

Propagação do calor

Neve para se aquecer

Polo norte, temperatura abaixo dos 30 °C negativos. O que você faria para se proteger do frio? Construa uma casa de neve! O que parece estranho é uma solução bastante engenhosa. Os iglus são construções esquimós muito antigas que garantiram a sobrevivência desse povo num dos lugares mais inóspitos do planeta.

A propagação do calor pode realizar-se de três diferentes maneiras: condução, convecção e irradiação, estando presente em várias situações práticas. Em uma garrafa térmica, por exemplo, procura-se minimizar as trocas de calor que ocorreriam por meio dos três processos.

7.1 Fluxo de calor

O fluxo de calor através de uma superfície é a quantidade de calor transmitida por unidade de tempo.

7.2 Condução térmica

Para que ocorra transmissão de calor por condução térmica, é necessária a presença de um meio material.

7.3 Convecção térmica

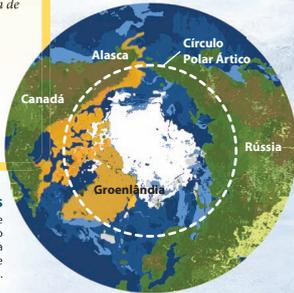
A convecção térmica consiste no movimento de massas fluidas que trocam de posição por diferença de densidade.

7.4 Noções de irradiação térmica

Na irradiação térmica a transmissão de energia ocorre sem a necessidade de um meio material.

Os inuítes

Os inuítes são um grupo de esquimós que habitam o norte do Canadá, o Alasca e a Groenlândia. É deles o costume de construir iglus.



Para se construir um iglu a neve usada nos blocos deve estar bem dura (para sustentar o peso dos outros blocos).

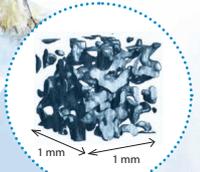
Hoje em dia não se usam os iglus como moradia, apenas como abrigo em temporadas de caça.



A fogueira e o calor emanado pelo corpo aquecem o ar, elevando-o junto com a umidade, que congela ao passar pelas frestas entre os blocos, vedando os espaços e reforçando a estrutura.

Isolantes na natureza

A pelagem, densa e de comprimentos variados, dos ursos-polares armazena ar em seu interior e juntamente com uma espessa camada de gordura sob a pele isola o corpo do animal do meio ambiente, protegendo-o do frio.



A gordura também é um ótimo isolante térmico. Os esquimós seguem uma dieta com grandes concentrações de lipídios, para que, assim como os ursos, possam armazenar boa quantidade de gordura sob a pele.

Neve, não gelo!

A neve funciona muito bem como isolante térmico, pois, quando compactada, guarda pequenas bolsas de ar em seu interior, diferentemente do gelo, embora este também seja isolante. Isso faz toda diferença, pois o ar é um ótimo isolante térmico, evitando a transferência de calor por condução.

Para pensar

1. Por que um iglu de gelo não seria tão eficiente quanto um de neve?
2. É comum ouvirmos falar que uma blusa de lã nos aquece no frio. Essa afirmação está correta? Justifique.

Vale a pena

Dentro do iglu, a temperatura pode chegar a "confortáveis" -3 °C. Considerando que a temperatura externa fica próxima dos -30 °C, dormir dentro de um iglu é uma ótima alternativa.



Seção 7.1

Objetivo

► Conceituar fluxo de calor e conhecer suas unidades de medida.

Termos e conceitos

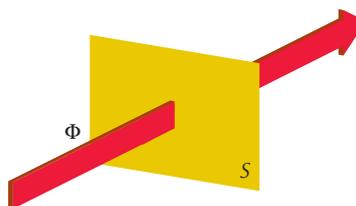
• quantidade de calor

Fluxo de calor

A propagação do calor pode ocorrer por três processos diferentes: **condução**, **convecção** e **irradiação**. Qualquer que seja o processo, a transmissão do calor obedece à seguinte lei geral:

Espontaneamente, o calor sempre se propaga de um corpo com maior temperatura para um corpo de menor temperatura.

Para os três modos de propagação, definimos a grandeza **fluxo de calor** (Φ).



► **Figura 1.** O fluxo Φ de calor através de S é numericamente igual à quantidade de calor transmitida na unidade de tempo.

Seja S uma superfície localizada na região em que ocorre a propagação de calor. O fluxo de calor Φ através da superfície S é dado pela relação entre a quantidade de calor Q que atravessa a superfície e o intervalo de tempo Δt decorrido:

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

As unidades usuais de fluxo de calor são cal/s e kcal/s. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade é o watt (W), que corresponde ao joule por segundo (J/s).

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.



► O calor gerado na combustão propaga-se da fogueira ao seu entorno, aquecendo o ambiente e as pessoas próximas.



Seção 7.2

Condução térmica

Objetivos

- Compreender como ocorre o processo de condução térmica.
- Enunciar a lei de Fourier da condução térmica.
- Reconhecer a ocorrência e as aplicações da condução térmica no cotidiano.

Termos e conceitos

- regime estacionário de condução de calor
- coeficiente de condutibilidade térmica
- condutor térmico
- isolante térmico

Segure a extremidade A de uma barra de ferro AB (fig. 2) e leve a outra extremidade a uma chama. Após um intervalo de tempo relativamente curto, a extremidade que você segura estará quente, o que requer o uso de uma luva protetora.

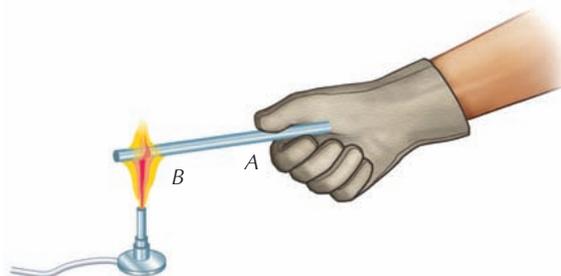


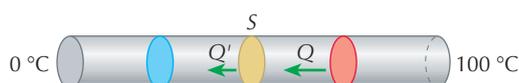
Figura 2. O ferro é bom condutor: o calor se propaga rapidamente da extremidade B à extremidade A .

O processo pelo qual o calor se propagou da chama para a sua mão é denominado **condução térmica**. O calor é transmitido de uma extremidade a outra por meio da agitação molecular e dos choques entre as moléculas. A rapidez com que a extremidade A se apresentou aquecida caracteriza a condição de bom condutor do ferro. Se a experiência descrita fosse realizada com uma barra de vidro, somente depois de muito tempo a extremidade A estaria aquecida, pois o vidro é um mau condutor de calor, ou seja, é um isolante térmico.

Para ocorrer a condução, deve existir um meio material. No entanto, é a energia que se propaga; as partes do corpo não se deslocam, havendo apenas transmissão da agitação molecular.

Imaginemos uma barra metálica inicialmente a 20 °C (fig. 3A). Uma de suas extremidades é colocada em gelo fundente (0 °C) e a outra em vapor de água em ebulição (100 °C).

