eletromagnéticas, estamos nos referindo à mesma coisa.

Para tentar entender melhor esse comportamento duplo da luz, imagine a superfície de um lago. No meio do lago formam-se algumas ondas, por causa do vento. Essas ondas se propagam até a margem do lago. Esse grupo de ondas que se propaga tem as características de ondas (freqüência, comprimento de onda), mas tem também características de partícula, pois se desloca como um todo. Devemos imaginar a luz de forma semelhante: um grupo de ondas que se desloca pelo espaço em altíssima velocidade.

Você se lembra das palavras destacadas no início da aula?

- **radiografia**
- **microondas**
- **rádio**
- **luz**
- **aquecedor elétrico**

Pois é, elas têm tudo a ver com as ondas eletromagnéticas. Foram dadas como exemplos para você ter uma idéia da sua importância e de como elas estão presentes no nosso dia-a-dia! Para irmos em frente, vamos primeiro estudar...

Como são produzidas as ondas eletromagnéticas

Vamos recordar algumas grandezas que caracterizam as ondas: a **freqüência** (f), o **período** (T) e o **comprimento de onda** (λ).

Quando estudamos as ondas mecânicas, vimos que a freqüência (f) da onda está relacionada à freqüência de vibração da fonte que produz a onda – por exemplo, no caso da corda de um violão ou do diafragma de um alto-falante. Quanto mais rápida for a vibração, maior será freqüência da onda produzida.

O período (T) é o inverso da freqüência (f), portanto:

$$\boxed{T = \frac{1}{f}}$$

Uma outra grandeza que caracteriza as ondas é o seu **comprimento de onda** (λ), que é a distância percorrida pela onda num tempo equivalente a um período. As ondas eletromagnéticas se propagam à velocidade da luz, **c**. Para elas, podemos escrever (usando a definição de velocidade):

$$v = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo}} \Rightarrow c = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow c = \lambda \cdot f$$

As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por um valor de freqüência e de comprimento de onda, que estão relacionados à velocidade pela equação que acabamos de ver.

Como se produzem as ondas eletromagnéticas? O fenômeno fundamental é o seguinte: **quando uma carga elétrica é acelerada ou freada, ela produz ondas eletromagnéticas**. Esse é o ponto de partida da nossa discussão. Portanto, quando uma carga elétrica executa um movimento oscilatório, isto é, de vaivém, ela produz ondas eletromagnéticas.

As **ondas de rádio**, por exemplo, são produzidas numa antena. A antena possui uma peça de metal e um circuito elétrico onde é produzida uma corrente elétrica, que são elétrons em movimento ordenado. Esses elétrons se movem de um lado para o outro, milhões de vezes por segundo, produzindo ondas eletromagnéticas com freqüência igual à freqüência do seu movimento.

A **luz visível** é uma onda eletromagnética com freqüência muito maior do que a freqüência das ondas de rádio; portanto, tem um comprimento de onda muito menor. Ela é produzida quando um elétron muda de nível dentro do átomo.

Quando um elétron de um átomo vai de um nível de maior energia para um nível de menor energia, ele emite um fóton. Quando chegam aos nossos olho, esses fótons podem ser percebidos pela nossa visão: dentro do olho existem células capazes de absorvê-los. Os átomos que compõem essas células absorvem os fótons e transmitem um sinal elétrico ao cérebro.

Veja que não é qualquer fóton que pode ser absorvido pelas células da retina: só aqueles que têm freqüência e energia numa determinada faixa de valores. Os fótons – as ondas eletromagnéticas – que estão nessa faixa são chamados de **luz visível**.

Outra energia, outro tipo de onda...

Dissemos acima que cada onda eletromagnética, isto é, cada fóton, está associada a um valor de **freqüência**, **comprimento de onda** e **energia**. A energia e a freqüência são diretamente proporcionais:

$$\boxed{E = h \cdot f}$$

isto é, a energia do fóton é proporcional à sua freqüência; a constante de proporcionalidade, **h**, é a mesma para todos os fótons, não importando a sua freqüência, e seu valor é $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$

Como as freqüências vão até os valores bem grandes, foram definidos múltiplos do hertz (Hz). Os mais utilizados são o quilohertz (KHz), que equivale a 1.000 hertz, e o megahertz (MHz), que equivale a 1.000.000 hertz.

Cada valor de freqüência e de comprimento de onda corresponde a um valor de energia do fóton. Por isso, dizemos que as ondas eletromagnéticas formam um espectro, o chamado **espectro eletromagnético**, como mostra a Figura 4.

Entre as ondas eletromagnéticas de menor comprimento, estão as **ondas de rádio**, que podem ser emitidas e captadas por antenas cujo tamanho pode ser da ordem de um metro até dezenas de metros, e são utilizadas em sistemas de comunicação. Um pouco mais acima, isto é, com um comprimento de onda menor, estão as **ondas de TV**, cujo comprimento de onda é da ordem de 1 metro.

Um pouco mais acima estão as **microondas** que são produzidas por aparelhos eletrônicos, como o forno de microondas doméstico. As microondas produzidas nesse forno são facilmente absorvidas pelas moléculas de água contidas nos alimentos, o que provoca seu aquecimento.

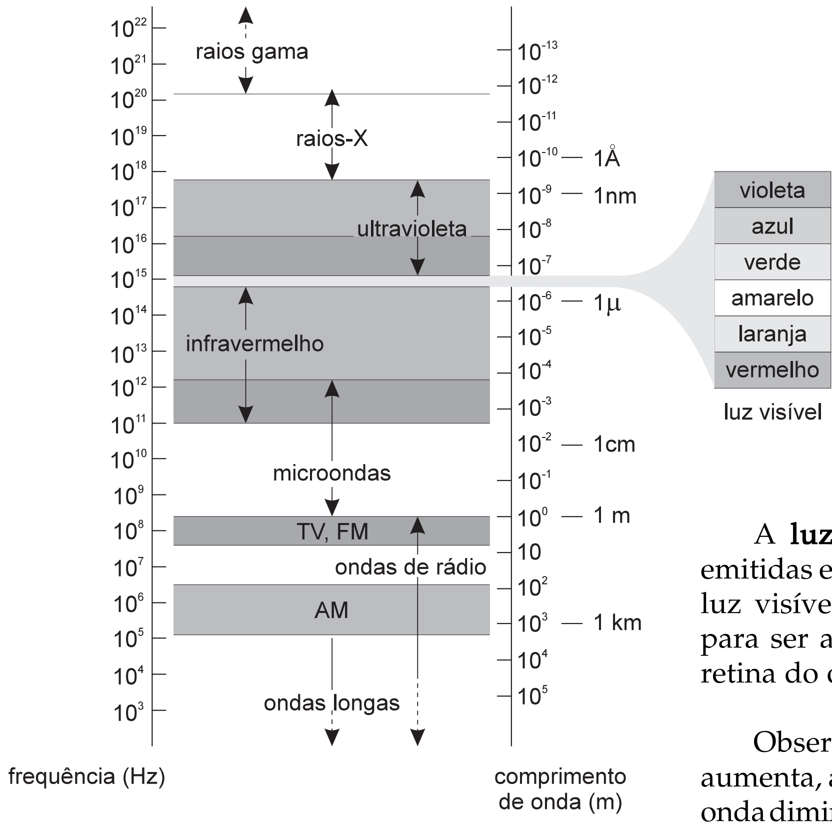


Figura 4. Espectro eletromagnético

Seguindo no espectro eletromagnético, encontramos a **luz infravermelha**, que é produzida por corpos aquecidos e por moléculas. São facilmente absorvidas pela maioria dos materiais, inclusive a nossa pele. Quando absorvidas, transferem energia aos átomos da superfície do corpo, provocando o aumento de sua temperatura.

A **luz visível** e freqüências próximas são emitidas e absorvidas por átomos e moléculas. A luz visível tem o comprimento de onda exato para ser absorvida pelas células que formam a retina do olho.

Observe que, à medida que a freqüência aumenta, a energia aumenta e o comprimento de onda diminui. É por isso que os **raios ultravioleta,** que vêm do Sol, fazem mal à saúde: por ter um comprimento de onda pequeno, eles podem penetrar no organismo e, como têm grande energia, podem destruir algumas de suas células. Por isso não é aconselhável a exposição ao sol sem utilização de um filtro solar que bloqueie pelo menos uma parte dos raios ultravioleta.

Os **raios X** são produzidos quando cargas elétricas sofrem grandes acelerações ou quando um elétron sofre uma mudança de nível e a energia emitida é muito grande.

Por ter um comprimento de onda muito pequeno, os raios X podem atravessar as partes moles do corpo humano – pele, músculos, regiões com gordura – e atingir uma chapa fotográfica. Assim são feitas as radiografias, como as do pulmão, braços, pés etc. Essa radiação não faz bem à saúde. Mas, como as radiografias só são feitas em caso de necessidade médica, trazem benefícios, o que compensa os seus efeitos ruins.

Os **raios gama** são semelhantes aos raios X, mas muito mais energéticos. São produzidos em processos que ocorrem dentro do núcleo de alguns átomos.

O arco-íris

Como você pode observar na Figura 4, a luz visível ocupa uma pequena região do espectro eletromagnético: sua freqüência varia entre $4 \cdot 10^{14}$ e $8 \cdot 10^{15}$ Hz, aproximadamente. Essa faixa é subdividida em faixas menores, que correspondem às cores do arco-íris. Em ordem crescente de freqüência, temos:

vermelho	laranja	amarelo	verde	azul	violeta

Ondas-partículas...

Você aprendeu que o fóton é, ao mesmo tempo, onda e partícula. Assim como o fóton, o elétron, que originalmente era considerado uma partícula, também tem características de onda. Interpretando o elétron como uma onda fica mais fácil compreender por que só certos níveis de energia são permitidos no átomo: é semelhante a uma corda de violão, que só vibra em certas freqüências.

Devemos então modificar o modelo de Rutherford-Bohr: em lugar de órbitas bem-definidas, os elétrons são representados por ondas em torno do núcleo. Da mesma forma interpretamos todas as outras partículas: prótons, nêutrons, píons, quarks etc.

Agora você sabe mais sobre a luz! Na próxima aula vamos estudar um outro tópico de física moderna, que também teve contribuição de Einstein e que está relacionado a uma característica muito peculiar da luz: a **teoria da relatividade**.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- as **ondas eletromagnéticas** são campos elétricos e magnéticos que se propagam pelo espaço, sem a necessidade de um meio material;
- as ondas eletromagnéticas têm comportamento duplo: elas se propagam como ondas mas, ao interagir, comportam-se como partículas, chamadas **fótons**;
- as ondas eletromagnéticas são caracterizadas por um valor de **freqüência**, **comprimento de onda** e **energia;**
- a **luz visível** é um exemplo de **onda eletromagnética**, assim como as **ondas de rádio** e **TV**, as **microondas**, os **raios X** etc.;
- além dos fótons, todas as outras partículas possuem caráter duplo: são ondas e partículas ao mesmo tempo.

Mãos à obra

Exercício 1

Complete: "A luz é uma onda **(a)** ...., isto é, formada por campos elétricos e magnéticos que se propagam em alta velocidade. Mas a luz também é formada por partículas, chamadas **(b)** .... A luz é, ao mesmo tempo, onda e **(c)** ...."

Exercício 2

Complete: "Quando um átomo absorve luz, isto é, absorve um fóton, um de seus elétrons muda de órbita, para uma órbita de **(a)** .... energia. A diferença entre as energias da órbita do elétron antes e depois da absorção é igual à energia do **(b)** .... absorvido."

