

1 Do Sol ao aquecimento

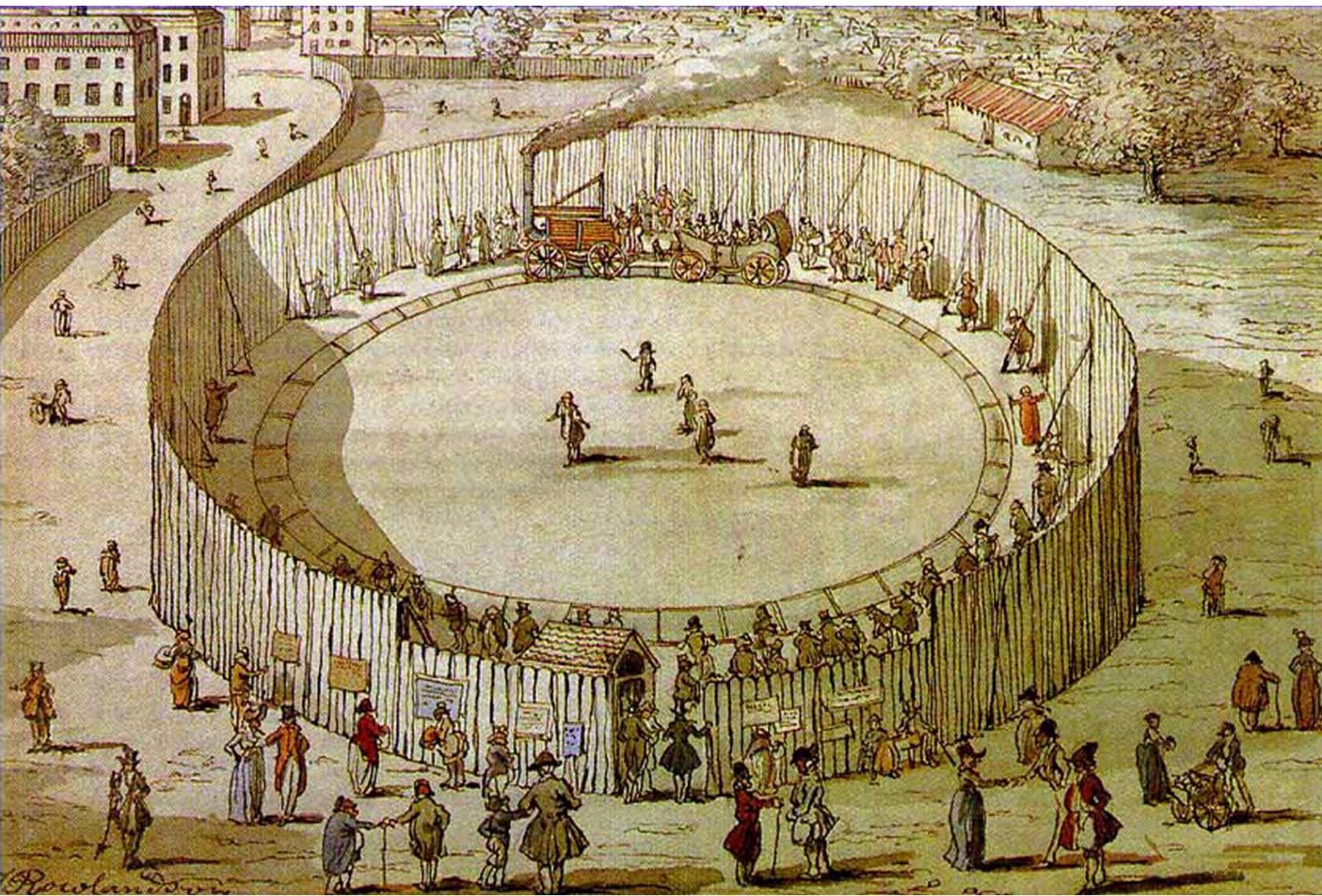


O Sol é, em última análise, a origem de toda a energia na Terra, desde os combustíveis fósseis até à energia do vento e à energia dos alimentos. A vida na Terra está dependente da energia no Sol e só é possível devido a um conjunto de factores, nomeadamente a composição da atmosfera terrestre.

Nos últimos três séculos, os avanços das Ciências Físicas e da Engenharia modificaram de tal modo a forma como a Humanidade vive que provocaram profundas alterações na atmosfera e no ambiente em geral. No século XXI, trezentos anos depois do início da Revolução Industrial, a humanidade está perante um dos maiores desafios de sempre: alargar a qualidade de vida para cada vez mais seres humanos e, ao mesmo tempo, reduzir e corrigir os impactes negativos na Terra.

O nascimento das sociedades modernas, baseadas na lei igual para todos e no reconhecimento dos direitos humanos, também se deve ao conhecimento científico e tecnológico. Foi esse conhecimento que permitiu o aumento da produção e o fim da pobreza em muitos países, facilitando a movimentação de pessoas, bens e ideias.

Na imagem em baixo, os primórdios do comboio: uma linha circular (*Catch-Me-Who-Can*) construída pelo engenheiro Richard Trevithick em Londres, 1808, apenas para demonstração e divertimento.



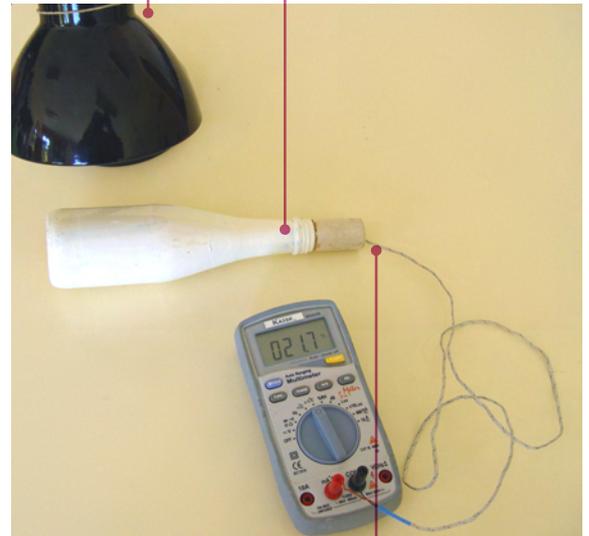
AL 1.1 – Absorção e emissão de radiação

**Porque é que as casas nas regiões mais quentes são pintadas de branco?
Porque se utilizam cores mais claras nas roupas de verão?
Porque é espelhada a superfície interna de uma garrafa-termo?**

- 1 Nesta actividade **compara-se o poder de absorção de energia de diversas superfícies** (brancas, pretas, espelhadas, baças ou brilhantes) de objectos semelhantes (garrafas pintadas ou latas pintadas). Em vez de latas ou garrafas, pode usar-se o chamado cubo de Leslie (cubo com faces de diversos tipos) mas, neste caso, há que esperar que o cubo arrefeça cada vez que é utilizada uma face...
- 2 **A energia é transferida para os objectos por radiação**, colocando-os directamente ao Sol ou iluminando-os com uma lâmpada de potência elevada (100 W).
- 3 **A temperatura no interior** do objecto que recebe a radiação pode ser medida com um termómetro adequado (por exemplo, um termómetro digital ou um sensor de temperatura ligado a um sistema de aquisição de dados). **Regista-se a evolução da temperatura** no interior de cada objecto, com uma taxa de aquisição adequada (por exemplo, de 30 s em 30 s) até estabilizar.
- 4 Qual é o **tipo de superfície do objecto que atinge temperatura mais elevada**? Qual é o tipo de superfície que **absorve maior quantidade** de radiação? E qual é o tipo de superfície que **reflece maior quantidade** de radiação?
- 5 Quando a temperatura estabiliza, continuando a radiação a atingir o objecto, *será que o objecto deixa de receber energia*? Discuta a questão...
- 6 Fazer um **relatório** breve que inclua: (1) a(s) questão(ões) investigada(s); (2) as ideias que enquadram o procedimento utilizado; (3) a descrição do procedimento e dos cuidados que se tiveram para evitar erros e diminuir a incerteza das medidas; (4) os resultados obtidos; (5) uma descrição breve que avalie a experiência e que inclua uma resposta adequada às questões que estiveram na origem da investigação.