A Inicialmente: $Q' < Q$



B Após certo tempo: $Q' = Q$

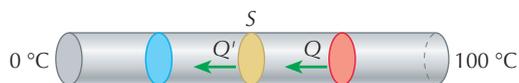


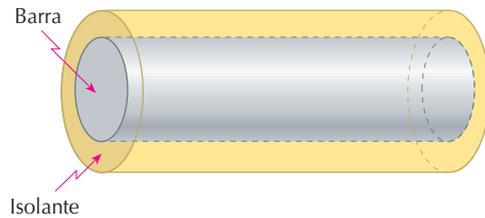
Figura 3. Inicialmente, o regime é variável ($Q' < Q$). Após certo tempo, o regime torna-se estacionário ($Q' = Q$).

Inicialmente, a quantidade de calor Q recebida por um elemento S da barra é maior que a quantidade Q' cedida para o elemento seguinte. A diferença $Q - Q'$ é utilizada no aquecimento do elemento S . Nessas condições, dizemos que o regime de condução é variável, pois a temperatura dos elementos da barra varia à medida que o calor é conduzido.

A partir de certo instante, a temperatura do elemento S da barra não mais varia: a quantidade de calor Q recebida pelo elemento S é igual à quantidade de calor Q' cedida ao elemento seguinte (fig. 3B). O regime de condução torna-se então estacionário e a temperatura dos elementos da barra não varia no decorrer do tempo.

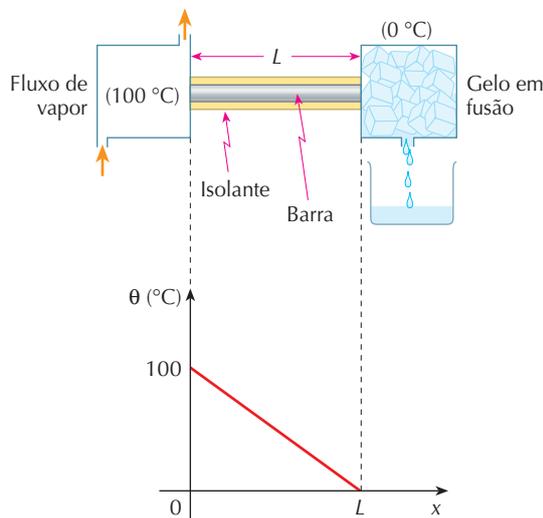


Na prática, o regime estacionário de condução pode ser obtido com a barra envolvida por um isolante em sua superfície lateral (fig. 4), a fim de se evitar a transmissão de calor para o meio ambiente.



◀ **Figura 4.** Para se obter o regime estacionário, a barra é isolada lateralmente.

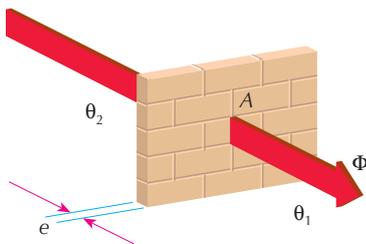
Assim, se a barra tem uma extremidade em contato com um recipiente no qual circula vapor de água em ebulição, a 100 °C, e a outra extremidade em contato com um recipiente contendo gelo em fusão, a 0 °C (fig. 5), após certo tempo se estabelece o regime estacionário de condução. Quando isso acontece, verifica-se que, de um extremo a outro da barra, há uma distribuição uniforme de temperatura, como indica o gráfico da figura 5.



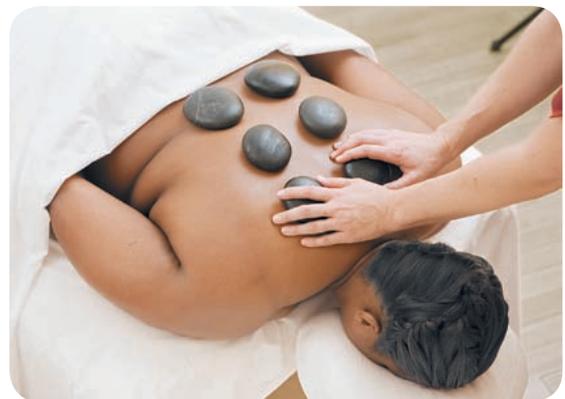
◀ **Figura 5.** No regime estacionário, a temperatura varia de um extremo a outro, uniformemente, como indica o gráfico.

1 Lei da condução térmica

Considere dois ambientes a temperaturas θ_1 e θ_2 tais que $\theta_2 > \theta_1$, separados por uma parede de área A e espessura e (fig. 6).



▶ **Figura 6.** O fluxo de calor Φ é diretamente proporcional à área A e à diferença de temperatura $\Delta\theta$, e inversamente proporcional à espessura e .



▶ **Terapia de relaxamento com pedras quentes.** As pedras, com maior temperatura que o corpo humano, geram um fluxo de calor no sentido das pedras para o corpo do paciente.

Em regime estacionário, o fluxo de calor Φ (quantidade de calor que atravessa uma superfície pelo intervalo de tempo) depende da área A da parede, da espessura e , da diferença de temperatura $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ e da natureza do material que constitui a parede.

Verifica-se experimentalmente que, para um dado material, o fluxo de calor é tanto maior quanto maior a área A , quanto maior a diferença de temperatura $\Delta\theta$ e quanto menor a espessura e .

Em regime estacionário, o fluxo de calor por condução num material homogêneo é diretamente proporcional à área da seção transversal atravessada e à diferença de temperatura entre os extremos, e inversamente proporcional à espessura da camada considerada.

Esse enunciado é conhecido como **lei de Fourier***, expressa pela fórmula:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e}$$

A constante de proporcionalidade K depende da natureza do material, sendo denominada **coeficiente de condutibilidade térmica**. Seu valor é elevado para os bons condutores de calor (condutores térmicos), como os metais, e baixo para os isolantes térmicos. Exemplos:

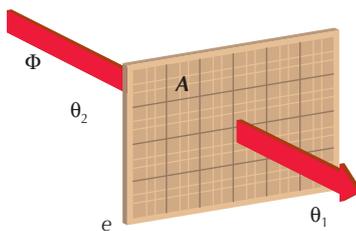
Prata	0,99 cal/s · cm · °C
Alumínio	0,50 cal/s · cm · °C
Ferro	0,16 cal/s · cm · °C

Água	0,0014 cal/s · cm · °C
Lã	0,000086 cal/s · cm · °C
Ar seco	0,000061 cal/s · cm · °C

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 38** Quantas calorias são transmitidas por metro quadrado de um cobertor de 2,5 cm de espessura, durante uma hora, estando a pele a 33 °C e o ambiente a 0 °C? O coeficiente de condutibilidade térmica do cobertor é 0,00008 cal/s · cm · °C.