Exercício 3

Complete: "Existem outras ondas eletromagnéticas, que diferem da luz pelo **(a)** .... de onda, indicado pela letra grega **(b)** .... Em um extremo, ondas de **(c)** ...., que têm grandes **(d)** .... de onda. Em outro extremo, raios **(e)** ...., que têm pequeno **(f)** .... de onda. No meio, a luz visível. Comprimentos de onda pouco maiores do que a luz formam a região do **(g)** .... Comprimentos de onda pouco menores formam a região do **(h)** .... No arco-íris, as cores correspondem a diferentes comprimentos de onda, desde o violeta até o vermelho. Se o nosso olho fosse sensível ao ultravioleta, veríamos uma faixa dessa "cor" logo acima do **(i)** .... no arco-íris."

AULA

50

Tudo é relativo

PARA COMEÇAR

Maristela estava voltando para casa, de ônibus. Teve um dia cheio de atividades! No caminho, pensava: “Este ônibus está se movendo em relação à rua, assim como eu. Vejo passar árvores, edifícios... Mas este senhor cochilando está sempre ao meu lado... Isso quer dizer que em relação a ele, e ao ônibus, eu estou parada!

O raciocínio continuou: “Isso acontece porque os **movimentos** são sempre descritos a partir de um **referencial**. Então eu posso estar parada e me movendo ao mesmo tempo, dependendo do referencial que eu escolho!

A conclusão da Maristela é correta e significa que o **movimento** de um objeto é **relativo**!

Da mesma forma, quando dizemos que a farmácia fica à direita ou à esquerda da rua, não podemos esquecer de dizer em que sentido percorremos a rua!

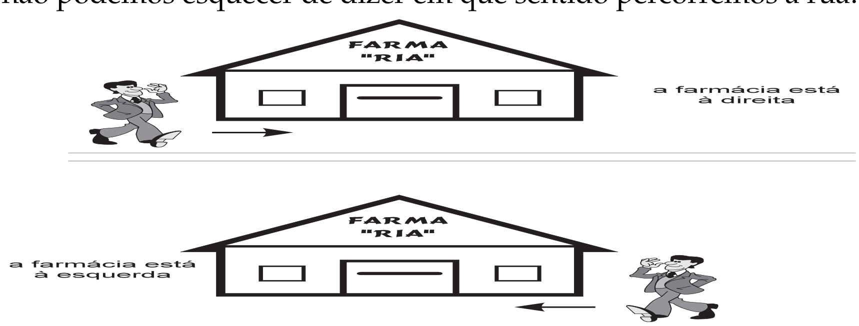


Figura 1. A farmácia está à esquerda ou à direita de acordo com o sentido em que a pessoa caminha.

Ou, ainda: quando alguém nos diz que pagou baratíssimo por uma camisa, esse “baratíssimo” pode ser caro para nós, porque vai depender do salário de cada um!

Esses são alguns exemplos de **relatividade** aos quais estamos acostumados no nosso dia-a-dia. Relatividade das posições, das velocidades, dos preços...

Nesta aula você vai aprofundar seus conhecimentos sobre relatividade. Vai estudar a **teoria da relatividade** proposta por **Albert Einstein** no início deste século. É importante saber que as previsões dessa teoria têm sido observadas em muitos experimentos, o que a torna um dos grandes sucessos da física nos últimos tempos.

A relatividade dos movimentos

Vamos voltar ao caso do ônibus: você está sentado num ônibus que passa por uma rua. Assim como o ônibus, você também está em movimento em relação à rua, mas está parado em relação ao motorista. Poderíamos dar outra interpretação à mesma situação, dizendo que você e o motorista estão parados e que são as árvores e as casas que se movem para trás! As duas interpretações são possíveis e ambas estão corretas.

Isso reforça a afirmação de que, ao estudarmos um movimento, precisamos sempre definir qual o referencial escolhido. E quais são as conseqüências da **relatividade dos movimentos**?

Fique ligado

Imagine que você está andando dentro do ônibus com uma velocidade (v_p) constante de 1 m/s em relação ao ônibus, que está parado no ponto. Portanto, você se move com 1 m/s em relação ao ônibus e **também** em relação ao ponto.

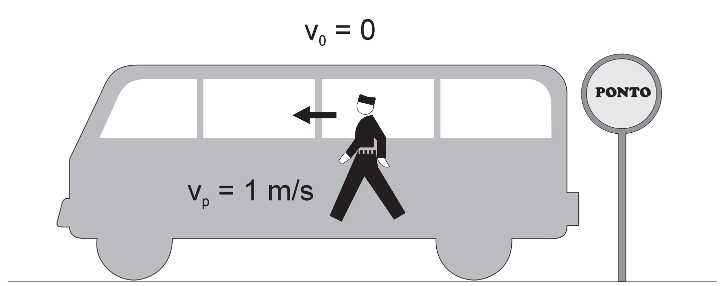


Figura 2. Ônibus parado e passageiro caminhando.

Agora imagine que o ônibus se afasta do ponto **em linha reta** e com velocidade constante (v_o) de 10 m/s. Você continua caminhando dentro do ônibus com a mesma velocidade de 1 m/s. A pergunta é: qual será a sua **velocidade em relação ao ponto**?

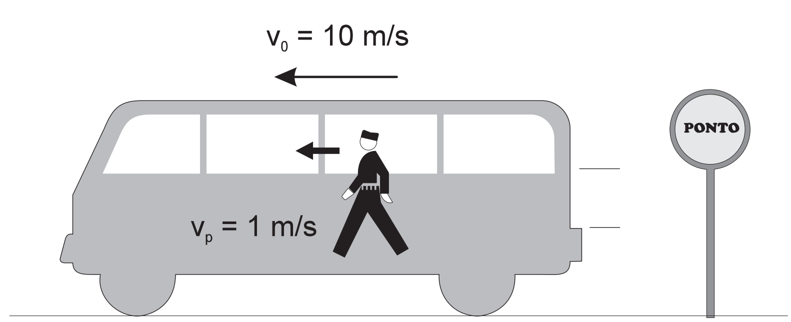


Figura 3. Passageiro e ônibus se movendo.

Lembre-se de que **a velocidade é uma grandeza vetorial**. Por isso a sua velocidade em relação ao ponto será dada pela **soma vetorial** das duas velocidades.

Se você caminhar no mesmo sentido do movimento do ônibus (como indica a Figura 3), sua velocidade em relação ao ponto será de 11 m/s e você vai se afastar mais rápido do ponto. Caso seu movimento tenha sentido contrário ao sentido do ônibus, sua velocidade em relação ao ponto será de apenas 9 m/s! Observe os esquemas mostrados nas Figuras 4a e 4b.

Figura 4a

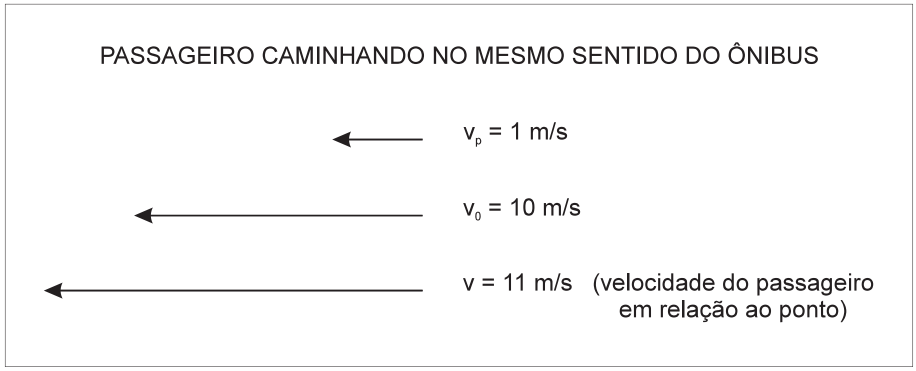
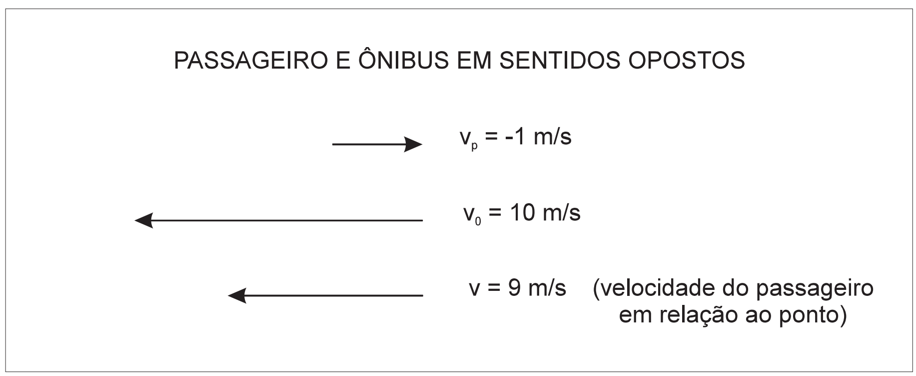
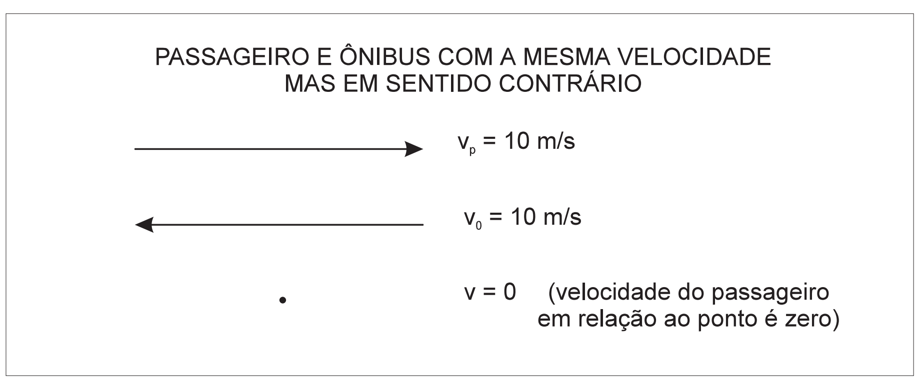


Figura 4b



Se você pudesse andar com a mesma velocidade do ônibus, mas em sentido contrário, você não sairia do lugar! (Figura 5)

Figura 5



Esta é a regra para somar velocidades em referenciais que se movem numa mesma direção.

Agora, imagine que todas as janelas do ônibus foram vedadas e que a estrada é **perfeitamente plana e lisa**, de modo que o ônibus anda em **movimento retilíneo uniforme** (MRU), sem nenhuma vibração. Nessas condições, você não é capaz de afirmar que o ônibus está em movimento. Isso acontece porque não aparece nenhuma força e não existe nenhuma experiência que indique que o ônibus está em movimento retilíneo uniforme: tudo se passa como se ele estivesse parado!

Se o ônibus acelerar, você sentirá uma pressão do seu banco sobre você. Isso acontece porque o banco irá exercer uma força sobre você para acelerá-lo também. Se o ônibus frear bruscamente, você será jogado para a frente e precisará se segurar para não cair. Se o ônibus fizer uma curva, você será jogado para o lado! Mas, se o ônibus permanecer em MRU, você não vai sentir nenhuma força e nem vai perceber que está em movimento!

Movimentos retilíneos uniformes a velocidades de 10 km/h, 30 km/h, 80 km/h etc. são todos equivalentes entre si: sem olhar para fora do ônibus (nem para o velocímetro), é impossível saber a velocidade do ônibus ou se ele está parado!

Já sabemos de que modo compor velocidades como as do passageiro e do ônibus. No início deste século, o jovem cientista Albert Einstein vivia atormentado com uma dúvida: será que para a luz vale o mesmo raciocínio?

O estranho comportamento da luz

À noite, quando entramos em casa e acendemos a luz, não precisamos esperar para enxergar, pois o ambiente fica imediatamente iluminado: a luz parece se propagar instantaneamente, isto é, com uma velocidade infinita! Mas, na realidade, a velocidade da luz tem um valor definido e **muito grande**! Atualmente a velocidade da luz é medida com muita precisão: seu valor no vácuo é c=299.792.458 m/s, ou seja, aproximadamente 300.000 km/s (trezentos mil quilômetros por segundo)!