lâmpada de 100 W

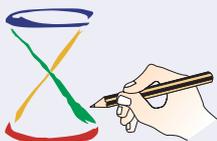
garrafa pintada de branco, com rolha



sensor de temperatura (colocado no interior da garrafa)

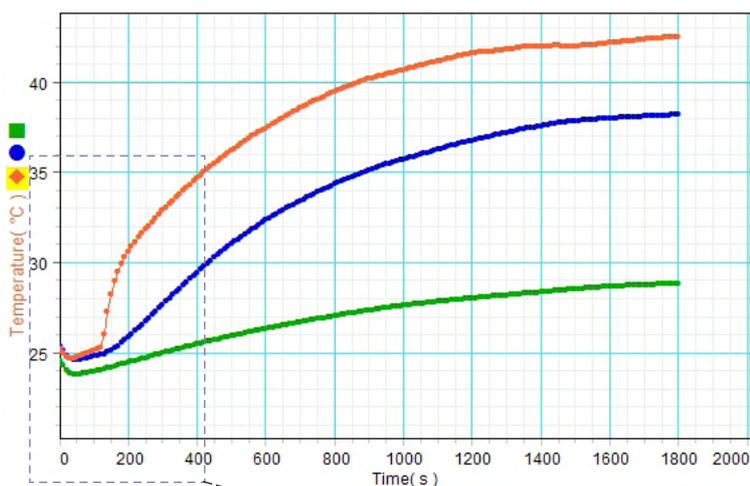


Um cubo de Leslie.



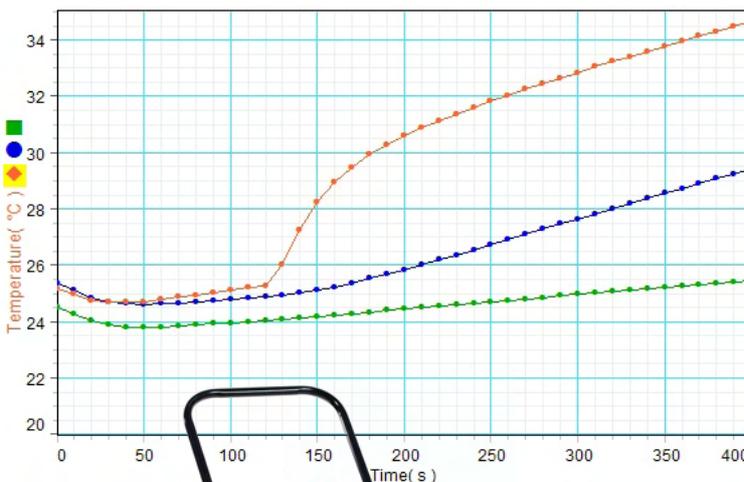
Os dados abaixo foram obtidos por um grupo de alunos utilizando um sistema computacional de aquisição de dados. Utilizaram uma lâmpada de 100 W e três garrafas, uma pintada de preto, outra coberta com folha de alumínio espelhada e outra garrafa sem pintura ou cobertura, transparente. O gráfico da direita “amplia” uma parte do gráfico da esquerda.

- 1 Durante quanto tempo registaram a temperatura no interior das garrafas?
- 2 Ligaram a lâmpada logo início da aquisição de dados? Fundamente a resposta.
- 3 De quanto em quanto tempo é que o sistema registou a temperatura?
- 4 Qual das curvas (vermelha, azul ou verde) deve corresponder à garrafa preta?
- 5 Quando a temperatura no interior da lâmpada estabiliza, deixa de haver trocas de energia com entre a garrafa e o exterior? Fundamente a resposta.
- 6 No início da aquisição da aquisição de dados observa-se uma pequena diminuição de temperatura. A que poderá ser devido esse facto? Como pode testar essa hipótese?



- 7 A variação de temperatura no interior das garrafas é mais rápida ou mais lenta no início do processo de aquecimento do que quando está quase a atingir a temperatura máxima? Fundamente a resposta.
- 8 Se se utilizar uma lâmpada de menor potência, que diferença se deve observar no gráfico? Porquê?

Casas no Alentejo. Porque será que são pintadas de branco?



Vasos de Dewar utilizados em laboratórios para armazenar gases liquefeitos a baixas temperaturas ou órgãos congelados.



AL 1.2 – Potência eléctrica fornecida por um painel fotovoltaico

Em que condições é máximo o rendimento de painéis fotovoltaicos? De que depende esse rendimento?

1 Um **painel fotovoltaico transforma radiação em energia da corrente eléctrica**. Iluminando um painel, obtém-se uma corrente, cuja intensidade pode ser facilmente medida, tal como a diferença de potencial eléctrico no receptor de energia do circuito.

2 Como **receptor**, pode utilizar-se um **reóstato** (resistor de resistência eléctrica variável, 0 ohms a 100 ohms, por exemplo).

3 A **potência eléctrica** P fornecida ao reóstato pode ser calculada conhecendo a intensidade da corrente, I , e a diferença de potencial eléctrico nas suas extremidades, V :

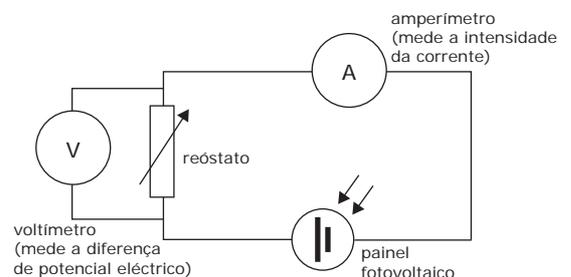
$$P = V I .$$

Fazendo variar a resistência do reóstato, variam I e V ... e varia a potência dissipada no reóstato.

4 A potência obtida no painel não depende apenas da radiação que atinge o painel. Depende, também, da resistência eléctrica do circuito. Assim, **variando a resistência eléctrica (no reóstato), pode investigar-se como varia a potência do painel**. Construindo uma **tabela** e um **gráfico da potência eléctrica em função da resistência eléctrica**, pode concluir-se em que condições é **máximo o rendimento** do painel (obter pelo menos uma dezena de pares de valores). A *lâmpada deve ser mantida sempre à mesma distância*. Porquê?

5 Sem iluminação directa da lâmpada, há corrente no circuito? Porquê? E que sucede à potência do painel se a incidência da radiação no painel for *obliqua*?

6 Fazer um **relatório** breve que inclua: (1) a(s) questão(ões) investigada(s); (2) as ideias que enquadram o procedimento utilizado; (3) a descrição do procedimento e dos cuidados que se tiveram para evitar erros e diminuir a incerteza das medidas; (4) os resultados obtidos; (5) uma descrição breve que avalie a experiência e que inclua uma resposta adequada às questões que estiveram na origem da investigação.

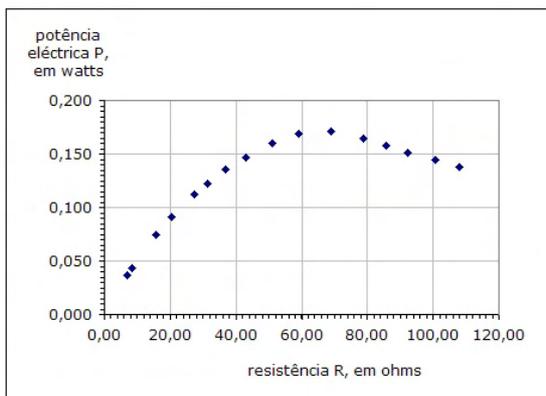




Os dados abaixo foram obtidos numa experiência com o material da foto da página ao lado.