Solução:



Temos: $K = 0,00008 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot \text{°C}$; $A = 1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$; $\theta_2 - \theta_1 = 33 \text{ °C}$; $e = 2,5 \text{ cm}$
Admitindo ser estacionário o regime de condução, o fluxo de calor Φ vale:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e} = \frac{0,00008 \cdot 10^4 \cdot 33}{2,5} \Rightarrow \Phi = 10,56 \text{ cal/s}$$

De $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$, vem: $Q = \Phi \cdot \Delta t$

Mas: $\Delta t = 1 \text{ h} = 3.600 \text{ s}$

Portanto: $Q = 10,56 \cdot 3.600 \Rightarrow Q = 38.016 \text{ cal}$

Resposta: 38.016 cal

* **FOURIER**, Jean Baptiste Joseph (1768-1830), físico e matemático francês, viveu na época de Napoleão, para quem trabalhou na França e no Egito. Ao estudar a propagação de calor em corpos sólidos, desenvolveu um recurso matemático importante (as séries de Fourier), que facilita a descrição de funções complicadas.

R. 39 Uma barra de alumínio ($K = 0,5 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$) está em contato, numa extremidade, com gelo em fusão e, na outra, com vapor de água em ebulição sob pressão normal. Seu comprimento é 25 cm, e a seção transversal tem 5 cm^2 de área. Sendo a barra isolada lateralmente e dados os calores latentes de fusão do gelo e de vaporização da água ($L_f = 80 \text{ cal/g}$; $L_v = 540 \text{ cal/g}$), determine:

- a) a massa do gelo que se funde em meia hora;
- b) a massa de vapor que se condensa no mesmo tempo;
- c) a temperatura numa seção da barra a 5 cm da extremidade fria.

Solução:

Dados: $e = 25 \text{ cm}$; $A = 5 \text{ cm}^2$; $K = 0,5 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$

O fluxo de calor que atravessa a barra é igual a:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e} = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot (100 - 0)}{25} \Rightarrow \Phi = 10 \text{ cal/s}$$

Em meia hora, isto é, em $\Delta t = 1.800 \text{ s}$, a quantidade de calor recebida pelo gelo e perdida pelo vapor será:

$$Q = \Phi \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 10 \cdot 1.800 \Rightarrow Q = 18.000 \text{ cal}$$

- Recebendo essa quantidade de calor, o gelo sofre fusão. A massa que se funde será dada por:

$$Q = m \cdot L_f \Rightarrow m = \frac{Q}{L_f}$$

Como $L_f = 80 \text{ cal/g}$, vem:

$$m = \frac{18.000}{80} \Rightarrow m = 225 \text{ g}$$

- Perdendo essa quantidade de calor ($Q' = -18.000 \text{ cal}$) e sendo o calor latente de condensação do vapor $L_c = -540 \text{ cal/g}$, a massa de vapor que se condensa será dada por:

$$Q' = m' \cdot L_c \Rightarrow m' = \frac{Q'}{L_c} \Rightarrow m' = \frac{-18.000}{-540} \Rightarrow m' \approx 33,3 \text{ g}$$

- Em relação à extremidade quente:

$$e = 25 - 5 \Rightarrow e = 20 \text{ cm}$$

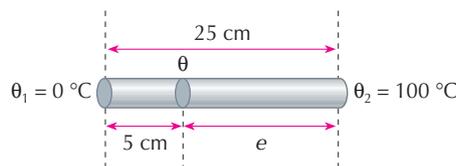
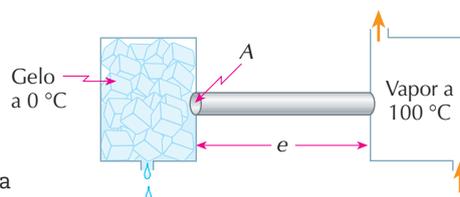
Sabe-se ainda que:

$$\Phi = 10 \text{ cal/s}; A = 5 \text{ cm}^2; K = 0,5 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$$

Na fórmula do fluxo de calor:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta)}{e} \Rightarrow 10 = \frac{0,5 \cdot 5 \cdot (100 - \theta)}{20} \Rightarrow \theta = 20 ^\circ\text{C}$$

Respostas: a) 225 g; b) $\approx 33,3 \text{ g}$; c) $20 ^\circ\text{C}$



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 123 Uma placa é atravessada por uma quantidade de calor igual a $3,0 \cdot 10^3 \text{ cal}$ em um intervalo de tempo de 5 minutos. Determine o fluxo de calor através dessa placa expressa em cal/s e em watt. Considere $1 \text{ cal} = 4 \text{ J}$.

P. 124 (IME-RJ) Um vidro plano, com coeficiente de condutibilidade térmica $0,00183 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$, tem uma área de 1.000 cm^2 e espessura de $3,66 \text{ mm}$. Sendo o fluxo de calor por condução através do vidro de 2.000 cal/s , calcule a diferença de temperatura entre suas faces.

P. 125 Uma das extremidades de uma barra de cobre, com 100 cm de comprimento e 5 cm^2 de seção transversal, está situada num banho de vapor-d'água sob pressão normal, e a outra extremidade, numa mistura de gelo fundente e água. Despreze as perdas de calor pela superfície lateral da barra. Sendo $0,92 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$ o coeficiente de condutibilidade térmica do cobre, determine:

- o fluxo de calor através da barra;
- a temperatura numa seção da barra situada a 20 cm da extremidade fria.



P. 126 Um recipiente consta de duas partes separadas por uma placa de zinco ($K = 0,3 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$) com 10 mm de espessura, 20 cm de altura e 40 cm de largura. Num dos compartimentos há gelo a 0°C e, através do outro, passa continuamente vapor de água a 100°C . Sendo 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo, determine a massa de gelo que se derrete em cada minuto.

P. 127 Uma barra de prata tem seção de 1 cm^2 e 50 cm de comprimento. Uma de suas extremidades está em contato com água fervendo, sob pressão normal, e a outra é envolvida por uma “camisa” refrigerada por água corrente, que entra a 10°C na camisa. Sendo o coeficiente de condutibilidade térmica da prata $1,00 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ e supondo que em 6 min passem 200 g de água pela camisa, calcule o aumento de temperatura experimentado por esse líquido.

2 Aplicações da condução térmica

O isolamento térmico é uma importante aplicação relacionada com a condução. Assim, utilizam-se materiais isolantes térmicos para minimizar a transferência de calor entre corpos a diferentes temperaturas. É o que acontece nas geladeiras de isopor, nos agasalhos feitos de material isolante, nas paredes de fogões e refrigeradores, isolados do exterior por materiais como lã de vidro e poliuretano, e nos cabos de panelas.



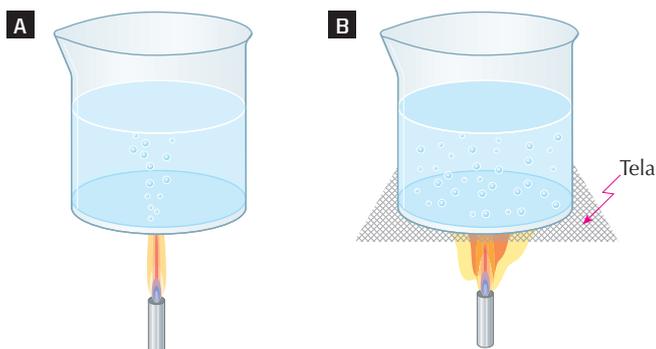
▶ A panela deve ter cabo isolante para possibilitar seu manuseio pelo cozinheiro.