Nas Aulas 35 e 49 você estudou a natureza da luz. Viu que a luz tem natureza dupla: ela se comporta ora como partícula, ora como onda. Ondas mecânicas (como o som) precisam de um meio material (como o ar) para se propagar. No século passado, muitos cientistas acreditavam que a luz era uma onda que se propagava num meio material ao qual deram o nome de **éter**. O éter seria invisível, sem peso, e estaria presente em todo o espaço.

Surgiu então uma questão: o que acontece quando uma fonte de luz (por exemplo, uma lâmpada) está em movimento em relação ao éter? A velocidade da luz é alterada? Em outras palavras: a regra de composição de velocidades, que discutimos no caso do ônibus, continua válida no caso da luz?

No seu movimento em torno do Sol, a Terra tem velocidade de 30 km/s. Um feixe de luz que se aproxima a 300.000 km/s, vindo de frente, deve ter uma velocidade de 300.030 km/s em relação à Terra, como indica a figura abaixo:

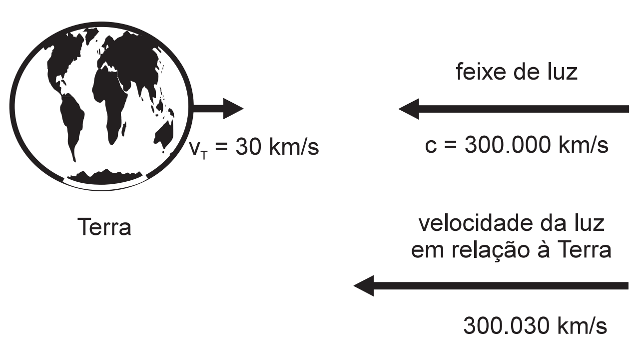


Figura 6. Terra e feixe de luz em sentidos contrários.

Se esse feixe se aproxima vindo de trás da Terra, ou seja, no mesmo sentido do seu movimento, deve ter uma velocidade em relação à Terra de “apenas” 299.970 km/s!

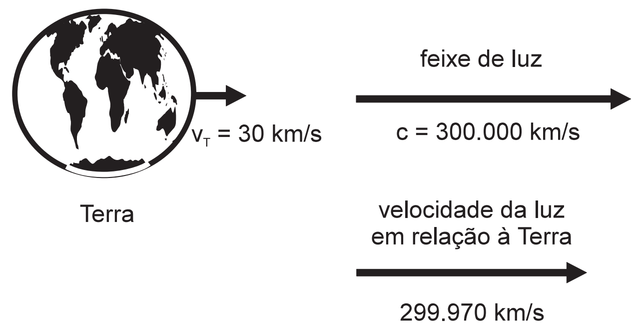


Figura 7. Terra e feixe de luz no mesmo sentido.

Entretanto, as experiências mostram que **nos dois casos a velocidade da luz é a mesma**, como se a Terra não estivesse em movimento. Portanto, a teoria do éter não consegue explicar os resultados das experiências sobre a velocidade da luz. Assim, Einstein abandonou a idéia do éter e admitiu que:

A luz se propaga sem necessidade de um meio material e sempre com a mesma velocidade, independente do referencial.

Esse fato tem conseqüências profundas sobre as nossas idéias de espaço e de tempo. Vejamos quais são elas.

O tempo é relativo!

Desde a época de Isaac Newton, no século XVII, acreditava-se que o tempo era absoluto e fluía uniformemente. Mas, se o tempo fosse absoluto, a regra de composição de velocidades deveria valer sempre, inclusive no caso da luz. O fato de a velocidade da luz num meio ser sempre a mesma, independente do referencial, implica que o tempo não pode ser absoluto.

Esta é talvez a conseqüência mais surpreendente: o **tempo não é absoluto**, isto é, não é o mesmo em todos os referencias. Isso significa que o ritmo de um relógio não é o mesmo se ele estiver parado ou em movimento!

Vamos ver um experimento que comprova esse fato e, em seguida, vamos demostrar, com a ajuda da matemática, que o tempo passa de forma diferente quando medido em dois referenciais em movimento, um em relação ao outro.

O **múon** é uma partícula produzida pelos raios cósmicos na atmosfera da Terra e que tem um tempo de vida muito curto. Um múon em repouso dura apenas cerca de 2 microssegundos depois de ter sido criado. Um microssegundo é um milhonésimo (1/1.000.000) de segundo.

Um múon produzido no alto da atmosfera, a 10 km de altitude, viajando a uma velocidade próxima à da luz (300.00 km/s), não poderia ser observado na superfície da Terra, pois precisa de aproximadamente 30 microssegundos para atingir a superfície (Figura 8). Entretanto, ele é observado!

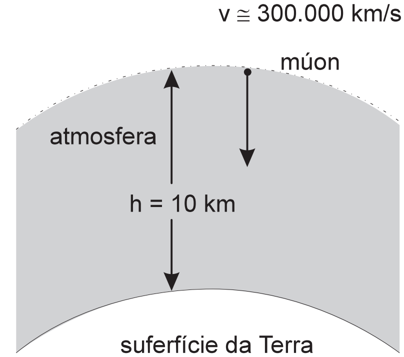


Figura 8

Como isso pode ser explicado? De acordo com a teoria da relatividade, **o tempo passa mais devagar para um objeto em movimento**. É o caso do múon: para essa partícula, que está com grande velocidade, passaram-se menos de 2 microssegundos. Mas, para nós, que estamos parados, esse tempo é da ordem de 30 microssegundos. Quer dizer, para o múon, o tempo passou mais lentamente.

Esse fenômeno é conhecido como **dilatação do tempo**. Entretanto, esse efeito só é percebido quando as velocidades são próximas à velocidade da luz, o que pode ocorrer no caso de algumas partículas subnucleares. No nosso dia-a-dia, as velocidades são no máximo da ordem de 10 km/s (por exemplo, a dos foguetes) e, nesses casos, os efeitos de dilatação do tempo não são percebidos.

Para entender melhor a dilatação do tempo, vamos imaginar a seguinte situação: você está num "foguete relativístico", um foguete capaz de andar com uma velocidade (v) muito grande, próxima à da luz. Você está dentro do foguete e acende uma lanterna que está no chão do foguete (ponto A da Figura 9). A luz vai até o teto, encontra um espelho (B), é refletida e volta, pelo mesmo caminho, ao ponto de partida (A). Vamos supor que a luz percorre uma distância 2h.

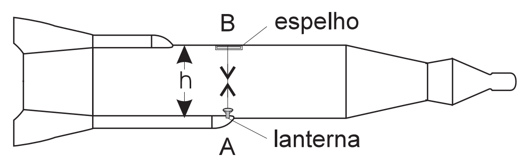


Figura 9. Caminho da luz visto de dentro do foguete.

A velocidade da luz é **c** e t_0 é o tempo medido para a luz ir e voltar. Assim, podemos escrever:

$$\boxed{c = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo}} \Rightarrow c = \frac{2h}{t_0} \Rightarrow h = \frac{c \cdot t_0}{2}} \quad (1)$$

Imagine que um colega está na base de lançamento observando o seu movimento. Para ele, a luz percorreu um caminho diferente, pois o foguete está se movendo. Observe a figura abaixo, que mostra o foguete em três posições diferentes:

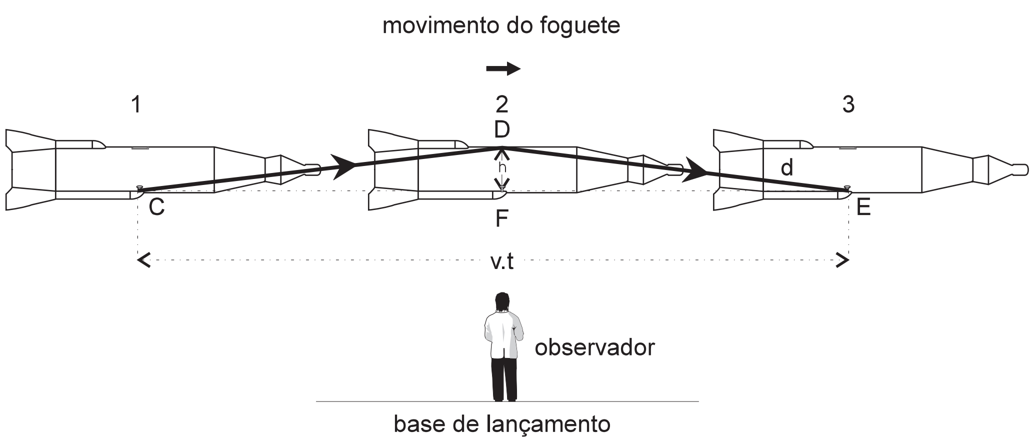


Figura 10. Caminho da luz visto da base.

Para o seu colega, a luz percorreu o caminho 2d, que pode se calculado utilizando-se o triângulo CDE da Figura 10. Observe que, enquanto a luz vai de C até E, passando por D, o foguete vai da posição 1 até a posição 3, percorrendo a distância dada por CE. O tempo que eles gastam para isso será chamado de t.

Como a velocidade do foguete é v, a distância percorrida por ele no tempo t é EC = $v \cdot t$. Para a luz, já que sua velocidade é constante, podemos escrever:

$$c = \frac{2d}{t} \Rightarrow d = \frac{c \cdot t}{2} \qquad (2)$$

Para mostrar que os tempos são diferentes quando medidos em referenciais diferentes, precisamos verificar qual a relação entre t e t_0. Para isso, vamos encontrar a relação entre h e d, que pode ser feito utilizando o teorema de Pitágoras no triângulo retângulo DEF, indicado na Figura 10, cujos lados são: h (DF), d (DE) e $v \cdot t/2$ (EF). Assim, teremos:

$$d^2 = h^2 + \frac{v^2 \cdot t^2}{4} \qquad (3)$$

Agora substituímos o h e d dados pelas equações (1) e (2) na equação (3), e chegamos a:

$$\frac{c^2 \cdot t^2}{4} = \frac{c^2 \cdot t_0^{\,2}}{4} + \frac{v^2 \cdot t^2}{4}$$

que é uma equação do segundo grau. Queremos escrever o t como função das outras grandezas. Para isso, seguiremos alguns passos: multiplicamos por 4 os dois lados da equação e passamos as outras grandezas para o outro lado.

$$c^2 \cdot t^2 = c^2 \cdot t_0^{\,2} + v^2 \cdot t^2 \Rightarrow (c^2 - v^2) \cdot t^2 = c^2 \cdot t_0^{\,2} \Rightarrow t^2 = \frac{t_0^{\,2}}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Assim, extraindo a raiz quadrada, chegaremos ao que queríamos: a relação entre os tempos medidos nos dois referenciais, no foguete (t_0) e na base de lançamento (t):

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (4)$$

O termo que está no denominador é **sempre menor do que um**, pois é raiz de 1 menos um termo positivo. Então, t é igual t_0 dividido por um número menor do que 1, portanto **t é sempre maior do que t_0**.

$$t > t_0$$

Isso mostra que, para o observador em movimento no foguete, **o tempo passa mais lentamente...**

Note também que o número no denominador não pode ser zero. Portanto, a velocidade do foguete (v) **não pode ser igual** à velocidade da luz (c). Além disso, o número do qual extraímos a raiz quadrada deve ser positivo, portanto:

$$1 - \frac{v^2}{c^2} > 0 \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} < 1 \Rightarrow v^2 < c^2 \Rightarrow v < c$$

Isso demonstra a afirmação de Einstein segundo a qual **nenhum objeto pode viajar a uma velocidade igual ou maior do que a velocidade da luz (c)**. A velocidade da luz é um limite de velocidade que nenhum objeto pode ultrapassar.