- Qual é o papel do reóstato no circuito?
- Verifique o valor da resistência eléctrica no reóstato quando a diferença de potencial era 0,50 V.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3													
4													
5	AL 1.2 - Potência eléctrica fornecida por um painel fotovoltaico												
6	d.d.p. V	intensidade da corrente I		resistência do reóstato $R = V/I$	potência P								
7	V	mA	A	ohms	W								
8	0,50	72,4	0,0724	6,91	0,036								
9	0,61	71,4	0,0714	8,54	0,044								
10	1,08	68,6	0,0686	15,74	0,074								
11	1,37	66,7	0,0667	20,54	0,091								
12	1,75	63,9	0,0639	27,39	0,112								
13	1,96	62,5	0,0625	31,36	0,123								
14	2,24	60,6	0,0606	36,96	0,136								
15	2,51	58,5	0,0585	42,91	0,147								
16	2,85	56,0	0,0560	50,89	0,160								
17	3,16	53,4	0,0534	59,18	0,169								
18	3,43	49,8	0,0498	68,88	0,171								
19	3,60	45,8	0,0458	78,60	0,165								
20	3,68	42,9	0,0429	85,78	0,158								
21	3,74	40,5	0,0405	92,35	0,151								
22	3,81	37,8	0,0378	100,79	0,144								
23	3,85	35,7	0,0357	107,84	0,137								
24													



- Verifique o valor da potência eléctrica no reóstato quando a diferença de potencial era 0,50 V.
- Qual foi a potência máxima obtida no painel fotovoltaico?
- Qual era a resistência eléctrica do reóstato quando se atingiu a potência máxima?
- Que condições foram mantidas constantes ao longo de toda a experiência? Porquê?
- Qual era a potência do painel quando a resistência do reóstato era 100 ohms?
- O painel tem aproximadamente 6 cm por 8 cm. Qual é a área do painel em metros quadrados?
- Verifique que a potência do painel fotovoltaico é aproximadamente 30 watts por metro quadrado, quando a resistência do reóstato vale 100 ohms.
- Admita que a lâmpada da foto ao lado tem a potência de $100 \text{ W} = 0,100 \text{ kW}$ e que funciona 12 horas por dia. Qual é a energia que gasta num dia, em kWh?
- Verifique que o tamanho mínimo que deveria ter um painel do tipo do utilizado nesta experiência para alimentar uma bateria que carregasse durante o dia e alimentasse a lâmpada durante a noite deveria ser aproximadamente $3,3 \text{ m}^2$.
- Este valor é, na realidade, inferior ao necessário. Porquê?



AL 1.3 – Capacidade térmica mássica

Que quantidade de energia necessita a unidade de massa de um certo tipo de material para aumentar 1°C de temperatura?

Porque é que no Verão a areia da praia fica escaldante e a água do mar não?

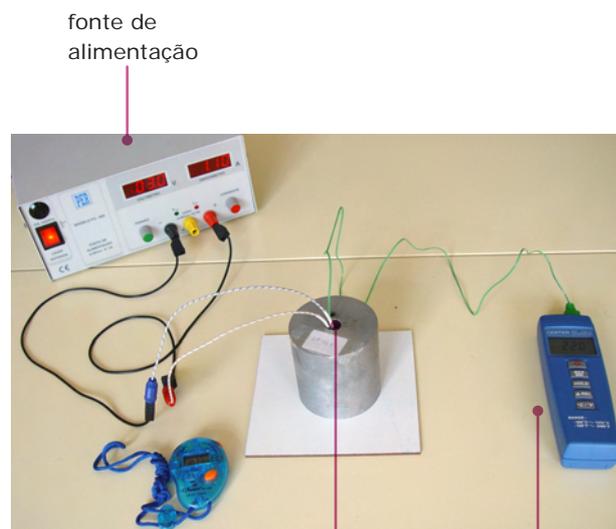
Porque é que os climas marítimos são mais amenos que os climas continentais?

- 1 Nesta actividade investiga-se qual é a energia necessária para que 1 kg de diversos materiais (alumínio, latão, etc.) aumente 1°C de temperatura, isto é, **determina-se a capacidade térmica mássica desses materiais**.
- 2 Os diversos materiais, em forma de cilindro, com uma cavidade, são **aquecidos através de um resistor colocado na cavidade**. Para melhorar o contacto térmico entre o resistor, o material e o termómetro, coloca-se um pouco de glicerina na cavidade.
- 3 O resistor deve ser *ligado apenas durante um intervalo de tempo limitado* (deste modo, diminuem-se as perdas de energia para o exterior). E, claro, não deve ser mantido ligado quando está fora das cavidades dos cilindros dos diversos materiais, para não se deteriorar (*cuidado com a elevada temperatura que o resistor pode atingir!*).
- 4 A **energia eléctrica** E fornecida ao resistor pode ser calculada conhecendo a intensidade da corrente, I , a diferença de potencial eléctrico nas suas extremidades, V , e o intervalo de tempo que demora a corrente a passar:

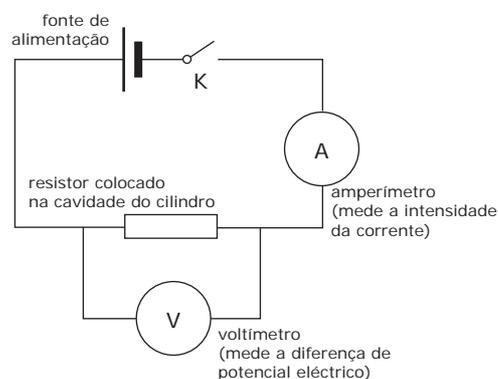
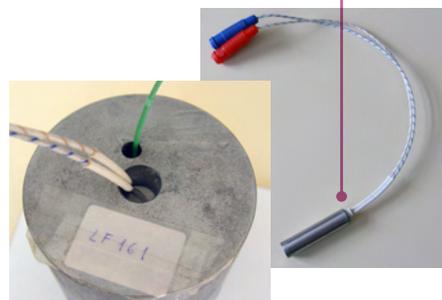
$$E = V I \Delta t.$$

É, pois, necessário medir I , V e Δt usando, respectivamente, um **amperímetro**, um **voltímetro** e um **cronómetro**.

- 5 A **energia recebida pelo cilindro**, sob a forma de **calor**, Q , é dada pela equação $Q = c m \Delta T$ onde c é a capacidade térmica do material do cilindro, m é a massa do cilindro e ΔT a variação de temperatura do cilindro. **Como se medem** as grandezas m e T ?



fonte de alimentação
resistor de aquecimento (envolvido em glicerina na cavidade)
termómetro digital



- 6 Admitindo que o calor Q recebido pelo cilindro é igual à energia E dissipada no resistor colocado na cavidade do cilindro é possível **calcular a capacidade térmica mássica** c do material do cilindro, desde que se conheça a massa m e a elevação de temperatura ΔT do cilindro...
- 7 **Compare** os valores da capacidade térmica mássica, obtidos nesta investigação, com os valores tabelados. A que podem ser devidas as diferenças?
- 8 Materiais diferentes têm diferente capacidade térmica mássica... Qual dos seguintes materiais, água do mar ou areia da praia, terá maior capacidade térmica mássica? Que implicações tem esse facto quando a areia e a água estão a receber energia na forma de radiação?
- 9 Fazer um **relatório** breve que inclua: (1) a(s) questão(ões) investigada(s); (2) as ideias que enquadram o procedimento utilizado; (3) a descrição do procedimento e dos cuidados que se tiveram para evitar erros e diminuir a incerteza das medidas; (4) os resultados obtidos; (5) uma descrição breve que avalie a experiência e que inclua uma resposta adequada às questões que estiveram na origem da investigação.