▶ As caixas de isopor são largamente utilizadas para manter a temperatura dos objetos em seu interior.

Outra aplicação interessante do fenômeno da condução térmica é o uso de telas metálicas. Sabemos que, colocando-se um recipiente de vidro comum diretamente numa chama (fig. 7A), ele se rompe, pois a região diretamente aquecida se dilata mais que as regiões vizinhas. No entanto, interpondo-se uma tela metálica entre a chama e o recipiente, a ruptura não acontece (fig. 7B). Sendo boa condutora, a tela transmite rapidamente o calor para todos os pontos de sua própria extensão, garantindo um aquecimento uniforme para o recipiente.

Note, na foto abaixo, que a chama não ultrapassa a tela, em virtude de o calor se distribuir em toda a sua extensão. Assim, os gases não queimam na região logo acima da tela, pois ali a temperatura não alcança valores suficientemente elevados.



▶ Figura 7. A tela metálica distribui uniformemente o calor pela base do recipiente.



▶ A tela retém a chama.

No mesmo princípio se baseia a lâmpada de segurança dos mineiros ou lâmpada de Davy, esquematizada na **figura 8**, na qual uma pequena chama fica envolvida por uma tela metálica. Nas minas de carvão, essa lâmpada é usada para detectar a presença do explosivo gás **grisu** (metano). O contato desse gás com a chama da lâmpada produz uma pequena explosão, que apaga a chama. O calor liberado na queima não faz explodir o restante do gás grisu, pois esse calor se distribui pela extensão da tela. A pequena explosão e o fato de a chama se apagar são sinais de alerta.

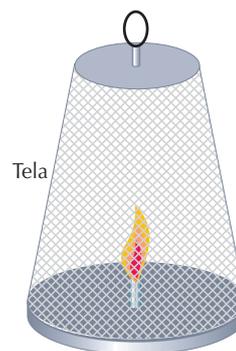


Figura 8. Lâmpada de Davy.

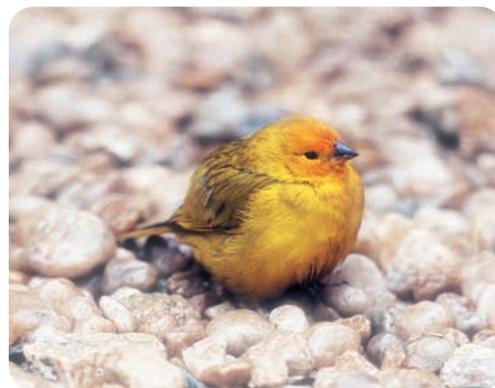
A condução do calor no dia a dia

A preocupação com a condução do calor está presente em várias situações práticas:

1. Os esquimós fazem suas casas, os iglus, com blocos de neve compactada que é, assim como o gelo, um excelente isolante térmico, mantendo o ambiente interno mais quente que o externo.
2. As roupas de lã dos beduínos do deserto isolam seu corpo, de modo a minimizar as trocas de calor do ambiente para o corpo, durante o dia, e do corpo para o ambiente, à noite.
3. Periodicamente, nas geladeiras mais antigas, o gelo que se forma sobre o congelador deve ser removido para não prejudicar as trocas de calor com o interior da geladeira.
4. No inverno, os pássaros costumam eriçar suas penas para acumular ar entre elas. Sendo isolante térmico, o ar diminui as perdas de calor para o ambiente.



Um esquimó construindo seu iglu.



Ave com penas eriçadas.



Beduíno coberto com roupas de lã em um deserto.

Convecção térmica

Objetivos

► Compreender como ocorre o processo de convecção térmica.

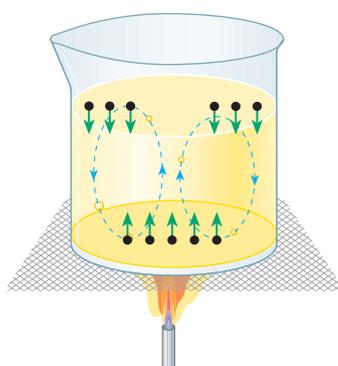
► Reconhecer a ocorrência e as consequências da convecção térmica.

Termos e conceitos

- correntes de convecção
- brisa marítima
- brisa terrestre
- inversão térmica

A convecção consiste no transporte de energia térmica de uma região para outra por meio do **transporte de matéria**, o que só pode ocorrer nos fluidos (líquidos e gases).

A movimentação das diferentes partes do fluido ocorre pela diferença de densidade que surge em virtude do seu aquecimento ou resfriamento. Na **figura 9** está representado um líquido sendo aquecido em sua parte inferior. As porções mais quentes das regiões inferiores, tendo sua densidade diminuída, sobem. As porções mais frias da região superior, tendo maior densidade, descem. Colocando-se serragem no líquido, é possível visualizar as correntes líquidas ascendentes quentes e descendentes frias. Essas correntes líquidas são denominadas **correntes de convecção**.



◀ **Figura 9.** Correntes de convecção num líquido em aquecimento.

Citamos, a seguir, algumas aplicações e consequências da convecção térmica.

- Na retirada de gases pelas chaminés, os gases aquecidos, resultantes da combustão, têm densidade diminuída e sobem, sendo eliminados. Ao redor da chama, cria-se uma região de baixa pressão que “aspira” o ar externo, mantendo a combustão.
- Devido a diferenças de temperatura em diferentes pontos da atmosfera, estabelecem-se correntes de convecção ascendentes, de ar quente, e descendentes, de ar frio. Planadores, asas-delta e outros veículos não motorizados movimentam-se no ar graças a essas correntes. O veículo somente ganha altitude quando alcança uma corrente quente ascendente, pois em voo planado está sempre descendo.



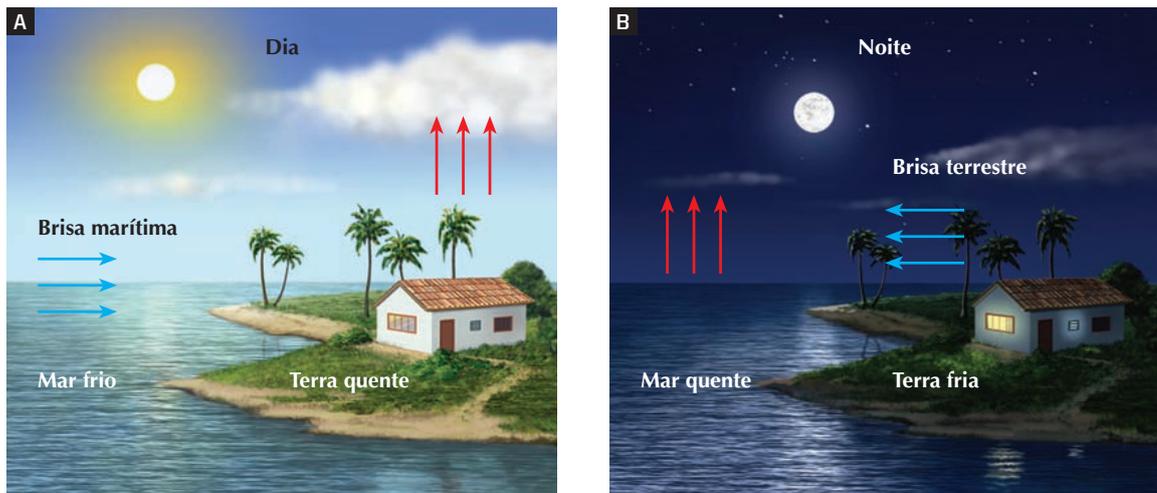
Para permitir a convecção térmica, o congelador da geladeira deve estar na parte superior (1), mas o aquecedor de um ambiente deve ser colocado no solo (2). ▶