Veja este exemplo: imagine que o foguete viaja com 80% da velocidade da luz, **c**, isto é, v=0,8c. Substituindo o valor de v na equação (4), teremos $t = t_0/0,6 \cong 1,67\ t_0$, ou seja, enquanto para você passou 1 minuto, para o seu colega na base passou 1,67 · 1 minuto, que é aproximadamente 1 minuto e 40 segundos! Isso significa que o relógio do foguete andou mais devagar!

Observe que, se velocidade **v for muito menor do que c**, a razão v/c será muito pequena. Por exemplo: suponha um foguete, dos que existem hoje, andando à velocidade de 10 km/s. A razão v/c será 10/300.000 = 0.000033, muito pequena. Nesse caso, t e t_0 são praticamente iguais. Isso está de acordo com previsões da física de Newton: o ritmo dos relógios não varia quando as **velocidades são muito menores do que c**.

Isso mostra que a teoria da relatividade não contradiz a física clássica: as leis de Newton continuam válidas nos casos em que as velocidades são muito menores que a da luz, como ocorre no nosso dia-a-dia. A teoria da relatividade traz novos fenômenos observados apenas quando as **velocidades são próximas à da luz**.

O comprimento é relativo!

O comprimento de um objeto também depende do referencial! Quer dizer, para o seu colega, que está sentado na base, o foguete em movimento tem um comprimento menor do que quando está parado na base!

Imagine que o foguete tem um comprimento L_0 quando está parado na base. Quando estiver se movendo com uma velocidade v, o observador na base verá o foguete com um comprimento (L) dado por:

$$\boxed{L = L_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (5)$$

Não vamos aqui deduzir esta expressão matemática, vamos discutir o seu significado. Ela se parece com a equação (4) para os tempos: tem o mesmo fator

$$\boxed{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(que é sempre menor do que 1), mas agora ele está multiplicando L_0, portanto:

$$\boxed{L_0 > L}$$

Quer dizer: o comprimento do foguete quando está em repouso é maior do que quando ele está em movimento. Esse fenômeno é conhecido como **contração do espaço**.

Passo a passo

Voltando ao exemplo onde a velocidade do foguete era $v = 0{,}8c$. Substituindo o valor na equação (5) e fazendo os cálculos, teremos $L \cong 0{,}6\ L_0$, ou seja, o seu colega verá o foguete com quase metade do comprimento L_0 que o foguete tem quando está parado. Suponha que o foguete tenha 50 metros quando medido por você, que está dentro dele. Visto pelo seu colega que está na base, o foguete em movimento terá apenas 30 metros!

Note que só o comprimento do foguete varia, a sua altura não varia: só as dimensões na direção do movimento sofrem contração.

A massa é relativa!

Você já sabe que a massa de um corpo é a medida de sua inércia. De acordo com as leis de Newton, a massa de um corpo é sempre a mesma em qualquer referencial. Entretanto, Einstein mostrou que **a massa de um corpo depende da sua velocidade**. A equação que descreve o comportamento da massa (m) de um objeto em movimento com uma velocidade v, em função da sua massa medida quando ele está em repouso (m_0), é:

$$\boxed{m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}$$

Essa equação mostra que a massa de um objeto aumenta quando ele está em movimento.

$$\boxed{m > m_0}$$

Se a velocidade do foguete for $v = 0{,}8c$, sua massa será $m = m_0/0{,}6 \cong 1{,}67\ m_0$. Supondo que a massa do foguete seja 10 toneladas, passará a 16,7 toneladas!

$E = m \cdot a^2$, $E = m \cdot b^2$, $E = m \cdot c^2$...

$E = m \cdot c^2$. Obviamente não foi trocando as letras a, b e c que Einstein deduziu esta equação! Para chegar a ela, Einstein fez cálculos que fogem aos objetivos deste Telecurso: para nós, o importante é discutir o seu significado.

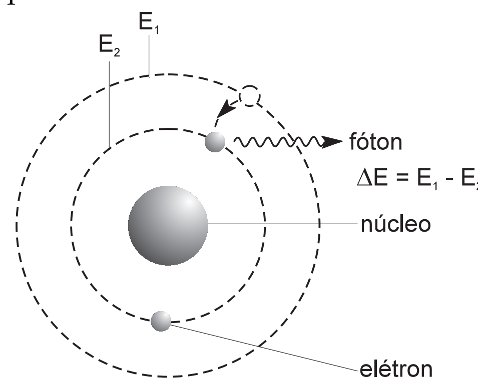
De acordo com a mecânica proposta por Newton, massa e energia são grandezas independentes. Einstein mostrou que massa e energia são equivalentes! Quando aumenta a energia (cinética e potencial) de um corpo, a sua massa também aumenta! A relação entre a energia total (E) de um corpo e a sua massa (m) é dada por:

$$\boxed{E = m \cdot c^2}$$

a famosa equação de Einstein, onde c é a velocidade da luz.

Um exemplo de aplicação dessa equação ocorre na transição que ocorre num átomo, quando um dos seus elétrons vai de um estado de energia E_1 para outro de energia E_2, sendo emitido um fóton com energia $\Delta E = E_1 - E_2$. Nesse caso, a sua massa também varia de uma quantidade $\Delta m = m_1 - m_2$, de tal modo que essas duas quantidades estão relacionadas por:

$$\boxed{\Delta E = \Delta m \cdot c^2}$$



Como a velocidade da luz (c) é muito grande e o seu quadrado (c^2) é maior ainda, a variação de energia (ΔE) é grande mesmo quando a variação de massa (Δm) for pequena.

As transições que ocorrem num átomo, quando um elétron muda de órbita, produzem pequenas variações de energia (emissão de fótons de luz) e a variação de massa é pequena demais para ser percebida. Entretanto, transições que ocorrem **dentro do núcleo atômico** liberam muito mais energia, e a variação de massa, embora pequena, pode ser medida. A aplicação mais famosa da equação $\mathbf{E = mc^2}$ são as bombas nucleares desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial. Elas conseguem grande quantidade de energia, que vem do núcleo atômico.

PARA TERMINAR

Nesta aula você aprendeu que:

- a **velocidade da luz** num meio tem sempre o **mesmo valor**, independendo do referencial;
- assim como as posições e as velocidades, o **tempo é relativo**;
- os intervalos de tempo medidos em referenciais que se movem são menores, isto é, o tempo flui **mais** lentamente. Esse fenômeno é chamado de **dilatação do tempo**;
- o comprimento de um objeto medido num referencial em movimento é menor do que o comprimento do objeto medido num referencial em repouso. Esse fenômeno é chamado de **contração do espaço**;
- a contração do espaço e a dilatação do tempo só são percebidas quando as velocidades são próximas à velocidade da luz;
- **massa e energia** são dois aspectos da mesma grandeza e se relacionam pela equação $\mathbf{E = mc^2}$.

Exercício 1

Complete:

Você está sentado assistindo a uma teleaula. Está em **(a)** .... em relação ao aparelho de TV, mas em relação ao Sol você está em **(b)** .... Isso mostra que os movimentos são **(c)** .... , e que todo movimento deve ser descrito a partir de um **(d)** ....

Exercício 2

Complete:

Quando a luz interage com a matéria, ela se comporta como uma **(a)** .... Entretanto, quando a luz se propaga, ela tem características de **(b)** .... A luz pode se propagar mesmo na **(c)** .... de matéria: isso a diferencia das ondas **(d)** .... A luz se propaga no vácuo com velocidade **(e)** .... de 300.000 km/s, independentemente do **(f)** ....

Exercício 3

Complete:

Uma das conseqüências do fato de a velocidade da luz ser constante é que o tempo deixou de ser **(a)** .... Isso quer dizer que o ritmo de um relógio depende do **(b)** .... Quanto mais rápido um objeto se desloca, mais **(c)** .... o tempo passa. Esse fenômeno é conhecido como **(d)** .... do tempo.

Exercício 4

Complete:

Uma outra conseqüência da teoria da relatividade é conhecida como **(a)** .... do espaço. Isso quer dizer que as dimensões de um objeto **(b)** .... quando ele está em movimento. Ainda de acordo com essa teoria, a massa dos objetos também é **(c)** .... , e existe uma equivalência entre massa e **(d)** .... que pode ser expressa matematicamente por **(e)** ....

Gabaritos das aulas 22 a 50

Aula 22 - Estou com febre?

1. Vamos supor que a bebida esteja inicialmente à temperatura ambiente. Dentro da geladeira a temperatura é menor; assim, quando a bebida é colocada no seu interior, sua temperatura diminuirá, mas é preciso aguardar um certo tempo para que ela fique à mesma temperatura do interior da geladeira. Em outras palavras, é preciso esperar que seja atingido o equilíbrio térmico.
2. A dilatação linear do trilho é descrita pela expressão: $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t$, onde o comprimento inicial da barra é $L_0 = 1$ m, o coeficiente de dilatação do ferro é $\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$ ºC^{-1}, e a variação da temperatura é Δt = (60ºC - 10ºC) = 50ºC. Assim podemos calcular o L: $\Delta L = 1{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 50 \Rightarrow \Delta L = 6{,}0 \cdot 10^{-4}$ m ou 0,6 mm.
   Se cada barra se dilata 0,6mm, a distância D entre duas barras deve ser, no mínimo, $2 \cdot 0{,}6$mm = 1,2mm.
3. Sabemos que a correspondência entre a temperatura nessas duas escalas é dada por $5(t_F - 32º)/9$. Para saber quando essas duas temperaturas são iguais, basta substituir $t_C = t_F$ na equação, assim:
   $5(t_C - 32º)/9 \Rightarrow 9\ t_C = 5(t_C - 32º) \Rightarrow 9\ t_C = 5t_C - 160º \Rightarrow 4t_C = -160º \Rightarrow t_C = -40ºC$.
   Portanto: $t_C = -40ºC$ e $t_F = -40ºF$.
4. Sabemos que densidade é a relação entre a massa de um objeto e o seu volume: d = m/V. Vamos considerar que, ao aquecer o objeto, sua massa não mude (por exemplo, que não ocorra evaporação). Sabemos que o seu volume aumenta, portanto sua densidade irá diminuir, pois V e d são grandezas inversamente proporcionais: quando uma aumenta, a outra diminui.
5. A temperatura normal do corpo humano na escala Celsius é $t_C = 36ºC$. Para saber esse valor na escala Fahrenheit, basta utilizar novamente a expressão que relaciona essas duas temperaturas, substituindo este valor: $t_C = 5(t_F - 32º)/9 \Rightarrow 36º = 5(t_F - 32º)/9 \Rightarrow 36º \cdot 9/5 = t_F - 32º \Rightarrow t_F = 64{,}8º + 32º \Rightarrow t_F = 96{,}8ºF$.
6. Quando Gaspar encheu o tanque, colocou um volume de gasolina igual ao volume do tanque (ambos estavam à temperatura ambiente). Com o forte calor a gasolina foi aquecida e se dilatou, de modo que seu volume superou o volume do tanque e ocorreu o vazamento. (Observação: o tanque também sofreu dilatação, mas o aumento do seu volume foi inferior ao aumento do volume da gasolina.)

Aula 23 - Água no feijão, que chegou mais um!

1. Uma pedra de gelo grande tem mais massa do que uma pedra de gelo pequena. Assim, podemos dizer que a capacidade térmica da pedra de gelo grande é maior que a da pedra de gelo pequena. Isso significa que é necessário mais calor para derreter a pedra de gelo grande do que para derreter a pedra de gelo pequena. Quando moemos o gelo, passamos a ter centenas de pequenas pedras de gelo que derretem mais rápido do que a pedra original.
2. Quando abrimos a geladeira vazia, ocorrem trocas de calor: sai ar frio e entra ar quente. Quando a geladeira está cheia de alimentos, já resfriados, as trocas de calor são minimizadas, pois os alimentos em geral têm uma capacidade térmica maior do que a do ar, por isso sua temperatura varia mais lentamente. Este fato revela que os alimentos ajudam a resfriar o ar quente que entra quando abrimos a geladeira.