Capacidade térmica mássica c de diversos materiais, em $J/(kg \times K)$	
Chumbo	128
Ouro	129
Prata	234
Latão	380
Cobre	387
Aço	448
Granito	790
Areia	835
Vidro	840
Cimento	880
Mármore	880
Alumínio	897
Gelo	2090
Água líquida	4186



Os dados do quadro abaixo apresentam os resultados obtidos por um grupo de alunos nesta investigação, utilizando cilindros de alumínio, cobre, latão e aço.

- Confirme** o cálculo da **energia transferida** no resistor no aquecimento do cubo de **alumínio**.
- Admitindo que essa energia é totalmente transferida para o cilindro de alumínio pode escrever-se a equação seguinte: $1980 = c \times 1,000 \times 2,1$. **Fundamente** esta equação.
- Confirme** o valor da capacidade térmica mássica do alumínio obtido pelos alunos.
- Qual é a **diferença**, em **percentagem**, entre o valor obtido pelos alunos e o valor tabelado para a capacidade térmica mássica do **alumínio**? A que pode ser devida esta diferença?
- Dos valores obtidos pelos alunos, qual é o que apresenta **maior diferença**, em **percentagem**, face ao valor tabelado?

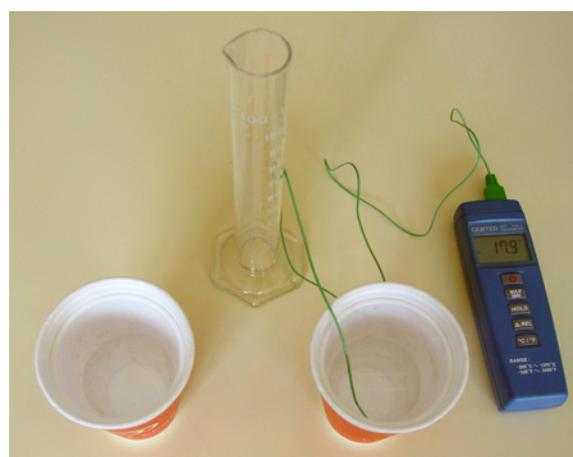
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	Atividade Laboratorial AL1.3 Capacidade térmica mássica								
2									
3									
4									
5									
6	material do cilindro	intensidade da corrente, I	diferença de potencial eléctrico, V	intervalo de tempo que demorou o aquecimento	energia transferida no resistor				
7		A	V	s	J				
8	alumínio	1,10	3,0	600	1980				
9	cobre	1,12	3,0	600	2016				
10	latão	1,10	3,4	600	2244				
11	aço	1,09	3,2	600	2093				
12									
13									
14									
15	material do cilindro	massa do cilindro, m	temperatura inicial do cilindro	temperatura final do cilindro	variação de temperatura do cilindro	capacidade térmica mássica do material do cilindro	valor tabelado para a capacidade térmica mássica do material do cilindro		
16		kg	°C	°C	°C	$J/(kg \text{ } ^\circ C)$	$J/(kg \text{ } ^\circ C)$		
17	alumínio	1,000	17,2	19,3	2,1	943	897		
18	cobre	1,000	17,4	22,3	4,9	411	387		
19	latão	1,000	17,1	22,8	5,7	394	380		
20	aço	1,000	17,2	21,7	4,5	465	448		
21									

AL 1.4 – Balanço energético num sistema termodinâmico

Para arrefecer a água de um copo, é mais eficaz adicionar água líquida a 0°C ou gelo? Porquê?



- Dispõe de:
 - um recipiente com **gelo** fragmentado em pequenos pedaços, misturado com água líquida;
 - 1 recipiente com **água** à temperatura ambiente;
 - 2 copos de plástico idênticos (se possível, 2 copos “duplos”, isto é, copos encaixados um no outro para melhorar o isolamento);
 - 1 termómetro;
 - uma proveta;
 - varetas;
 - uma espátula para manipular o gelo.
- A água à temperatura ambiente pode ser **arrefecida** adicionando **água fria** ou adicionando **gelo**...
- Se se quiser **comparar qual destes dois processos é mais eficaz**, *como se deve proceder?* Fará sentido, por exemplo, comparar a situação em que se adiciona um “grande” pedaço de gelo a uma “pequena” quantidade de água à temperatura ambiente com a situação em que se adiciona um “pequeno” pedaço de gelo a uma “grande” quantidade de água?
- Que **variáveis** é necessário **controlar** para obter dados que permitam responder fundamentadamente à questão colocada: “Para arrefecer a água de um copo, é mais eficaz adicionar água líquida a 0°C ou gelo”? Proceda de modo adequado, com o material de que dispõe, para dar uma resposta fundamentada à questão. Sugestão: esquematize o que tem de fazer.
- Como explicar teoricamente** a resposta obtida? Leia com atenção o texto da página seguinte para preparar o relatório desta investigação.
- Fazer um **relatório** breve que inclua: (1) a(s) questão(ões) investigada(s); (2) as ideias que enquadram o procedimento utilizado; (3) a descrição do procedimento e dos cuidados que se tiveram para evitar erros e diminuir a incerteza das medidas; (4) os resultados obtidos; (5) uma descrição breve que avalie a experiência e que inclua uma resposta adequada às questões que estiveram na origem da investigação.



Dois copos, inicialmente com igual quantidade de água à temperatura ambiente...
A um copo juntou-se água fria, a 0 °C, ao outro copo juntou-se gelo a 0 °C...



Fusão e calor de fusão do gelo

Uma substância pode aparecer sob vários «aspectos» ou «formas» sem deixar de ser a mesma substância. Por exemplo, a água pode aparecer sob a forma de sólido (gelo), de líquido (a forma mais frequente na Terra) e de gás (vapor de água). Em Física, chamam-se **fases** a essas várias “formas”.

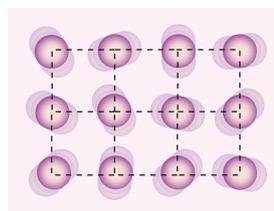
A **fusão** é a **mudança da fase sólida para a fase líquida** e a vaporização é a mudança da fase líquida para a fase gasosa. Quer durante a fusão quer durante a vaporização, o corpo *recebe energia do exterior*, aumentando a sua energia interna.

A grandeza **calor de fusão** diz-nos qual é a energia necessária, por quilograma, para se dar uma mudança de fase. Por exemplo, o calor de fusão do gelo é $3,36 \times 10^5$ J/kg.

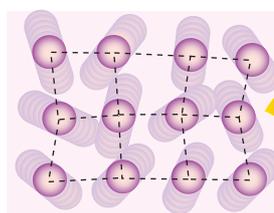
Um facto experimental importante acerca das mudanças de estado é o seguinte: *a temperatura da substância mantém-se constante enquanto se fornece calor, durante a mudança de fase* (ver questão em baixo). E porque se mantém constante, apesar se fornecer calor?

O gelo (água sólida) é formado por moléculas que vibram numa rede cristalina. Na água líquida, as moléculas movem-se mais ou menos livremente.

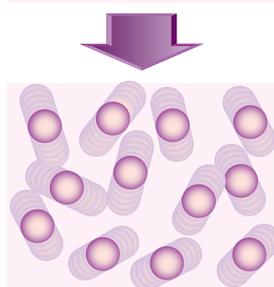
O calor fornecido durante a fusão é utilizado



Gelo (água sólida)



Para fundir 1 kg de gelo é necessário fornecer 336 000 joules...