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *O gelo que não derrete*

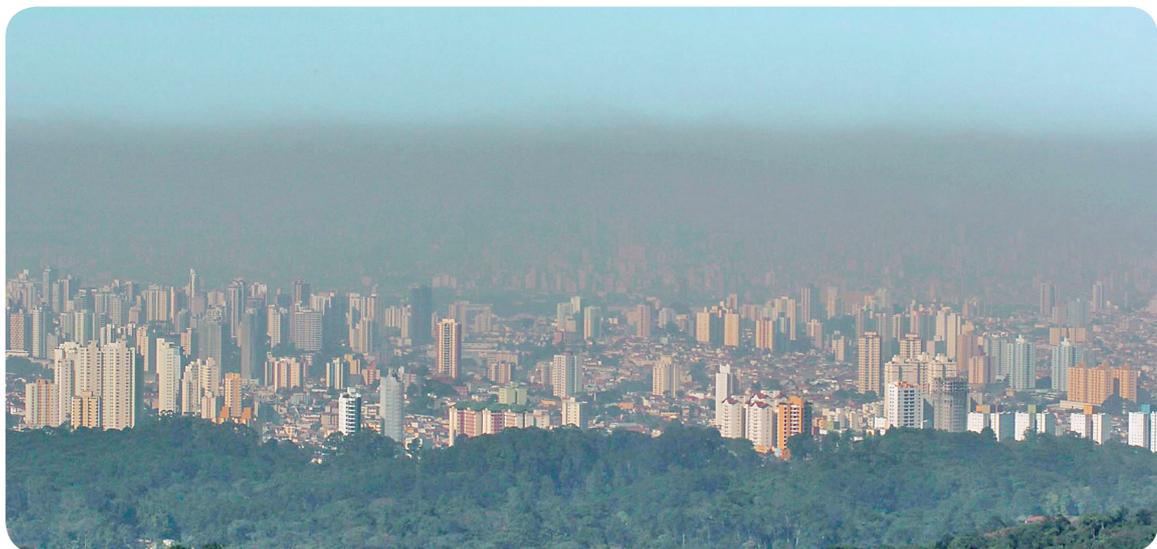


- Nos radiadores de automóveis, a água quente aquecida pelo motor, sendo menos densa, sobe e a água mais fria da parte superior desce. Para melhor eficiência, a convecção pode ser forçada por uma bomba-d'água.
- Quando um ambiente é resfriado, esse resfriamento é feito a partir da região superior, porque o fluido frio tende a descer. Assim: o congelador das geladeiras de uma porta só é colocado na parte superior; o ar-condicionado de uma sala de cinema é localizado no teto; ao resfriar-se um barril de chope, o gelo é colocado sobre o barril.
- A água, tendo alto calor específico, sofre variações de temperatura relativamente pequenas. Desse modo, numa região litorânea, a terra se aquece mais do que o mar durante o dia. O ar aquecido, em contato com a terra, sobe e produz uma região de baixa pressão, aspirando o ar que está sobre o mar. Sopra a brisa marítima (fig. 10A). À noite, ao perder calor, a terra se resfria mais do que o mar. O processo se inverte e sopra a brisa terrestre (fig. 10B).



▶ **Figura 10.** Durante o dia, sopra a brisa marítima e, à noite, sopra a brisa terrestre.

Nas grandes cidades, a convecção é um fenômeno muito importante para a dispersão dos poluentes atmosféricos. Estando os gases eliminados pelos veículos automotores e pelas indústrias mais quentes que o ar das camadas superiores, eles sobem e se diluem na atmosfera. No inverno, entretanto, é comum o ar poluído próximo ao solo estar mais frio que o ar puro das regiões mais elevadas. Desse modo, deixa de ocorrer a convecção, aumentando a concentração dos poluentes no ar que a população respira, com graves consequências, sobretudo para crianças e pessoas idosas ou doentes. Essa ocorrência recebe o nome de **inversão térmica** e pode ser agravada na ausência de ventos e de chuva.



▶ A cidade de São Paulo, em uma manhã de inversão térmica, vista da Serra da Cantareira.

» **Objetivos**

- ▶ Compreender como ocorre o processo de irradiação.
- ▶ Conceituar absorvidade, refletividade e transmissividade.
- ▶ Enunciar a lei dos intercâmbios.
- ▶ Conceituar corpo negro e poder emissivo de um corpo.
- ▶ Enunciar e aplicar a lei de Stefan-Boltzman e a lei de Kirchhoff.
- ▶ Reconhecer a ocorrência da irradiação térmica em fenômenos cotidianos.

» **Termos e conceitos**

- espelho ideal
- emissividade
- efeito estufa
- termografia

A transmissão de energia por meio de ondas eletromagnéticas (ondas de rádio, luz visível e raios ultravioleta, entre outras) é denominada **irradiação** ou **radiação**. Quando essas ondas são os raios infravermelhos, falamos em **irradiação térmica**.

Ao contrário da condução térmica e da convecção térmica, a irradiação ocorre sem a necessidade de um meio material: o transporte é exclusivamente de energia, sob a forma de ondas.

Por exemplo, quando colocamos a mão embaixo de uma lâmpada acesa, sem tocá-la, temos a sensação de calor. Como o ar é mau condutor térmico, praticamente não ocorre condução. Também não há convecção porque o ar quente sobe. Então, o calor que nos atinge só pode ser originado de ondas que se propagam da lâmpada para nossa mão. Outro exemplo é o caso da energia que recebemos do Sol, que só pode nos atingir por irradiação, posto que no vácuo não existe meio material.

Quando a energia radiante incide na superfície de um corpo, ela é parcialmente absorvida, parcialmente refletida e parcialmente transmitida através do corpo. A parcela absorvida aumenta a energia de agitação das moléculas constituintes do corpo (energia térmica). Na **figura 11**, da quantidade total de energia Q_i incidente, é absorvida a parcela Q_a , reflete-se a parcela Q_r e é transmitida a parcela Q_t , de modo que:

$$Q_i = Q_a + Q_r + Q_t$$

Para avaliar a proporção da energia incidente que sofre os fenômenos de absorção, reflexão e transmissão, definimos as seguintes grandezas adimensionais:

Absorvidade

$$a = \frac{Q_a}{Q_i}$$

Refletividade

$$r = \frac{Q_r}{Q_i}$$

Transmissividade

$$t = \frac{Q_t}{Q_i}$$

Somando as três grandezas, obtemos:

$$a + r + t = \frac{Q_a}{Q_i} + \frac{Q_r}{Q_i} + \frac{Q_t}{Q_i} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a + r + t = \frac{Q_a + Q_r + Q_t}{Q_i} = \frac{Q_i}{Q_i} \Rightarrow a + r + t = 1$$

Assim, por exemplo, um corpo ter absorvidade $a = 0,8$ significa que 80% da energia nele incidente foi absorvida. Os restantes 20% da energia total devem se dividir entre reflexão e transmissão.