3. Sabemos qual é o calor específico da água($1 cal/g \cdot °C$) e qual é a massa de 3 litros de água, pois sua densidade é de 1 kg/litro, e sabemos também qual foi a variação de temperatura sofrida por esta massa de água ($\Delta t = 90°C - 20°C$). Podemos então usar a seguinte equação: $\Delta Q = m \cdot c_{água} \cdot \Delta t$
Substituindo os valores na equação: $\Delta Q = 3.000\ g \cdot 1\ cal/g\ °C \cdot 70\ °C \Rightarrow \Delta Q = 210.000\ cal$
Se colocarmos o aditivo na água do radiador, teremos uma alteração na capacidade térmica do líquido, assim o calor absorvido pelo radiador será: $\Delta Q = m \cdot c_{mistura} \cdot \Delta t$
Substituindo os valores na equação: $\Delta Q = 3.000\ g \cdot 1{,}1\ cal/g\ °C \cdot 70\ °C \Rightarrow \Delta Q = 231.000\ cal$
isto significa que a mistura da água com o aditivo retira mais calor do motor do que a água pura, aumentando assim seu rendimento.
4. Pelo gráfico, vemos que a substância A recebeu 110 cal e sua temperatura variou de 50ºC, enquanto que a substância B, para sofrer a mesma variação de temperatura, recebeu apenas 55 cal. Conhecendo o calor específico de cada substância, poderemos identificá-la usando a tabela fornecida nessa aula. Para desccobrir o calor específico, usamos sua definição: $c = C/m = \Delta Q/\ (m \cdot \Delta t)$
$c_A = 110/\ (10 \cdot 50) \Rightarrow c_A = 0{,}22\ cal/g\ °C$
$c_B = 55/\ (10 \cdot 50) \Rightarrow c_B = 0{,}11\ cal/g\ °C$
Pela tabela podemos verificar que a substância A é o alumínio e a substância B é o ferro.
5. Sabemos que o calor específico do cobre é 0,093 cal/g ºC. Usando a definição de calor específico, podemos calcular a quantidade de calor (ΔQ) cedida ao bloco:
$c = C/m = \Delta Q/\ (m \cdot \Delta t)$
$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta t$
$\Delta Q = 100 \cdot 0{,}093 \cdot 50 = 465\ cal$
Como 1cal = 4,18 J, temos:
$\Delta Q = 465 \cdot 4{,}18\ J$
$\Delta Q = 1.943{,}7\ J$
6. Podemos usar a definição de capacidade térmica:
$C_{leite} = m \cdot c = 200.000 \cdot 0{,}97$
$C_{leite} = 194.000\ cal/°C$

Aula 24 - A brisa do mar está ótima!

1. À noite, a temperatura baixou bastante e ficou mais baixa que a temperatura do corpo de Cristiana. Nós já sabemos que o calor é a energia térmica que flui de um corpo para outro de temperatura mais baixa. Dessa forma, o calor flui para fora do corpo e temos a sensação de frio. Então colocamos um agasalho, que é um isolante térmico e dificulta a passagem do calor: assim, não perdemos calor e ficamos aquecidos. Portanto, não é correto afirmar que os agasalhos nos aquecem. O correto é dizer que eles **nos mantêm aquecidos**.
2. Esse é outro exemplo de condução de calor: o chão da cozinha é um bom condutor de calor. Por isso, quando encostamos o pé no chão, o calor flui facilmente (do pé para o chão), daí a sensação de frio. Já o tapete, como a maioria dos tecidos, é isolante. Assim, o pé não perde calor, e por isso a sensação de frio passa.
3. Exemplos de condutores: latas, panelas (metais em geral), azulejos, mármore. Exemplos de isolantes: lã (tecidos em geral), cobertores, madeira, cabo de panela, borracha.
4. Vimos que um bom exemplo de propagação de calor por convecção ocorre no interior das geladeiras: o ar quente tende a subir, por que é menos denso que o ar frio. Ao atingir a região do congelador ele é resfriado, fica mais denso e desce. Forma-se assim uma corrente de ar (corrente de convecção). Mas, para que o ar possa circular, é necessário que existam grades para permitir sua circulação. Se em lugar de grades existissem placas metálicas inteiras, não haveria convecção, só condução de calor. Isso reduziria a eficiência da geladeira, aumentando o consumo de energia elétrica.

Aula 25 - Ernesto entra numa fria!

1. Como a água já está a 100ºC, usamos diretamente a definição de calor latente: $L = \Delta Q/m$ ou seja,
$\Delta Q = m \cdot L_{vaporização} = 1.000\ g \cdot 540\ cal/g \Rightarrow \Delta Q = 540.000\ cal$
Essa é a energia necessária para fazer com que 1.000 g (1 litro) de água se tornem vapor a 100ºC.

2. Mais uma vez usamos a definição de calor latente, pois a água já está a 0ºC:
$\Delta Q = m \cdot L_{solidificação} = 10\ g \cdot (-\ 80\ cal/g)$
$\Delta Q = -\ 800\ cal$
É necessário que a água perca 800 cal para que se torne gelo a 0ºC.

3. Como não há perdas de energia, podemos usar a conservação de energia, ou seja: $\Delta Q_{cedido} + \Delta Q_{recebido} = 0$
O ferro está a uma temperatura mais alta, devendo então ceder calor para a água:
$\Delta Q_{cedido} = m_{ferro} \cdot c_{ferro} \cdot (t_f - t_i)$
$\Delta Q_{cedido} = 100 \cdot 0{,}11 \cdot (t_f - 200)$
$\Delta Q_{cedido} = 11 \cdot (t_f - 200)$
A água vai receber a energia térmica cedida pelo ferro:
$\Delta Q_{recebido} = m_{água} \cdot c_{água} \cdot (t_f - t_i)$
$\Delta Q_{recebido} = 1.000 \cdot 1 \cdot (t_f - 20)$
$\Delta Q_{recebido} = 1.000 \cdot (t_f - 20)$
Usando a conservação da energia, temos:
$11 \cdot (t_f - 200) + 1.000 \cdot (t_f - 20) = 0$
$11t_f - 2.200 + 1.000t_f - 20.000 = 0$
$1.011t_f = 22.200$
$t_f \cong 21{,}96ºC$

4. Para que 1 litro de água (1.000 g) a 20ºC se torne gelo a – 20ºC, é necessário calcular:
   a) a quantidade de energia que deve ser retirada para que a temperatura da água diminua de 20ºC até 0ºC;
   $\Delta Q_1 = m \cdot c_{água} \cdot \Delta t = 1.000 \cdot 1 \cdot (0 - 20) = -\ 20.000\ cal$
   b) a quantidade de energia que deve ser retirada para que a água se solidifique;
   $\Delta Q_2 = m \cdot L_{solidificação} = 1.000 \cdot (-\ 80) = -\ 80.000\ cal$
   c) a quantidade de energia que deve ser retirada para que a temperatura do gelo diminua de 0ºC até – 20ºC, ou seja: $\Delta Q_3 = m \cdot c_{gelo} \cdot \Delta t = 1.000 \cdot 0{,}5 \cdot (-\ 20 - 0) = -\ 10.000\ cal$

com isso podemos calcular a energia total retirada:
$\Delta Q_{total} = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$
$\Delta Q_{total} = -\ 20.000 - 80.000 - 10.000 = -\ 110.000\ cal$
Portanto, é necessário retirar 110.000 cal de um litro de água a 20ºC para obter gelo a –20ºC.

Aula 26 - Hoje, a torcida está “esquentada”!

1. **a)** Como o volume não variou esta é uma transformação isovolumétrica.
   b) Podemos então escrever a equação de estado do gás dentro do pneu da seguinte maneira:

$$\frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f}$$

Lembrando que a temperatura deve ser usada na escala absoluta, ou seja, na escala Kelvin, vamos fazer as mudanças de unidades:
$T = t_C + 273$
$T_i = (27 + 273)K = 300K$
$T_f = (57 + 273)K = 330K$. Substituindo esses valores na equação do gás, temos:

$$\frac{30\ lb / pol^2}{300K} = \frac{P_f}{330K}$$

Podemos então calcular a pressão final:

$$P_f = \frac{9.900}{300}\ lb/pol^2 \Rightarrow P_f = 33\ lb/pol^2$$

2. Para saber se houve vazamento, o técnico deve verificar se o número de moles do gás variou, ou seja, se:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = nR$$

Trata-se de uma transformação isotérmica. Então, podemos escrever: $P_1V_1 = P_2V_2$
Agora, basta calcular cada um dos lados da equação para verificar se realmente são iguais.
$P_1V_1 = 70 \text{ cmHg} \cdot 20 \text{ cm}^3 = 1.400 \text{ cmHg} \cdot \text{cm}^3 = n_1R$
$P_2V_2 = 120 \text{ cmHg} \cdot 10 \text{ cm}^3 = 1.200 \text{ cmHg} \cdot \text{cm}^3 = n_2R$
Ou seja, como as duas situações nos levam a números diferentes, confirmamos a hipótese do técnico: houve vazamento de gás no interior da válvula, pois o número de moles diminuiu ($n_1 > n_2$).

3. Como a temperatura permanece praticamente constante, a bolha sofre uma transformação isotérmica. Desse modo, podemos escrever: $P_1V_1 = P_2V_2$
Usando a dica de que, a cada dez metros de profundidade, a pressão aumenta 1 atmosfera, podemos calcular a pressão na profundidade em que está o mergulhador, ou seja:
$P_{\text{atmosférica}} = 1 \text{ atm}$
$P_1 = P_{\text{atmosférica}} + P_{\text{coluna d'água}} = 1 \text{ atm} + 3 \text{ atm} = 4 \text{ atm}$
Ou seja, o mergulhador e a bolha estão submetidos a uma pressão de 4 atm. Substituindo os dados fornecidos pelo problema, na expressão $P_1V_1 = P_2V_2$ podemos calcular V_2:
$4 \text{ atm} \cdot 2{,}5 \text{ cm}^3 = 1 \text{ atm} \cdot V_2$
$V_2 = 10 \text{ cm}^3$
A bolha se dilata de tal forma que, ao chegar à superfície, seu volume é de 10 cm^3.

4. Para calcular o número de moles no gás, usamos a equação de estado dos gases:

$$n = \frac{PV}{RT} \Rightarrow n = \frac{1\text{atm} \cdot 44{,}8\ell}{0{,}082\,\frac{\text{atm}\cdot\ell}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 300\text{K}} \Rightarrow n = \frac{44{,}8}{8{,}2 \cdot 3}\text{ moles} \Rightarrow n = 1{,}82 \text{ moles}$$

Sabemos que: 1 mol = $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas, portanto $n = 1{,}82 \cdot 1 \text{ mol} = 1{,}82 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \cong 10{,}96 \cdot 10^{23}$ moléculas, que é o número de moléculas nesse gás.

Aula 27 - Águas passadas não movem moinho!

1. Escrevemos a primeira lei da termodinâmica do seguinte modo: $\Delta Q = \Delta U + \tau$
   a) Como numa transformação isotérmica não há variação de temperatura, sabemos que não ocorre variação na energia interna do sistema, ou seja: $\Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$
   Escrevemos então a primeira lei da termodinâmica como: $\tau = \Delta Q$
   Isso significa que, nesse tipo de transformação, todo o trabalho realizado sobre o gás é convertido em calor.
   b) No caso da transformação isovolumétrica, sabemos que nenhum trabalho está sendo realizado, já que o volume do gás não varia, o gás não se expande, ou seja: $\Delta V = 0 \Rightarrow \tau = 0$
   A primeira lei será escrita assim: $\Delta Q = \Delta U$, isto é, todo o calor é transformado em energia interna do gás.
   c) No caso da transformação adiabática, sabemos que não ocorrem trocas de calor entre o sistema e o meio, ou seja: $\Delta Q = 0$
   Assim, escrevemos a primeira lei da seguinte maneira: $\Delta U = -\tau$
2. Numa transformação isovolumétrica $\Delta V = 0$ e portanto, o trabalho realizado pelo gás é nulo($\tau = 0$). Nesse caso, a primeira lei da termodinâmica será escrita assim: $\Delta Q = \Delta U = 1.000$ J isto é, a variação da energia interna do gás será igual ao calor recebido por ele.
3. Alternativa **e)**, pois numa transformação isovolumétrica, todo calor é transformado em energia interna. Na transformação isotérmica não há variação de energia interna, pois a temperatura do gás não varia.