Água líquida

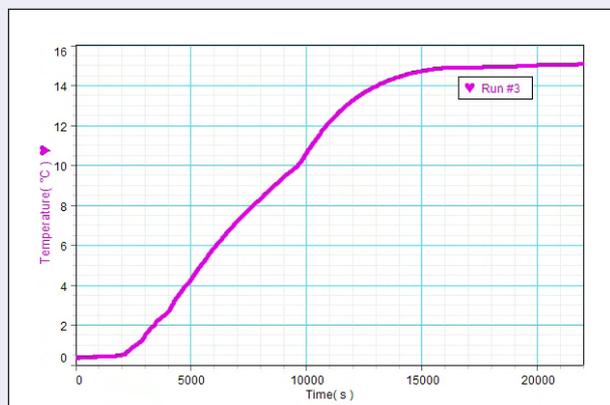
para “desmontar” a rede cristalina da água sólida, não para aumentar a temperatura da água. Se a fonte de calor não for muito intensa, a temperatura da água só aumenta depois de todo o gelo estar fundido.



- 1 O calor de fusão do gelo é $3,36 \times 10^5$ J/kg. Que significa este valor?
- 2 Qual é a energia necessária para fundir 0,100 kg de gelo?

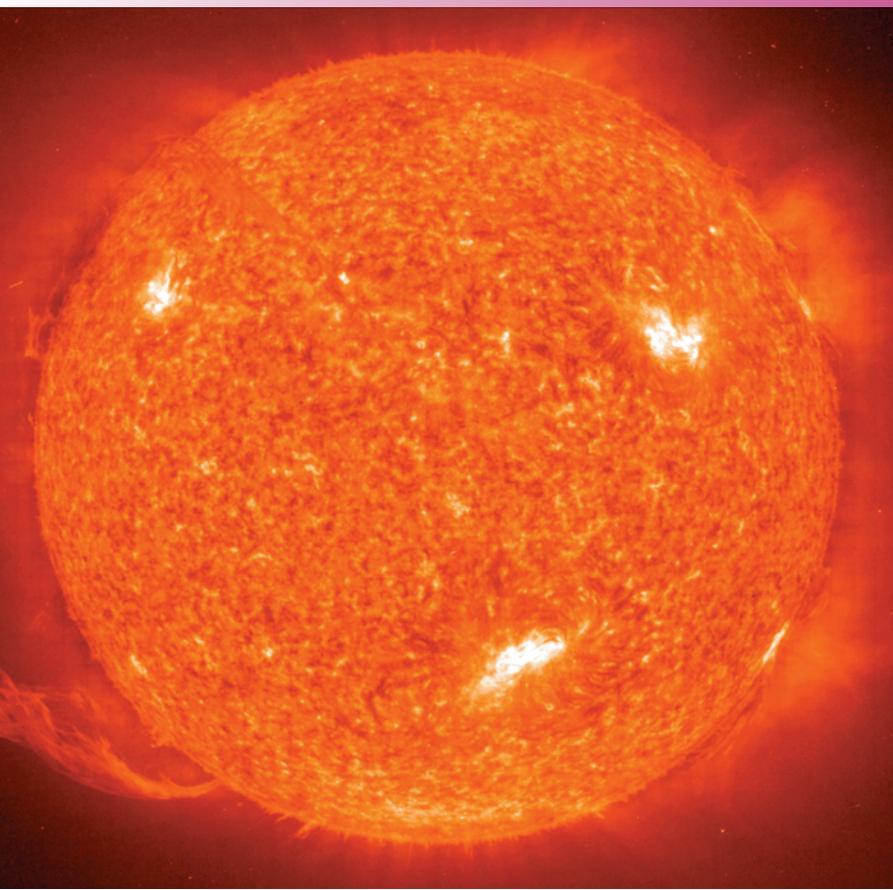
Quando o gelo funde, mantém uma temperatura próxima de 0 °C (depende da pressão exterior). O gráfico abaixo mostra a evolução da temperatura de 20 g de gelo, colocado à temperatura ambiente.

- 3 Quanto tempo demorou o gelo a fundir?
- 4 Que quantidade de energia forneceu o ambiente ao gelo para fundir?
- 5 Qual era a temperatura ambiente?
- 6 A capacidade térmica mássica da água líquida é $4,18 \times 10^3$ J/(kg °C). Que significa este valor?
- 7 Que quantidade de energia forneceu o ambiente à água até esta atingir a temperatura ambiente?



1.1

Energia – do Sol para a Terra



Conceitos-chave nesta secção:

Terra e radiação solar

- reflexão e albedo
- movimento de massas de água e de ar
- emissão e balanço de energia

equilíbrio térmico

- Lei Zero da Termodinâmica

balanço energético da Terra

- radiação absorvida
- radiação emitida
- radiação reflectida na atmosfera
 - efeito de estufa
 - importância
 - riscos

emissão de radiação e temperatura

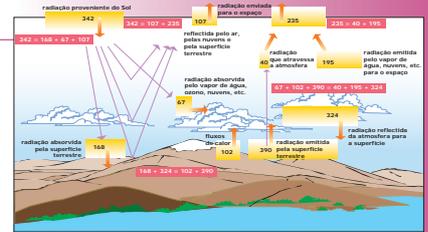
- espectro da radiação
- potência da radiação e lei de Stefan-Boltzmann
- c.d.o. máximo e temperatura, lei de Wien
- espectro da radiação a diferentes temperaturas

temperatura média da Terra

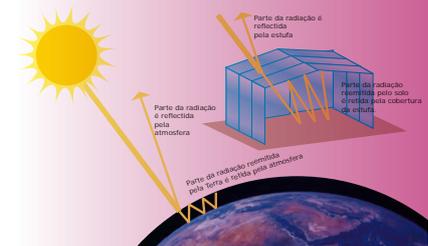
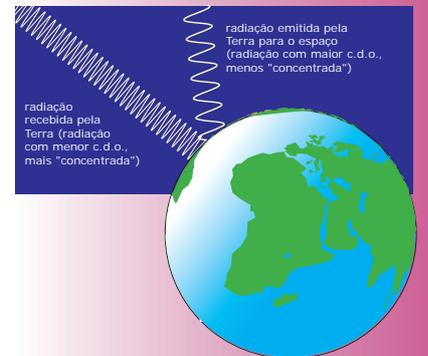
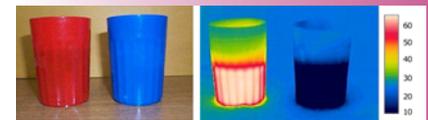
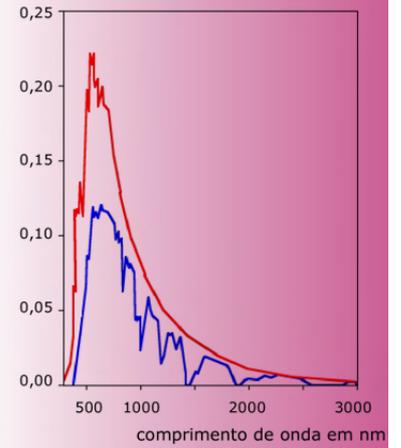
- radiação recebida e radiação emitida
- gases com efeito de estufa
- aquecimento global e cenários para o futuro

painéis fotovoltaicos

- produção de energia eléctrica
- rendimento
- potência máxima



intensidade da radiação (em unidades relativas)

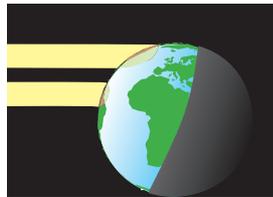


A Terra como receptor e emissor de energia

A superfície da Terra está permanentemente a receber energia do Sol, na forma de radiação electromagnética. Em média e aproximadamente, da energia que a Terra recebe do Sol:

- 30% é reflectida para o espaço (diz-se, por isso, que o **albedo médio da Terra** é 30%);
- 20% é absorvida pela atmosfera;
- 50% é absorvida pela superfície terrestre.