Quando não há transmissão de energia radiante através do corpo, a transmissividade é nula ($t = 0$). Nesse caso:

$$a + r = 1$$

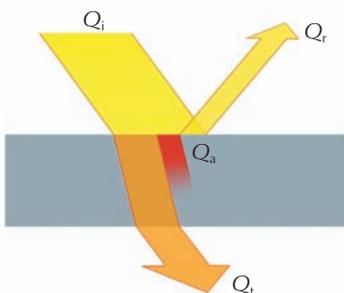


Figura 11.

As grandezas a , r e t podem ainda ser denominadas, respectivamente, **poder absorvedor**, **poder refletor** e **poder transmissor**.

Por definição, **corpo negro** é um corpo ideal que absorve toda a energia radiante nele incidente. Decorre daí que sua absorvidade é $a = 1$ (100%) e sua refletividade é nula ($r = 0$). O **espelho ideal** é um corpo que reflete totalmente a energia radiante que nele incide, tendo absorvidade nula ($a = 0$) e refletividade $r = 1$ (100%).

Corpo negro $a = 1$ $r = 0$

Espelho ideal $a = 0$ $r = 1$

Quando vários corpos a diferentes temperaturas são colocados num recinto termicamente isolado do exterior, ao fim de algum tempo todos estarão à mesma temperatura. No entanto, todos os corpos **continuam a irradiar energia**. Estabelece-se um equilíbrio dinâmico que pode ser expresso na forma da **lei dos intercâmbios**, enunciada, em 1792, pelo físico suíço Pierre Prévost*:

Todos os objetos estão irradiando energia continuamente. No equilíbrio térmico, a potência irradiada ou emitida por um objeto é igual à potência que ele absorve, na forma de radiação, dos objetos vizinhos.

Está claro que, em um ambiente isolado, se houver um corpo polido e um corpo escuro, o corpo polido absorverá pouca energia, emitindo portanto pouca energia, pois a maior parte é refletida. O corpo escuro, por sua vez, absorverá grande quantidade de energia e, em consequência, emitirá também grande quantidade de energia. E o equilíbrio térmico entre eles será mantido.

Dessa forma, todo corpo bom absorvedor é bom emissor e todo corpo bom refletor é mau emissor. O **corpo negro**, sendo o absorvedor ideal, é também o **emissor ideal** ou **perfeito**.

Na prática há corpos que apresentam absorvidades quase unitárias, como a fuligem ($a = 0,94$), que é excelente absorvedora e excelente emissora. Outros apresentam absorvidades quase nulas, sendo maus absorvedores e maus emissores, como a prata polida ($a = 0,02$).

De modo geral, os corpos escuros apresentam absorvidade elevada e refletividade baixa, sendo bons absorvedores e emissores. Ao contrário, os corpos claros e polidos são maus absorvedores e emissores, pois possuem baixa absorvidade e elevada refletividade.

Nas regiões de clima muito quente, as roupas devem ser claras, a fim de refletir a energia incidente. É o que ocorre em certas regiões do deserto onde os beduínos usam largas túnicas claras. Porém, em outras regiões, as túnicas usadas são negras. Mas as roupas escuras não aquecem mais que as roupas claras? De fato, elas atingem uma temperatura maior (cerca de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$); entretanto, o maior aquecimento provoca, em relação à túnica branca, maior corrente de convecção do ar, sob a roupa do beduíno. O ar externo entra pela abertura inferior da túnica e sai pela parte superior, favorecendo a evaporação do suor, ajudando o organismo a regular a temperatura.



🔗 O carvão em brasa emite radiação luminosa como consequência de sua alta temperatura.

* **PRÉVOST**, Pierre (1751-1839), físico e filósofo suíço. Na Física, além de seus estudos referentes ao calor, trabalhou questões ligadas ao magnetismo.

Radiômetro de Crookes

O dispositivo denominado radiômetro de Crookes*, esquematizado na figura ao lado, é constituído de uma série de palhetas, polidas de um lado e enegrecidas do outro, colocadas numa ampola com gás rarefeito. Quando incide energia radiante no sistema, as palhetas giram no sentido indicado, porque a face enegrecida, absorvendo mais energia, aquece mais o gás ao redor. As moléculas, com maior agitação do lado enegrecido, impulsionam a palheta.

Radiômetro de Crookes. ▶



1 Lei de Stefan-Boltzmann. Lei de Kirchhoff

Poder emissivo (E) de um corpo é a potência irradiada (emitida) por unidade de área, sendo expressa por:

$$E = \frac{P}{A} \quad \text{Unidades usuais: W/m}^2; \text{ cal/s} \cdot \text{cm}^2$$

O poder emissivo de um corpo depende da sua natureza e da temperatura em que se encontra. Para cada temperatura, o maior poder emissivo é o do corpo negro, sendo seu valor estabelecido pela **lei de Stefan**-Boltzmann*****:

O poder emissivo do corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta.

$$E_{\text{CN}} = \sigma \cdot T^4$$

A constante de proporcionalidade σ (constante de Stefan-Boltzmann) vale, em unidades do Sistema Internacional:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Assim, se tivermos um corpo negro a 1.000 K, seu poder emissivo será:

$$E_{\text{CN}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1.000)^4 \Rightarrow E_{\text{CN}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{12} \Rightarrow E_{\text{CN}} = 5,67 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$$

É comum compararmos o poder emissivo E de um corpo qualquer com o do corpo negro E_{CN} , por meio de uma grandeza denominada **emissividade** (e):

$$e = \frac{E}{E_{\text{CN}}}$$

Evidentemente, o corpo negro apresenta emissividade unitária, ou seja:

$$e_{\text{CN}} = 1$$

Para um corpo qualquer, a lei de Stefan-Boltzmann pode ser escrita algebricamente desta maneira:

$$E = e \cdot \sigma \cdot T^4$$

- * **CROOKES**, William (1832-1919), físico e químico inglês, foi sagrado cavaleiro em 1897. Notabilizou-se pelo estudo das descargas elétricas em gases rarefeitos.
- ** **STEFAN**, Josef (1835-1893), físico austríaco, propôs, em 1879, de modo incompleto, a lei que leva seu nome. Seus trabalhos foram completados por seu discípulo Ludwig Boltzmann.
- *** **BOLTZMANN**, Ludwig (1844-1906), notável físico austríaco, foi um dos criadores da teoria cinética dos gases. São importantes ainda seus trabalhos em Termodinâmica.



Vimos que o corpo negro tem absorvidade $\alpha_{\text{CN}} = 1$ e emissividade $e_{\text{CN}} = 1$ ($\alpha_{\text{CN}} = e_{\text{CN}}$). Para um corpo qualquer, Kirchhoff* estabeleceu que: $e = \alpha$, isto é:

Numa mesma temperatura, a emissividade e a absorvidade de um corpo são iguais.