Aula 28 - Dá um tempo, motor!

1. Sabemos que o trabalho realizado por uma máquina térmica pode ser descrito como a diferença entre a quantidade de calor cedida pela fonte quente e a quantidade de calor retirada pela fonte fria, ou seja:
$\tau = \Delta Q_{\text{quente}} - \Delta Q_{\text{fria}}$
A fonte fria é o interior da geladeira e a fonte quente é o seu exterior. Podemos então escrever:
$\tau = 1.000 \text{ cal} - 1.200 \text{ cal} = -\ 200 \text{ cal}$
O sinal negativo significa que o trabalho foi realizado **sobre o gás** e não **pelo gás**.

2. O rendimento de uma máquina térmica é dado pela expressão

$$\eta = 1 - \frac{\Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}} = 1 - \frac{T_{fria}}{T_{quente}}$$

Podemos calcular o rendimento substituindo os valores da temperatura:

$$\eta = 1 - \frac{300K}{500K} = 1 - 0,6 \Rightarrow \eta = 0,4$$

Isto é, o rendimento dessa máquina térmica é de 40%.

3. a) Novamente vamos usar a equação do rendimento:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta Q_{fria}}{\Delta Q_{quente}} = 1 - \frac{T_{fria}}{T_{quente}}$$

Como conhecemos a quantidade de calor retirado da fonte quente e a quantidade de calor cedido à fonte fria em 20 ciclos (1 segundo), podemos calcular a quantidade de calor cedida e retirada em cada ciclo simplesmente dividindo as quantidades dadas por 20:

$$\Delta Q_{fria}\ (1\ ciclo) = \frac{\Delta Q_{fria}\ (total)}{20}$$

$$\Delta Q_{quente}\ (1\ ciclo) = \frac{\Delta Q_{quente}\ (total)}{20}$$

Ao substituir essas grandezas na equação do rendimento, percebemos que não é necessário fazer a divisão por ciclo, pois elas se cancelam:

$$\eta = 1 - \frac{\dfrac{\Delta Q_{fria}\ (total)}{20}}{\dfrac{\Delta Q_{quente}\ (total)}{20}} = 1 - \frac{\Delta Q_{fria}\ (total)}{\Delta Q_{quente}\ (total)} = 1 - \frac{500}{800}$$

$\eta = 0,375$ que significa que a máquina terá rendimento de 37,5%.

b) Sabendo o rendimento e o valor da temperatura da fonte fria, podemos substituir esse valores na forma da expressão do rendimento em função da temperatura:

$$\eta = 1 - \frac{T_{fria}}{T_{quente}} \Rightarrow 0,375 = 1 - \frac{(27 + 273)K}{T_{quente}} \Rightarrow T_{quente} = \frac{300K}{(1 - 0,375)} \Rightarrow T_{quente} = 480K$$

que é a temperatura da fonte quente dessa máquina térmica.

Aula 29 - Como uma onda no mar...

1. a) Já que cada quadrado da figura representa 1 cm, a amplitude vale 3 cm, lembrando que amplitude é a maior distância em relação à posição de equilíbrio (que é sobre o eixo x).

b) Como nesse caso nós conhecemos apenas a amplitude, vamos utilizar o gráfico para saber quanto vale o comprimento de onda (que corresponde à distância entre duas cristas ou dois vales). Portanto, $\lambda = 16$ cm.

c) Agora podemos usar a relação $\lambda = v \cdot T$ para calcular o período:

$$T = \frac{\lambda}{v} \Rightarrow T = \frac{16\ cm}{4\ cm/s} \Rightarrow T = 4\ s$$

A freqüência é o seu inverso, portanto: f = 0,25 Hz

2. a) Se os pulsos percorriam 200 cm em 4 segundos, sua velocidade era: v = 200 cm/4 s = 50 cm/s

b) O comprimento de onda pode ser conhecido medindo-se a distância entre duas cristas sucessivas. Portanto: λ = 10 cm.

c) A freqüência com que Ernesto agitava sua mão era: $f = v/\lambda = 50/10 = 5Hz$

3. a) Já que Maristela agitava a mão duas vezes a cada segundo, a freqüência do seu movimento era 2 Hz e o período é seu inverso, portanto 0,5 s.

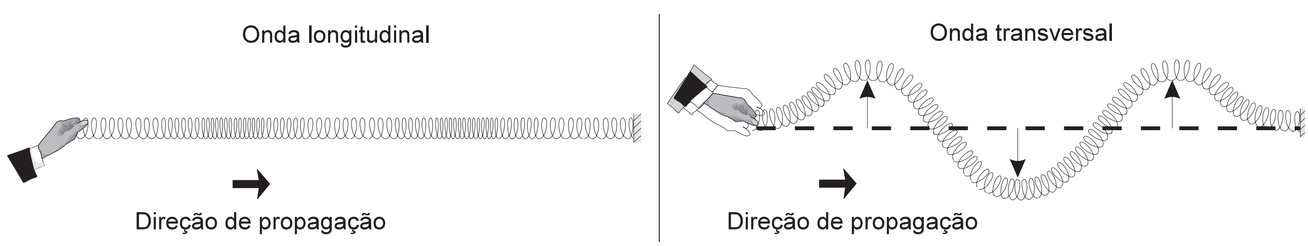
b) Com essa informação e os dados da tabela, podemos calcular o comprimento de onda em cada pedaço da corda:

CORDA	COMPRIMENTO DA ONDA
parte fina	λ = 3 cm
parte grossa	λ = 2 cm

Como a fonte que produz os pulsos é a mesma, a freqüência da onda não depende da espessura da corda, só depende da fonte. Portanto, a freqüência da onda não muda quando ela muda de meio. Assim, a razão: $v_f/\lambda_f = v_g/\lambda_g$, é constante, pois é igual à freqüência da fonte. Observando os valores obtidos, verificamos que a onda se propaga com maior velocidade na parte mais fina da corda; nessa parte, também o comprimento de onda é maior.

Aula 30 - Um papinho, um violão e a bendita construção!

1. Ambas são ondas mecânicas, produzidas a partir de vibrações num meio material, necessário para que essas ondas se propaguem. A diferença fundamental está na relação entre a direção de propagação da onda e a direção de deslocamento dos "pontos" do meio. No caso das ondas transversais, essas direções são perpendiculares. No caso de ondas longitudinais, elas têm a mesma direção.



2. Aqui vale a relação entre comprimento de onda, freqüência e velocidade de propagação: $\lambda = v/f$, portanto: $\lambda = 340/440 \cong 0{,}77$ m ou 77 cm

3.

a) A velocidade do trem era 20 m/s e ele levou 170 s para percorrer a distância x. Usando a definição de velocidade:

$$v = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo}} \Rightarrow 20 = \frac{x}{170} \Rightarrow x = 3.400 \text{ m}$$

Portanto, o trem estava a 3.400 m da estação.

b) Agora, para saber quanto tempo o som do apito demorou para chegar à estação, usamos novamente a definição de velocidade, considerando que o som percorreu a distância x:
$340 = 3.400/\Delta t$
$\Delta t = 10$ s

4. O som, como todas as ondas mecânicas, precisa de um meio material para se propagar, portanto, não se propaga no vácuo. Isso ocorre porque o som é produzido a partir da vibração das moléculas (ou dos átomos) do meio: sua propagação ocorre porque essa vibração é transmitida de uma molécula a outra do meio. Logo, sem átomos ou moléculas, não há o que vibrar!

Aula 31 - Assim caminha a luz

1. Os triângulos ABE e ECD são semelhantes. Então,

$$\frac{AB}{10m} = \frac{CD}{0,5m}$$

$$\frac{AB}{10m} = \frac{0,05m}{0,5m}$$

AB = 1m

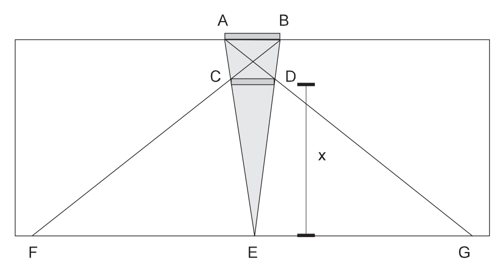
2. Observe a figura. Nela, os triângulos ABE e CDE são semelhantes. Teremos então:

$$\frac{AB}{CD} = \frac{3,0m}{x}$$

$$\frac{40cm}{36cm} = \frac{3,0m}{x}$$

x = 2,7m

Os triângulos ACD e AEG são semelhantes. Então:

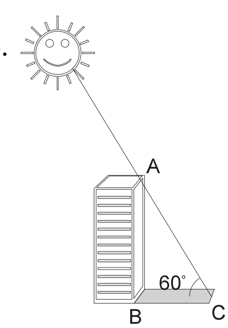


$$\frac{3,0 - x}{CD} = \frac{3}{EG}$$ como x = 2,7 m, teremos:

$$\frac{0,3m}{36cm} = \frac{3m}{EG}$$

EG = 360cm
EG = 3,6m

3. Observe a figura. O prédio e a sombra formam um triângulo retângulo. Nele, temos:



$$\frac{AB}{BC} = tg60^\circ = \sqrt{3}$$

$$BC = \frac{40}{\sqrt{3}} \cong 23,1m$$

4. Os triângulos OAB e OCD são semelhantes. Então,

$$\frac{AB}{OB} = \frac{CD}{OD}$$

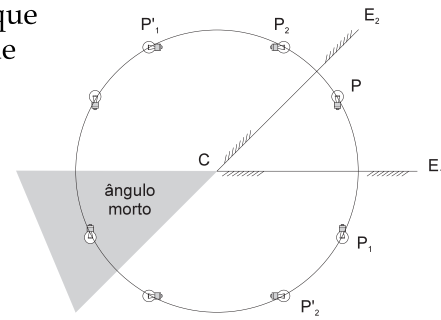
$$\frac{2cm}{x} = \frac{3.000km}{380.000km}$$

Assim, podemos verificar que **x** vale aproximadamente 2,5 metros.

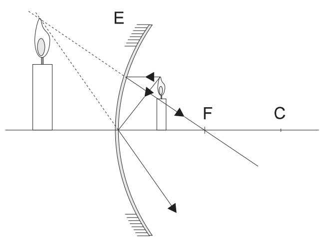
Aula 32 - Espelho, espelho meu...

1. Os espelhos E_1 e E_2 vão formar, respectivamente, as imagens P_1 e P_2 Para obter P_1 basta traçar o ponto simétrico de P com relação ao espelho E_1. Isto é, os pontos P_1 e P vão estar à mesma distância do espelho E_1. Para obter P_2 basta traçar o ponto simétrico de P com relação ao espelho E_2. Isto é, os pontos P_2 e P vão estar à mesma distância do espelho E_2. Já o ponto P_1 vai servir de objeto para o espelho E_2

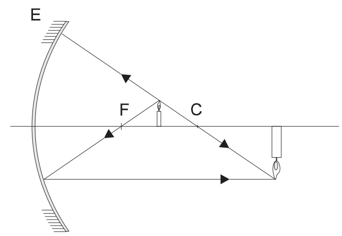
e formar a imagem P'_1. O mesmo vai acontecer com o ponto P_2, que vai servir de objeto para E_2 e formar a imagem P'_2. O processo segue da mesma maneira e vão aparecer as imagens P''_1 e P''_2. As duas últimas formam imagens coincidentes dentro do ângulo morto (P_f), e não teremos mais imagens posteriores. Uma vez obtidas todas as imagens, podemos colocar a ponta de um compasso no ponto C, abrir a outra ponta até o ponto P, e traçar uma circunferência. Ela vai passar por todas imagens.