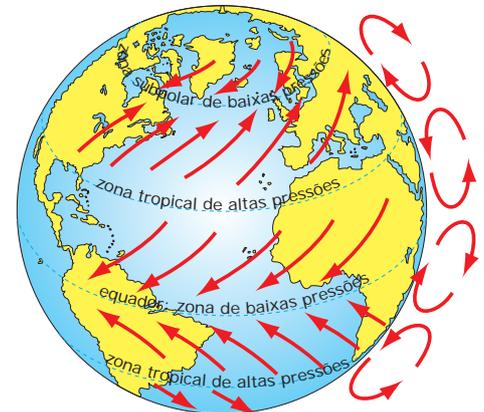
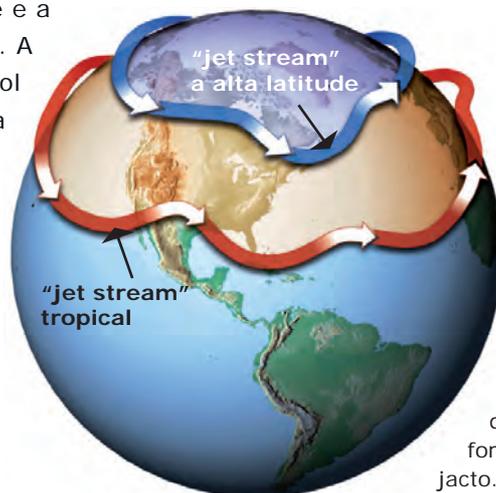
Nas zonas mais próximas do equador, é maior a intensidade de radiação solar. Essas zonas são, pois, mais quentes que as zonas polares.



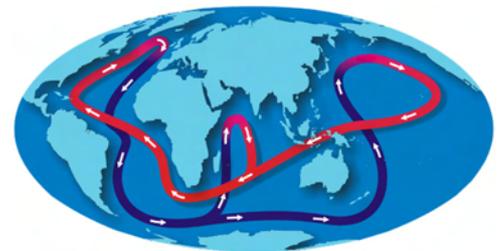
A energia que a Terra recebe do Sol está na origem dos fenómenos meteorológicos, nomeadamente do movimento de enormes massas de ar e de correntes oceânicas.

Se a Terra está continuamente a receber energia do Sol, porque não aquece cada vez mais à medida que o tempo passa? Porque mantém uma temperatura média aproximadamente constante (desde há milhões de anos)?

A resposta está relacionada com o facto de a **Terra** também **emitir energia para o espaço**. *E emite exactamente a mesma quantidade de energia que recebe do exterior!* Mas há uma diferença importante entre a energia que recebe e a que reemite para o espaço. A Terra recebe radiação do Sol de frequência mais elevada (principalmente luz visível) do que a frequência da radiação que emite para o espaço. A energia que a Terra recebe é "mais concentrada" do que a que emite para o espaço. Adiante vamos ver este facto em mais pormenor e quais as suas implicações.

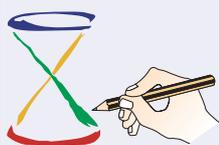


Em cima: esquema simplificado da circulação global do ar na atmosfera. À esquerda: quanto mais perto dos polos, menos intensa é a radiação solar (a mesma quantidade de radiação atinge maior área.)



Em 1992, um barco a meio do Oceano Pacífico perdeu contentores com brinquedos. Anos depois, alguns desse brinquedos apareceram no Oceano Atlântico, a muitos milhares de quilómetros... Além das correntes à superfície dos oceanos, como a corrente do Golfo (responsável pelo clima moderado do norte da Europa), existe uma corrente global, em profundidade, o chamado "Great Ocean Conveyor" ou circulação termohalina, representada na figura acima. Esta corrente distribui energia dos trópicos para os polos, através de todos os oceanos.

Durante a II Guerra Mundial, os pilotos que atravessavam o Oceano Pacífico verificaram que, por vezes, voavam mais depressa para leste e mais devagar para oeste. Alguns anos depois, concluiu-se que havia fortes "correntes de ar" à volta da Terra, a altitudes elevadas, que foram designadas por "jet-streams" ou correntes de jacto. Há dois "jet-streams" em cada hemisfério.



- 1 Que significa afirmar que o albedo médio da Terra é 30%?
- 2 Da energia que a Terra recebe do Sol, que parte é absorvida pela superfície? E pela atmosfera?
- 3 A Terra emite energia sob a forma de radiação para o espaço. Então porque é que a Terra não arrefece?
- 4 Há alguma relação entre a circulação global do ar na atmosfera e da água nos oceanos e a radiação solar? Porquê?

Sistemas termodinâmicos, equilíbrio térmico, temperatura e Lei Zero da Termodinâmica

Como vimos, um **sistema físico** é, simplesmente, um objecto ou grupo de objectos sobre o qual incide a nossa atenção para estudar interações, transferências e transformações. Costuma-se utilizar o termo **sistema termodinâmico** para os sistemas em que são relativamente grandes as variações de energia interna dos objectos. Em geral, nos sistemas termodinâmicos, há que ter em conta que os objectos podem aquecer ou arrefecer. Assim, se estamos interessados em estudar a temperatura da Terra, é conveniente considerá-la como sistema termodinâmico.

Uma das ideias chave acerca dos sistemas termodinâmicos é a ideia de **equilíbrio térmico**. Por exemplo, quando se mede, com um termómetro, a temperatura da água quente colocada num copo, à medida que o tempo passa, as temperaturas do vidro e do mercúrio do termómetro aumentam, até estabilizarem, ficando à mesma temperatura da água: diz-se que *o vidro, o mercúrio do termómetro e a água ficam em equilíbrio térmico entre si*.

Esta ideia está sistematizada na chamada **Lei Zero da Termodinâmica**: de acordo com esta lei, se quaisquer dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então os três corpos estão em equilíbrio térmico entre si. Por exemplo:

- se a água fica em equilíbrio térmico com o vidro do termómetro;
- e se o mercúrio do termómetro fica em equilíbrio térmico com o vidro;
- então a água fica em equilíbrio térmico com o mercúrio do termómetro.

Esta Lei Zero permite definir a grandeza temperatura: a **temperatura** de um corpo é uma *propriedade física que é comum a corpos em equilíbrio térmico com esse corpo*. Ou seja, a temperatura da água é a temperatura do termómetro quando água, vidro e mercúrio estão em equilíbrio térmico.

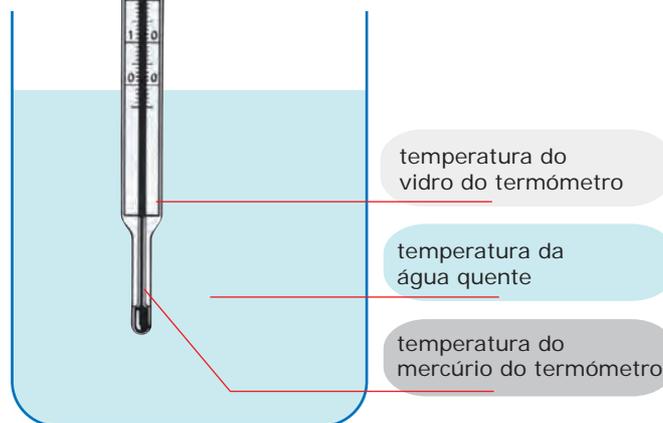
Uma chávena de café acabado de fazer é um sistema termodinâmico. Porquê?



A palavra *termodinâmico* associa o prefixo "termo", que vem do grego "thermós" (que significa quente, ardente) com a palavra *dinâmica*, derivada também do grego "dunamikós" ('poderoso, forte, potente'). A Termodinâmica é o ramo da Física em que se estudam os sistemas termodinâmicos, isto é, os sistemas em que a variação de energia interna não pode ser desprezada.