Esse enunciado, conhecido como **lei de Kirchhoff**, vem confirmar o que fora dito anteriormente: um bom absorvedor de calor é também um bom emissor.

Potência irradiada

A **potência irradiada** P por um corpo de emissividade e , à temperatura T e cuja área exposta ao ambiente é A , em face das fórmulas apresentadas, pode ser expressa por:

$$P = E \cdot A \Rightarrow P = e \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A$$

Se o corpo estiver em equilíbrio térmico com o ambiente, sua temperatura é constante e, portanto, ele estará emitindo e absorvendo energia com a mesma rapidez. Entretanto, se as temperaturas dele e do ambiente forem diferentes, haverá um fluxo líquido de energia. Assim, se o corpo estiver a uma temperatura T e o ambiente a uma temperatura T_A , a **potência líquida** P_L de ganho ou perda de energia será dada por:

$$P_L = e \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T^4)$$

Observe que a potência líquida P_L será positiva caso o ambiente esteja mais quente que o corpo ($T_A > T$), significando que o corpo está recebendo energia, isto é, absorve mais do que emite. A potência líquida P_L será negativa se o ambiente estiver mais frio que o corpo ($T_A < T$), o que significa que o corpo perde energia, isto é, emite mais do que absorve.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 40 Considere que a pele de uma pessoa tenha emissividade de 0,70 e sua área exposta seja de 0,27 m². Supondo que a temperatura da pele seja 37 °C e que o ambiente esteja a 27 °C, calcule:

- o poder emissivo da pele;
- a potência líquida que a pele irradia para o ambiente;
- o módulo da quantidade de energia líquida irradiada pela pele no intervalo de uma hora.

(Dado: constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Solução:

- O poder emissivo de um corpo é dado pela fórmula $E = e \cdot \sigma \cdot T^4$. Nessa fórmula, a temperatura deve ser expressa em kelvins:

$$T = \theta + 273 = 37 + 273 \Rightarrow T = 310 \text{ K}$$

Com esse valor, obtemos:

$$E = 0,70 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (310)^4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E \approx 366,5 \text{ W/m}^2$$

- A temperatura ambiente vale:

$$T_A = \theta + 273 = 27 + 273 \Rightarrow T_A = 300 \text{ K}$$

Aplicando a fórmula da potência líquida irradiada pela pele, teremos:

$$P_L = e \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T^4) = 0,70 \cdot 0,27 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(300)^4 - (310)^4] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_L \approx -12,1 \text{ W}$$

O sinal negativo indica que a pele está perdendo calor (aproximadamente 12,1 joules por segundo), o que é lógico, uma vez que sua temperatura é maior que a do ambiente.

- No intervalo de tempo $\Delta t = 1 \text{ h} = 3.600 \text{ s}$, a energia líquida perdida tem módulo dado por:

$$Q = |P_L| \cdot \Delta t \approx 12,1 \cdot 3.600 \Rightarrow Q \approx 4,36 \cdot 10^4 \text{ J}$$

- Respostas:** a) $\approx 366,5 \text{ W/m}^2$; b) $\approx -12,1 \text{ W}$; c) $\approx 4,36 \cdot 10^4 \text{ J}$

* **KIRCHHOFF**, Gustav Robert (1824-1887), físico alemão que apresentou importantes contribuições para a Física Experimental. Descobriu os princípios fundamentais da análise espectrográfica, tendo enunciado as leis da radiação e estabelecido o conceito de corpo negro.



EXERCÍCIO PROPOSTO

- P. 128** Um objeto de emissividade 0,40 encontra-se à temperatura de 17°C . A temperatura ambiente é de 37°C . Sendo $0,50\text{ m}^2$ sua área exposta, determine:
- seu poder emissivo;
 - a potência líquida absorvida;
 - a quantidade de energia líquida absorvida no intervalo de 10 minutos.
- (Dado: constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

2 Aplicações e efeito da irradiação

Estufas

Uma **estufa de plantas** (fig. 12) tem paredes e teto de vidro transparente à energia radiante proveniente do Sol. O chão da estufa normalmente é pintado de preto ou de uma cor escura. A energia radiante que penetra através do vidro é absorvida pelo fundo escuro e demais objetos do interior da estufa, sendo a seguir novamente irradiada. Entretanto, essa reemissão de energia se dá na forma de raios infravermelhos de baixa frequência, que o vidro não deixa passar. Em consequência, o interior da estufa permanece sempre mais quente que o exterior. A perda de calor para o ambiente externo é mínima, o que é especialmente importante durante o período em que não há ação direta do Sol.



◀ **Figura 12.** Estufa: o vidro é transparente à energia radiante incidente e opaco às ondas de calor reemitidas.

No mesmo princípio da estufa é baseado o **coletor de energia solar**, utilizado no aquecimento central de água em residências. O coletor consta basicamente de um recinto de paredes de vidro com fundo escuro. No seu interior está o encanamento que conduz a água a ser aquecida.



▶ Estufa de plantas



▶ Coletor solar



O efeito estufa

A presença do dióxido de carbono (CO_2), o mais abundante, do óxido nitroso (N_2O), do metano (CH_4), de água (sobretudo na forma de vapor) e de outros gases, na atmosfera, determina o **efeito estufa** (termo criado pelo químico sueco Svante Arrhenius, no século XIX). Ele constitui uma condição natural de nosso planeta, que garante à Terra uma temperatura média adequada à vida.

O princípio é o mesmo das estufas de plantas. A Terra recebe, durante o dia, a energia radiante do Sol e, durante a noite, irradia energia para o espaço. Entretanto, as substâncias citadas impedem que a superfície terrestre perca, durante a noite, uma quantidade exagerada de calor para o espaço, absorvendo e reemitindo boa parte dessa radiação para a Terra. A **figura 13** mostra esquematicamente como ocorre o efeito estufa na atmosfera.

Caso ele não ocorresse, a temperatura média do nosso planeta seria de -18°C (dezoito graus abaixo de zero!).

No decorrer do século 20 e no início do 21, tem ocorrido uma intensificação do efeito estufa, devido principalmente às indústrias e aos veículos automotores, que têm expelido para a atmosfera quantidades muito grandes de gases-estufa, isto é, as substâncias gasosas que determinam o efeito, principalmente o CO_2 . Em consequência, a temperatura média da Terra tende a aumentar, com graves consequências ambientais.