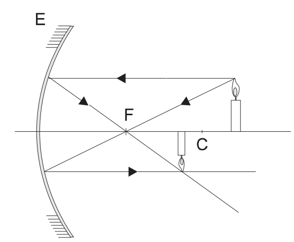
2. Nos espelhos esféricos côncavos, um objeto real só pode estar em três posições: entre o vértice e o foco (caso 2a), entre o foco e o centro (caso 2b) e além do centro (caso 2c). Utilizando duas das construções descritas, em **Obtendo graficamente a imagem de um ponto**, podemos obter as imagens pedidas.



2a) Imagem virtual direta maior



2b) Imagem real invertida maior



2c) Imagem real invertida menor

3. Já temos os raios incidentes nos espelhos. São raios que estão entrando no sistema paralelamente ao eixo principal ou passando pelo foco. Assim, basta usar as construções descritas em **Obtendo graficamente a imagem de um ponto**. No primeiro caso, o do espelho convexo, teremos uma imagem real, direita e maior que o objeto. No espelho côncavo, a imagem também é real e direita, mas menor que o objeto.

Aula 33 - Atira mais em cima!

1. Como vimos anteriomente, o índice de refração do ar com relação à agua vale $\frac{3}{4}$.

Então, $\dfrac{\text{sen}\,\lambda}{\text{sen}\,90°} = n_{\text{ar, água}} = \dfrac{3}{4}$

$$\frac{\text{sen}\,\lambda}{1} = \frac{3}{4}$$

$$\text{sen}\,\lambda = \frac{3}{4}$$

Se procurarmos o ângulo cujo seno é $\frac{3}{4}$, obteremos algo entre 48º e 49º.

2. Vamos verificar, inicialmente, de onde a pessoa vê o peixe. Quem é o objeto? É o peixe. A distância do objeto à superfície vale 36 cm. Como quem vê, nesse caso, é a pessoa, a luz vem do peixe. Para a pessoa, então, o primeiro meio é a agua e o segundo é o ar. Logo,

$$n_{2,1} = n_{\text{ar, água}} = \frac{3}{4}$$

Mas também temos:

$$\frac{\text{distância da imagem até a superfície}}{\text{distância do objeto até a superfície}} = n_{2,1} = n_{\text{ar, água}}$$

Então,

$$\frac{x}{36cm} = \frac{3}{4}$$

Então x = 27 cm.

No segundo caso, a pessoa é o objeto. O objeto dista 72 cm da superfície. A luz vai do ar para a água, pois quem está observando é o peixe. Então:

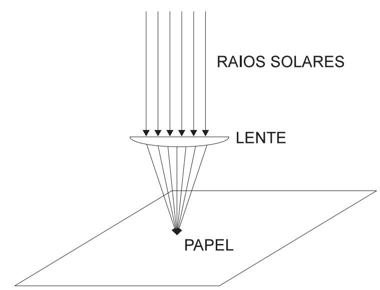
$$n_{2,1} = n_{\text{água, ar}} = \frac{4}{3}$$

Utilizando a mesma relação anterior, teremos:

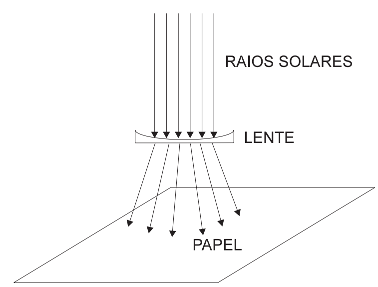
$$\frac{x}{72cm} = \frac{4}{3}$$

Então x = 96 cm.

Aula 34 - Eu não nasci de óculos!



1. Uma pessoa hipermétrope usa lentes convergentes. Quando expomos a lente ao Sol, o Sol está para a lente a uma distância infinita. Os raios solares chegam à lente paralelos. Então, após passar pela lente, eles vão se encontrar no foco da mesma, como mostra a figura ao lado. Esse é um foco imagem real, e os raios luminosos que saem da lente vão convergir para ele. A temperatura eleva-se bastante porque todos raios luminosos que atingem a lente são concentrados naquele ponto.



2. No caso de uma pessoa míope, as lentes que corrigem o defeito são divergentes. Os raios do Sol chegam à lente, também, como um feixe paralelo. Acontece que, para lentes divergentes, o foco é virtual. Logo, os raios que saem da lente são divergentes. A luz e o calor do Sol são, dessa maneira, espalhados pela folha de papel, como está representado na figura.

Aula 35 - A luz em bolas

1. O número de batidas do coração por minuto era 72. Então, a freqüência de batidas por segundo era:

$$\frac{72 \text{ batidas}}{60 \text{ segundos}} = 1{,}2 \text{ batidas / s}$$

O intervalo de tempo entre duas batidas é o inverso desse número:

$$\frac{1}{1{,}2} = \frac{5}{6}\text{s}$$

Logo, nesse tempo, a luz percorreria uma distância de:

$$\frac{5}{6}\text{s} \cdot 300.000 \text{ km / s} = 250.000 \text{ km}$$

2. Além de um grande físico teórico, Newton era um excelente experimentador. Ele não desconhecia o fato de que um raio luminoso, ao passar do ar para a água, vai aproximar-se da normal. Acontece que, na sua época, a definição do índice de refração como sendo o quociente de duas velocidades era desconhecida. Então, ele poderia fazer suposições a respeito da velocidade da luz nos diferentes meios sem estar cometendo erro algum.

Aula 36 - Ô, raios!

1. Quando aproximamos o canudo da placa, as cargas dentro dela vão se separar. Ao tocarmos o dedo na placa, algumas cargas negativas da placa passam para o dedo, pois são empurradas pelas cargas negativas do canudo. Porém, se retirarmos o canudo **antes** do dedo, as cargas negativas voltam para a placa. Agindo dessa maneira, não conseguiremos carregar a placa. Se quisermos carregar a placa por indução, o **dedo** deveria ser retirado antes.
2. Quando o canudo é aproximado das placas, como mostra a figura, ele "empurra" algumas cargas negativas da placa à direita para a outra placa. Então a placa à esquerda está negativa e a da direita, positiva. Se as placas forem separadas **sem que o canudo seja retirado da posição**, elas ficarão carregadas. Porém, se o canudo for retirado **antes**, as cargas voltam para as placas de origem e nenhuma delas ficará carregada.
3. Como o eletroscópio está carregado positivamente, tanto a lingüeta como o corpo do eletroscópio estão com excesso de cargas positivas. É por isso que a lingüeta está aberta. As cargas positivas do corpo repelem as cargas positivas da lingüeta. Porém, ao aproximarmos o canudo do disco do eletroscópio, vamos empurrar algumas cargas negativas para a parte de baixo. Estas vão anular algumas das cargas positivas e a lingüeta vai se fechar um pouco.

Aula 37 - Atração fatal

1. O problema é apenas uma aplicação direta da lei de Coulomb, ou seja:

   $$F = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

   Substituindo-se os valores dados no problema, teremos:

   $$F = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 8 \cdot 10^{-10}}{(4 \cdot 10^{-4})^2} = 2{,}25 \cdot 10^{-2}\text{N}$$

2. Vamos calcular, inicialmente, a força de repulsão entre as cargas positivas. Vamos chamar essa força de F_1. Teremos:

   $$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-10} \cdot 6 \cdot 10^{-10}}{(9 \cdot 10^{-2})} = 4{,}0 \cdot 10^{-7}\text{N}$$

   Se chamarmos de F_2 a força de atração entre a carga negativa e a positiva que está mais próxima, Q_1, teremos:

   $$F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^{-10}}{(3 \cdot 10^{-2})} = 1{,}8 \cdot 10^{-6}\text{N}$$

   Finalmente, a força de atração F_3 entre a carga negativa e a carga positiva que está mais distante, Q_2,vai ser:

   $$F_3 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^{-10}}{(6 \cdot 10^{-2})} = 4{,}5 \cdot 10^{-7}\text{N}$$

   A força resultante atuando sobre a carga negativa vai ter o valor:
   $F = F_2 - F_3 = 1{,}8 \cdot 10^{-6} - 4{,}5 \cdot 10^{-7} = 1{,}35 \cdot 10^{-6}$ N
   Na carga positiva mais próxima da carga negativa, Q_1, a força será:
   $F = F_2 - F_1 = 1{,}8 \cdot 10^{-6} - 4{,}0 \cdot 10^{-7} = 1{,}4 \cdot 10^{-6}$ N
   Finalmente, a força na última carga terá valor igual a:
   $F = F_3 - F_1 = 4{,}5 \cdot 10^{-7} - 4{,}0 \cdot 10^{-7} = 0{,}5 \cdot 10^{-7}$ N
3. Vamos calcular as duas forças que agem sobre a carga que está no vértice do triângulo. Teremos:

   $$F_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (8 \cdot 10^{-8})^2}{(3 \cdot 10^{-2})^2} = 3{,}6 \cdot 10^{-2}\text{N}$$

$$F_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (8 \cdot 10^{-8})^2}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = 6{,}4 \cdot 10^{-2}\,\text{N}$$

E, para a força resultante, vamos ter:

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2$$

$$F \cong 7{,}3 \cdot 10^{-2}\,\text{N}$$

Aula 38 - Hoje estou elétrico!

1. O campo gerado por uma carga negativa é um campo radial e as linhas de campo do mesmo apontam para a carga. Para calcular seu valor, basta usar a definição de campo:

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-8}}{(2 \cdot 10^{-2})^2} = 1{,}35 \cdot 10^6\,\text{N/C}$$

O campo gerado por uma carga depende do inverso do quadrado da distância da carga ao ponto considerado. Então, se quisermos que o valor do campo caia pela metade, devemos multiplicar a distância por $\sqrt{2}$. Logo, o valor do campo a uma distância de $2\sqrt{2}$ cm será a metade do valor do campo a uma distância de 2 cm da carga.

2. Queremos saber qual é o campo no ponto médio entre as duas cargas, isto é, num ponto que esteja situado a 1 cm de cada uma delas. Teremos portanto (ver Figura 1):

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Para a carga Q_1 o valor do campo será:

$$\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-8}}{(1 \cdot 10^{-2})^2} = 2{,}7 \cdot 10^6\ \text{N / C}$$

E para a outra carga, Q_2:

$$\frac{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-8}}{(1 \cdot 10^{-2})^2} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{N / C}$$

Então, o campo resultante será:

$3{,}6 \cdot 10^6 - 2{,}7 \cdot 10^6 = 0{,}9 \cdot 10^6$ N/C

Como o campo gerado pela carga maior é o maior dos dois, o campo resultante vai apontar para a carga de menor valor.