Lei Zero da Termodinâmica: se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então os três corpos estão em equilíbrio térmico entre si.



se...

temperatura da água quente

= temperatura do vidro do termómetro

e...

temperatura do mercúrio do termómetro

= temperatura do vidro do termómetro

então...

temperatura da água quente

= temperatura do mercúrio do termómetro



1 Na figura acima, representemos a temperatura da água por T_a , a temperatura do vidro do termómetro por T_v e a temperatura do mercúrio do termómetro por T_m . Completar:

se $T_a = T_v$

e $T_m = \dots$

então $\dots = \dots$

Balanço energético da Terra

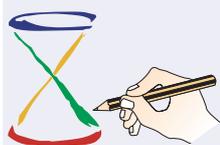
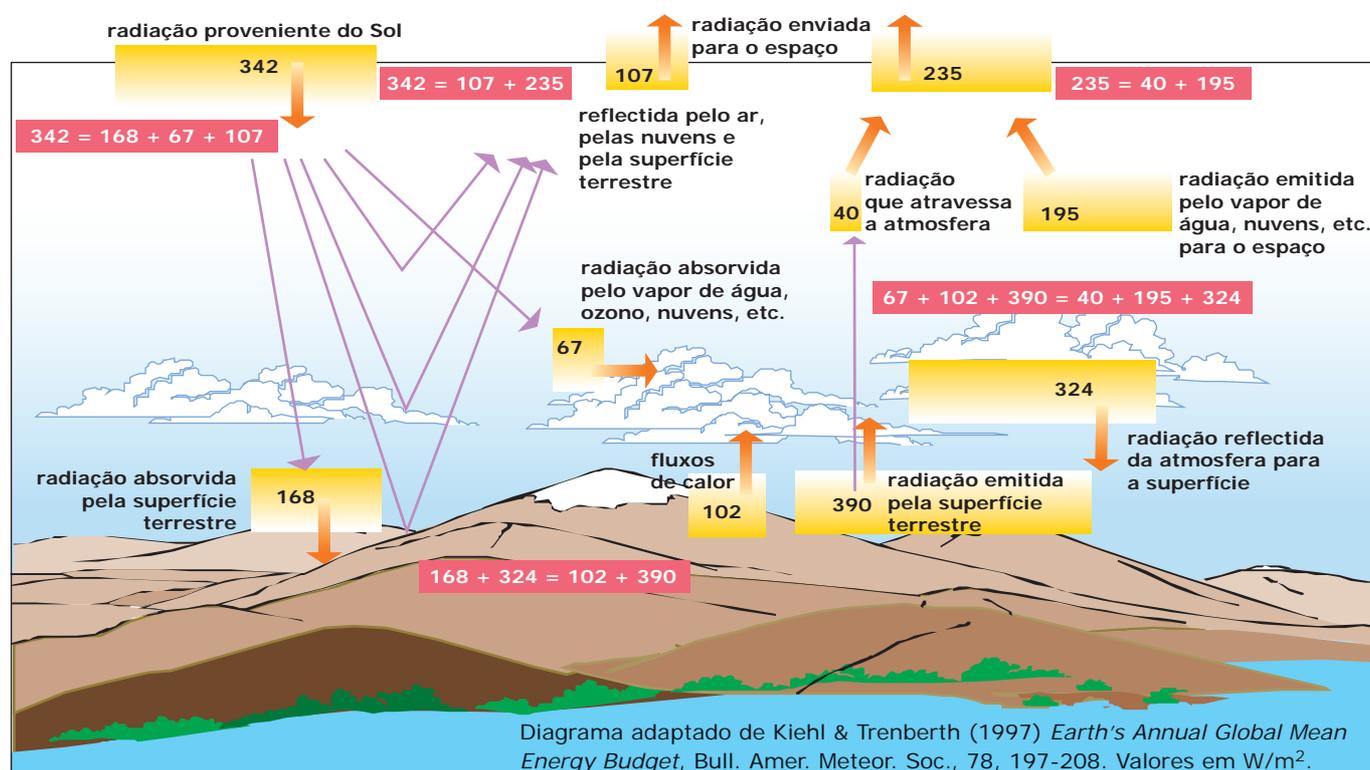
A figura abaixo esquematiza o balanço energético da Terra, isto é, o balanço entre a energia que a Terra recebe do espaço e a energia que a Terra envia para o espaço. **Em média, a Terra recebe 342 joules por segundo por metro quadrado (342 W/m²) e reenvia para o espaço exactamente a mesma quantidade de energia.**

Como vimos atrás, da radiação proveniente do Sol, cerca de 50% é absorvida pela superfície terrestre e cerca de 20% pela atmosfera. Os 30% restantes são reflectidos e não influenciam o clima da Terra.

Na figura são ilustrados diversos **equilíbrios**. Por exemplo, em W/m², a radiação que atinge a superfície (168 do Sol + 324 da reflexão na atmosfera = 492) é, em média, igual à energia proveniente da Terra (390 de radiação + 102 de fluxo de calor = 492). Como veremos adiante, a radiação reflectida pela atmosfera para a Terra (324 W/m²) é uma consequência do chamado **efeito de estufa**, devido à presença de certos gases na atmosfera, que impedem a passagem de uma parte significativa da radiação emitida pela Terra.



Primeira e única foto "completa" da Terra, obtida em 1972 no regresso da última viagem tripulada à Lua. Nesta foto, o Sol está exactamente por trás da nave e, por isso, toda a Terra está iluminada. Segundo alguns autores, esta foto teve um enorme impacto na criação de uma consciência global e ecológica, que obrigou a humanidade a respeitar os equilíbrios do nosso planeta.



- 1 A Terra envia para o espaço exactamente a mesma quantidade de energia que recebe. Que sucederia se tal não acontecesse?
- 2 Balanço da radiação proveniente do Sol, em W/m²: 168 + + = 342
- 3 Complete: a atmosfera recebe 67 + 102 + 390 = 559 W/m² e cede W/m² para o espaço na forma de radiação mais W/m² para a superfície terrestre e deixa-se atravessar por 40 W/m² de radiação (..... + + = 559 W/m²).

Todos os corpos emitem e absorvem radiação

Por “estranho” que possa parecer, um corpo, *qualquer que seja a sua temperatura, está sempre a emitir energia na forma de radiação*. Este facto é devido aos movimentos incessantes das suas partículas (átomos, moléculas, iões, electrões, etc.), movimento esse que origina ondas electromagnéticas. A temperaturas elevadas, essa radiação é visível pelos nossos olhos, como é o caso da radiação emitida por, por exemplo, um pedaço de carvão em brasa ou o filamento de uma lâmpada. A temperaturas não tão elevadas, como por exemplo à temperatura ambiente, a radiação emitida não é detectável pelos nossos olhos mas pode ser detectada por certos animais ou por sensores adequados, como os existentes nos binóculos de visão nocturna.

Uma vez que todos os corpos estão num mundo em que há radiação por todo o lado, desde a radiação solar até à radiação emitida por corpos vizinhos, **qualquer corpo é também um receptor da radiação do ambiente**.

A radiação pode ser analisada por aparelhos chamados **espectrómetros**. Estes aparelhos identificam quais os comprimentos de onda da radiação bem com a intensidade desses diversos comprimentos de onda. A imagem ao lado mostra um exemplo da análise da radiação solar (o chamado **espectro da radiação solar**) por um espectrómetro, na alta atmosfera e à superfície da Terra.

O máximo de intensidade da radiação solar corresponde aproximadamente a 550 nm e está na zona da luz visível.

A radiação solar que atinge a alta atmosfera é mais intensa do que a que atinge a superfície da Terra.