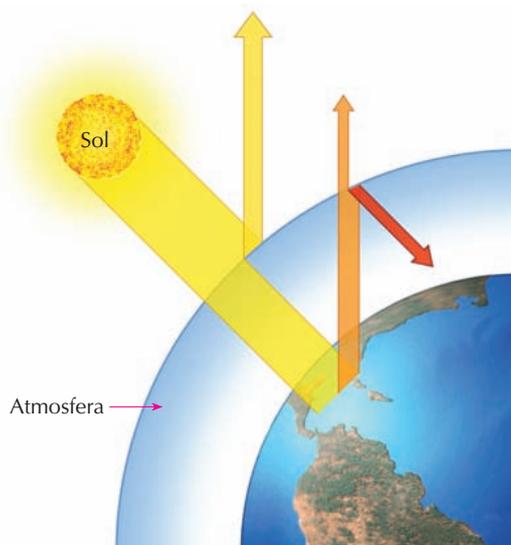


Figura 13. Esquema do efeito estufa



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
A Física em nosso Mundo: *Efeito estufa e aquecimento global*



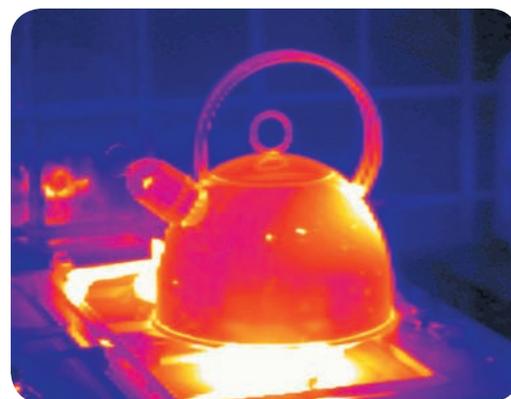
Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=22> (acesso em julho/2009), você encontra links para vários artigos e reportagens referentes ao efeito estufa e ao aquecimento global, numa edição especial de revista eletrônica de jornalismo científico *Com Ciência*.

Usos dos raios infravermelhos

Os raios infravermelhos, isto é, as ondas de calor, têm larga aplicação.

A lâmpada de infravermelho (lâmpada de filamento com filtro que absorve a maior parte da luz visível), usada em medicina, serve também para a secagem de tintas e vernizes e para o aquecimento de ambientes.

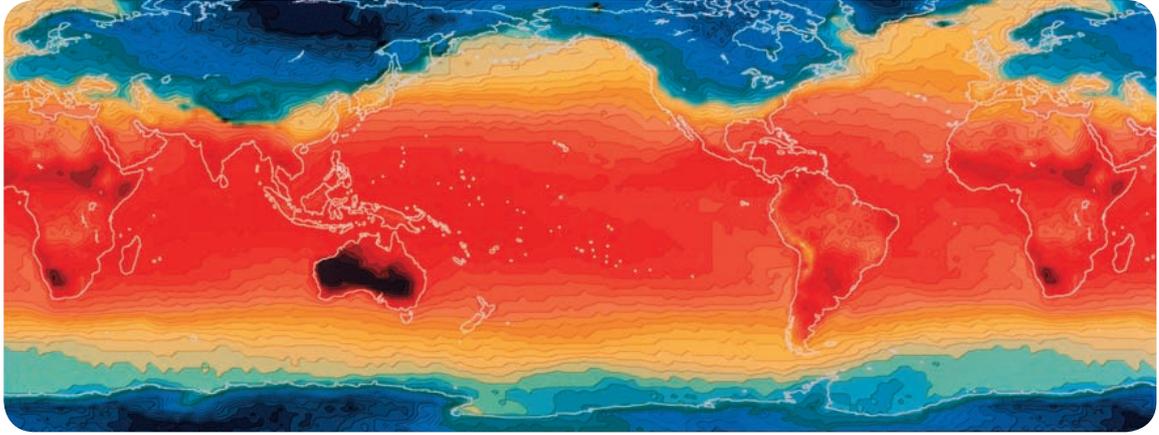
A **termografia**, técnica muito utilizada atualmente na medicina e na indústria, consiste na obtenção de imagens (termogramas) por meio de câmeras especiais (termovisores), que captam as radiações infravermelhas emitidas pelos objetos. A análise do termograma impresso (ou na tela de um computador, ou do próprio termovisor) possibilita identificar regiões de diferentes temperaturas em um objeto. Desse modo é possível diagnosticar, por exemplo, um processo tumoral, pois a temperatura das células cancerosas é diferente da apresentada pelas células normais do mesmo tecido.



Termografia de uma chaleira sobre o fogo.



Na meteorologia, satélites detectam as emissões de infravermelho da Terra, tornando possíveis previsões de temperaturas e condições climáticas. Certos mísseis “farejam” seu alvo pelas ondas de calor que este emite. Em lunetas especiais, os raios infravermelhos emitidos por um corpo são recebidos em um anteparo que os transforma em luz visível. Com esse aparelho é possível “enxergar” em completa escuridão. Existem películas fotográficas sensíveis aos raios infravermelhos, que possibilitam a tomada de fotos num ambiente totalmente escuro.



Termografia da superfície terrestre. A figura é obtida, por meio de satélite, a partir da radiação infravermelha emitida pela Terra.

A garrafa térmica



É um dispositivo feito para conservar, com alteração mínima de temperatura e por longo tempo, um líquido gelado ou quente. Na garrafa térmica são minimizadas as trocas de calor que ocorreriam pelos três processos de propagação.

A garrafa (figura 14) é feita de vidro (mau condutor) com paredes duplas, entre as quais é feito o vácuo. Assim, retirando-se moléculas desse espaço, minimiza-se a ocorrência de *condução*. A *convecção* é reduzida ao mínimo por meio da vedação da garrafa com uma tampa apropriada. As faces externa e interna da garrafa são espelhadas, a fim de minimizar a *irradiação*, tanto de dentro para fora como de fora para dentro.

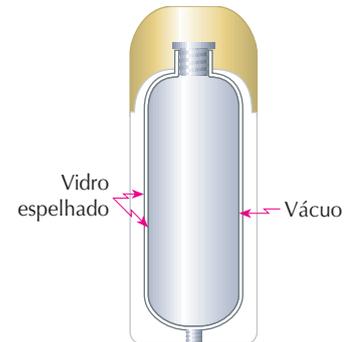


Figura 14. Garrafa térmica.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 129 (Olimpíada Brasileira de Física) Um galpão possui área $A = 300 \text{ m}^2$ de paredes laterais, laje, janelas e portas. O coeficiente de condutibilidade térmica média deste conjunto é $K = 0,50 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$; a espessura média é $x = 0,20 \text{ m}$. Num inverno, deseja-se manter constante, em 20°C , a diferença de temperatura $\Delta\theta$ do ar no interior e no exterior do galpão, durante o período de um mês. Em paredes sólidas, sabe-se que a quantidade de calor transmitida por segundo de uma face à face oposta é diretamente proporcional à área e à diferença de temperatura entre as faces, e inversamente proporcional à espessura. Essa quantidade de calor depende também da natureza do material que conduz o calor, ou

seja, do seu coeficiente de condutividade térmica. Matematicamente:

$$Q = \frac{K \cdot A \cdot \Delta\theta}{x}$$

- Qual é o custo mensal para manter constante a temperatura do ambiente interno por meio de lâmpadas acesas, considerando que 1 MWh de energia elétrica custa R\$ 120,00?
- Caso a temperatura interna seja mantida constante mediante um aquecedor a gás, qual será o volume mensal necessário para um gás com calor de combustão $C = 9.000 \text{ kcal/m}^3$ e 100% de rendimento do processo?