Vamos agora determinar o ponto onde o campo é nulo. Suponhamos que ele esteja a uma distância d de Q e a uma distância d_2 de Q_2 (Figura 2). Para que nesse ponto o campo seja nulo, os valores dos campos gerados por cada uma das cargas devem ser os mesmos. Teremos portanto:

$$\frac{k \cdot Q_1}{d_1^2} = \frac{k \cdot Q_2}{d_2^2}$$

$$\frac{3}{d_1^2} = \frac{4}{d_2^2}$$

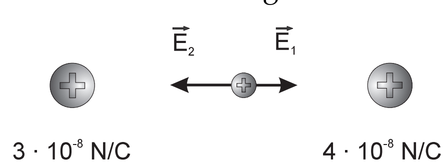


Figura 1

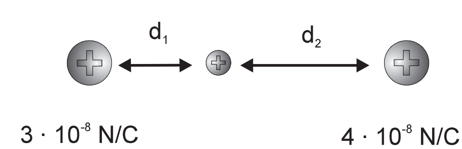


Figura 2

Por outro lado, a soma dessas distâncias deve ser a distância entre as cargas. Então:

$d_1 + d_2 = 2$ (1)

$4 \cdot {d_1}^2 = 3(2 - d_1)^2$

Extraindo a raiz quadrada dessa expressão, teremos:

$$2 \cdot d_1 = \sqrt{3} \cdot (2 - d_1)$$

Resolvendo essa equação e, em seguida, substituindo o valor obtido na equação (1), teremos:
$d_1 \cong 0{,}93\text{cm}$
$d_2 \cong 1{,}07\text{cm}$

3. Sabendo o valor do campo elétrico e o valor da carga do elétron, podemos calcular a força que age sobre o mesmo:
$F = q \cdot E = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 5 \cdot 10^3\ N/C = 8 \cdot 10^{-16}\ N$

Uma vez conhecida a força que age sobre o elétron, podemos calcular a aceleração a que ele fica submetido:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8 \cdot 10^{-16}N}{9{,}1 \cdot 10^{-31}kg} \cong 8{,}8 \cdot 10^{14}\ N/Kg = 8{,}8 \cdot 10^{14} m/s^2$$

Como o movimento é uniformemente variado, pois a força que age sobre o elétron é constante, podemos relacionar o deslocamento do elétron Δs com a aceleração e o tempo:

$\Delta s = \dfrac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$, ou ainda:

$$t^2 = \frac{2 \cdot \Delta s}{a} = \frac{2 \cdot 10^{-2}m}{8{,}8 \cdot 10^{14}\ m/s^2} \cong 2{,}27 \cdot 10^{-17}$$

logo, $t \cong 4{,}8 \cdot 10^{-9}$ s

Sabendo o tempo gasto para que o elétron atinja a placa, podemos calcular sua velocidade e sua energia cinética ao atingir a placa:
$v = a \cdot t = 8{,}8 \cdot 10^{16} \cdot 4{,}8 \cdot 10^{-9} \cong 4{,}2 \cdot 10^8\ m/s$

$$E_C = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot (4{,}2 \cdot 10^8)^2}{2} \cong 8 \cdot 10^{-18} J$$

Aula 39 - Alta voltagem

1. Como as linhas de campo mostram a trajetória de uma partícula carregada positivamente, e elas saem da placa A e vão para a placa B, então essa carga positiva está sendo repelida pela placa A e atraída pela placa B. Logo, a placa A é positiva e a placa B é negativa.
O trabalho para mover o elétron entre as placas A e B vai ser dado por:
$\tau_{AB} = E \cdot q \cdot \Delta d$
$\tau_{AB} = 3 \cdot 10^4\ N/C \cdot\ 1{,}6 \cdot 10^{-19} =\ 4{,}8 \cdot 10^{-15}\ J$
Como o elétron é uma carga negativa, seu movimento se faz no sentido contrário ao das linhas de força. Quando ele estiver na placa B, sua energia potencial será máxima, pois ele está sendo atraído pela placa A e repelido pela placa B. Ao chegar a A, sua energia será nula. Ao transportar o elétron de A para B, vamos aumentar sua energia potencial elétrica.
Para saber a diferença de potencial entre as placas do capacitor, bastará utilizarmos a relação:
$\Delta V = E \cdot \Delta d$
Como a distância entre as placas é 10 cm, ou seja, 0,1 m, teremos:
$\Delta V = E \cdot \Delta d$
$\Delta V = 3 \cdot 10^4\ N/C \cdot\ 0{,}1m\ =\ 3.000\ V$

2. A variação da energia potencial é dada por: $\Delta E_p = q \cdot E \cdot \Delta d$
Como temos uma diferença de potencial de 100 V aplicada em duas placas que estão separadas por 10 cm, isto é, por 0,1 m, o valor do campo elétrico vai ser:

$$E = \frac{100\ V}{0{,}1\ m} = 1.000\ V/m = 1.000\ N/C$$

Por outro lado, a variação da energia potencial vale:
$\Delta E_p = q \cdot E \cdot \Delta d$
$\Delta E_p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C \cdot\ 1.000\ N/C\ \cdot 0{,}1m\ = 1{,}6 \cdot 10^{-16}\ J$
Se o elétron foi abandonado na placa negativa, sua velocidade inicial era zero. À medida que ele vai se aproximando da placa positiva, sua energia cinética vai aumentando ao mesmo tempo que sua energia potencial elétrica vai diminuindo. Esta última se anula quando ele atinge a placa positiva. O acréscimo de energia representa, portanto, o acréscimo de energia cinética. Se representarmos a variação da energia cinética por ΔE_C , teremos: $\Delta E_C\ = 1{,}6 \cdot 10^{-16}$ J
Então,

$$\Delta E_C = \frac{m \cdot v^2}{2} = 1{,}6 \cdot 10^{-16}$$

Podemos, agora, calcular o valor da velocidade:

$$v^2 = \frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-16}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}} \cong 3{,}52 \cdot 10^{14}$$

$v \cong 1{,}88 \cdot\ 10^7$ m/s

Aula 40 - Paaaai, o chuveiro pifou!

1. **a)** 10^4 mA; **b)** 250 mA; **c)** 8,5 mA
2. **a)** $5 \cdot 10^6\ \mu A$; **b)** 6.000 μA; **c)** 45 μA
3. **a)** $20 \cdot 10^{-3}$ A; **b)** 0,68 A; **c)** 2,3 A; **d)** $500 \cdot 10^{-6}$A; **e)** $3{,}8 \cdot 10^{-3}$A; **f)** 8,88 A
4. $i = 8 \cdot 10^{-10}$ A
5. **a)** $\Delta q = 5$ C; **b)** $n = 3{,}125 \cdot 10^{19}$elétrons

Aula 41 - Me deixa passar, senão eu esquento!

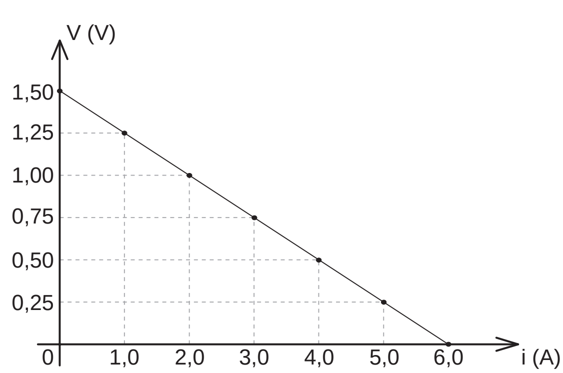
1. $R = 4\ \Omega$
2. $R = 0{,}917\ \Omega$
3. $R_E = 4\ \Omega$
4. $R_E = 60\ \Omega$
5. $R_E = 2\ \Omega$
6. **a)** 110 V é a tensão, 40 W é a potência dissipada; **b)** i = 0,36 A;
c) $E = 6$ kWh $= 21{,}6 \cdot 10^6$ J; **d)** P = 53,3 W
7. $R = 17{,}3\ \Omega$
8. **a)** $P_T = 3.500$ W; **b)** $R = 13{,}8\ \Omega$

Aula 42 - Ele deu... a luz

1. 8,6 V
2. i = 18 A
3. **a)**

V (volts)	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25	0
i (ampères)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0

b)



4. **a)** $P_T = 0{,}6$ W
   $P_U = 0{,}568$ W
   $\eta = 94{,}7$ %
   b) $P_T = 7{,}5$ W
   $P_U = 2{,}5$ W
   $\eta = 33{,}3$ %
5. $r = 2{,}5\ \Omega$
6. $\eta = 66{,}7$ %

Aula 43 - Deu curto!

1. $i = 150 \cdot 10^{-6}$ A $= 150\ \mu$A
2. $i = 0{,}1$ A
3. $i = 0{,}8$ A
4. $V_{AB} = -13{,}75$ V
5. $i = 15$ A (ou maior)
6. $i = 44$ A (ou maior)
7. $i = 0{,}25$ A (leitura do amperímetro); $V = 5{,}0$ V (leitura do voltímetro)

Aula 44 - Estou desorientado!

1. **a)** $\uparrow \vec{F}$ **; b)** $\odot \vec{F}$; **c)** $\uparrow \vec{F}$; **d)** $\odot \vec{F}$
2. $F = 1{,}44 \cdot 10^{-4}$ N
3. A partícula 1 tem carga positiva, a partícula 2 tem carga negativa e a partícula 3 é neutra.
4. $R = 4 \cdot 10^{-2}$ m $= 4$ cm

Aula 45 - Hoje não tem vitamina, o liquidificador quebrou!

1. **a)** $\vec{F}\uparrow$; **b)** $\vec{F}\uparrow$; **c)** $\odot \vec{F}$; **d)** $\otimes \vec{F}$
2. **a)** nula; **b)** $F = 0{,}084$ N; **c)** $F = 0{,}14$ N
3. O módulo do campo é o mesmo para ambos os pontos: $B = 100 \cdot 10^{-7}$ T $= 10^{-5}$T. Em A ele é vertical para baixo; em B, vertical para cima.

Aula 46 - Alguém aí tem um transformador para emprestar?

1. **a)** $\Phi = 4 \cdot 10^{-3}$ Wb; **b)** $\Phi = 2{,}84 \cdot 10^{-3}$ Wb
2. **a)** 1,0 Wb
   b) Aparece na espira uma fem induzida cujo valor depende do intervalo de tempo transcorrido até que a corrente no eletroímã se extinga.
3. **a)** $V_2 = 600$ V; **b)** $V_1 = 1{,}83$ V
4. **a)** $i_1 = 2{,}2$ A; $i_2 = 0{,}037$ A; **b)** $i_1 = 12$ A; $i_2 = 0{,}2$ A
5. **a)** $i_1 = 2$ A; **b)** $V_2 = 8.800$V; $i_2 = 0{,}05$A

Aula 47 - O mundo do átomo

1. **a)** dividida; **b)** indivisível; **c)** átomo; **d)** indivisíveis;
   e) elétron; **f)** pudim de passas
2. **a)** Rutherford; **b)** núcleo; **c)** Sol; **d)** gravitacional
3. **a)** recebe; **b)** afastada; **c)** perde
4. **a)** desintegrações; **b)** número atômico
5. **a)** hidrogênio; **b)** próton; **c)** elétron

Aula 48 - Mergulhando no núcleo do átomo

1. **a)** prótons; **b)** contrário; **c)** nêutrons; **d)** neutros; **e)** nuclear;
   f) elétrica **g)** gravitacional;
2. **a)** César Lattes;
3. **a)** prótons; **b)** prótons; **c)** nêutrons; **d)** noventa;

4. **a)** energia; **b)** píons;
5. **a)** quarks; **b)** três;
6. **a)** fissão; **b)** fusão;

Aula 49 - Em Brasília, 19 horas

1. **a)** eletromagnética; **b)** fótons; **c)** partícula
2. **a)** maior; **b)** fóton
3. **a)** comprimento; **b)** lambda; **c)** rádio; **d)** comprimentos; **e)** gama;
   f) comprimento; **g)** infravermelho; **h)** ultravioleta; **i)** violeta

Aula 50 - Tudo é relativo

1. **a)** repouso; **b)** movimento; **c)** relativos; **d)** referencial
2. **a)** partícula; **b)** onda; **c)** ausência; **d)** mecânicas;
   e) constante; **f)** referencial
3. **a)** absoluto; **b)** referencial; **c)** devagar; **d)** dilatação
4. **a)** contração; **b)** diminuem; **c)** relativa; **d)** energia; **e)** $E = m \cdot c^2$