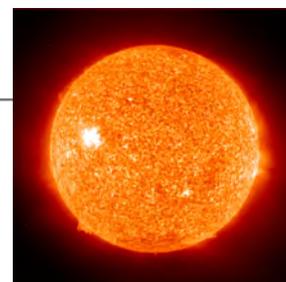
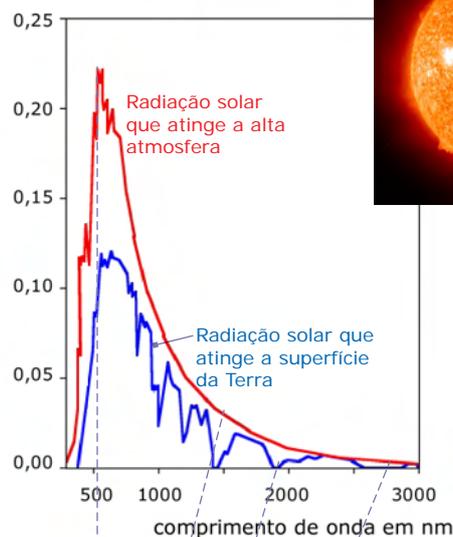
Em certos comprimentos de onda, a radiação solar que atinge a Terra é quase totalmente absorvida pela atmosfera.

Abaixo dos 200 nm e acima dos 3000 nm praticamente não existe radiação solar a atingir a Terra.



Certas cobras têm, além de olhos que detectam a radiação visível, detectores de radiação infravermelha que lhes permitem, por exemplo, “ver” ratos no escuro.

intensidade da radiação
(em unidades relativas)



Espectro da radiação solar: como se distribui a intensidade da radiação pelos diversos comprimentos de onda, na alta atmosfera e na superfície da Terra.

Espectrómetro.



- 1 Qual é a origem da radiação emitida por todos os corpos?
- 2 À temperatura ambiente, numa sala às escuras, não conseguimos ver qualquer objecto. Será que esses objectos não estão a emitir radiação? Que sucede, de facto?
- 3 Observe o espectro da radiação solar. Porque é maior a intensidade da radiação na alta atmosfera?
- 4 Qual de cada um dos pares seguintes comprimentos de onda é mais intenso na radiação solar, na alta atmosfera: 1000 nm ou 3000 nm? 500 nm ou 1000 nm? 100 nm ou 500 nm?

Potência da radiação emitida por um corpo: lei de Stefan–Boltzmann

Consideremos um pedaço de carvão, inicialmente à temperatura ambiente. À medida que aumenta a temperatura do carvão, podemos observar que a sua cor vai mudando: negro, acastanhado, avermelhado... Quer dizer, **a radiação emitida pelo carvão depende da temperatura do carvão**. O mesmo podemos concluir com outros objectos como, por exemplo, uma lâmpada de filamento em que se possa controlar a intensidade da corrente, aumentando-a gradualmente.



Numa chama, há zonas com diferentes temperaturas, que podem grosseiramente ser estimadas pelas diversas cores na chama.

Em 1879, o físico esloveno Jožef Stefan (1835-1893) publicou um artigo científico em que mostrava, com base em estudos experimentais, que a potência da radiação emitida por um corpo a uma certa temperatura era directamente proporcional à quarta potência da temperatura do corpo e à área da superfície de emissão. Cinco anos depois, o físico teórico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), aluno de Stefan, obteve esta mesma lei através de deduções teóricas.

Uma vez que a energia da radiação emitida pelos corpos é uma quantidade física que depende do intervalo de tempo em que está a emitir radiação, é mais simples considerar a potência da radiação emitida, a chamada **potência irradiada pelo corpo**.

A chamada **lei de Stefan-Boltzmann** diz-nos que a potência P radiada por um corpo depende da sua temperatura T e da área A de emissão do corpo através da função matemática indicada ao lado. Nessa função, figuram duas constantes:

- uma, a **emissividade**, representada pelo símbolo e , depende do tipo de corpo que está a emitir radiação (por exemplo, os corpos muito reflectores, como os espelhos, têm baixa emissividade — valores próximos de 0 — e os corpos pouco reflectores têm alta emissividade — valores próximos de 1);
- outra, representada por σ , designada por **constante de Stefan-Boltzmann**, é uma *constante de proporcionalidade*.

Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Cor (subjectiva...)
≈750	≈480	Vermelho muito fraco
≈850	≈580	Vermelho escuro
≈1000	≈730	Vermelho vivo/laranja
≈1200	≈930	Laranja vivo
≈1400	≈1100	Laranja/amarelo
≈1600	≈1300	Amarelo/branco
>1700	>1400	Branco

potência emitida pelo corpo

$$P = e \sigma A T^4$$

emissividade do corpo (valor entre 0 e 1)

temperatura do corpo (em kelvin)

área de emissão do corpo

constante de proporcionalidade (constante de Stefan-Boltzmann)

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



- 1 A temperatura de uma lâmpada de filamento pode ser estimada a partir da cor da radiação emitida pela lâmpada. Qual das seguintes cores corresponde a uma temperatura mais elevada da lâmpada: laranja ou branco?
- 2 Que grandezas físicas figuram na equação que traduz a lei de Stefan-Boltzmann?
- 3 A potência da radiação emitida por um corpo é directamente proporcional à área da superfície do corpo. Que significa esta relação de proporcionalidade?

Um exemplo de aplicação da lei de Stefan–Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann é uma das inúmeras leis físicas expressas através de equações matemáticas. Neste tipo de leis (uma lei física é, simplesmente, uma regularidade que se verifica na Natureza, expressa em linguagem científica), *uma grandeza é expressa em função de outras grandezas*. Por exemplo, no caso da lei de Stefan-Boltzmann, a potência irradiada é expressa em função da emissividade e , da área A e da temperatura T .



Jožef Stefan (1835-1893). *Há-de haver sempre algo que falta, algo que nós não sabemos, porquê?* Esta frase foi escrita por Stefan, que foi professor em Viena, onde inspirou uma geração de estudantes que mais tarde dariam importantes contributos para a Ciência.

Segundo esta lei, a potência irradiada é proporcional à quarta potência da temperatura. Quer dizer:

- Se a temperatura aumentar 2 vezes, a potência aumenta $2^4 = 16$ vezes;
- Se a temperatura aumentar 3 vezes, a potência aumenta $3^4 = 81$ vezes;
- Etc.

Os cálculos abaixo ilustram a lei de Stefan-Boltzmann e o significado da relação entre a potência irradiada e a quarta potência da temperatura. Estimou-se que a área A do corpo humano é 2 m^2 e que a sua emissividade é 1.

Potência emitida pelo corpo humano:

$$\begin{aligned}
 P &= e \sigma A T^4 \\
 &= 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 2 \times 309^4 \text{ W} \\
 &= 1034 \text{ W}
 \end{aligned}$$

A temperatura do corpo humano é $36 \text{ }^\circ\text{C} = 273 + 36 = 309 \text{ kelvin}$

Potência emitida por um objecto com o dobro da temperatura do corpo humano:

$$\begin{aligned}
 P &= e \sigma A T^4 \\
 &= 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 2 \times (2 \times 309)^4 \text{ W} \\
 &= 16541 \text{ W}
 \end{aligned}$$

O dobro da temperatura do corpo humano é $2 \times 309 \text{ kelvin}$

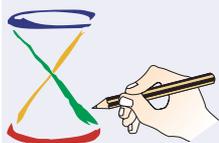
duplicando a temperatura, a potência emitida fica $2^4 = 16$ vezes maior...

Potência emitida por um objecto com o triplo da temperatura do corpo humano:

$$\begin{aligned}
 P &= e \sigma A T^4 \\
 &= 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 2 \times (3 \times 309)^4 \text{ W} \\
 &= 83740 \text{ W}
 \end{aligned}$$

O triplo da temperatura do corpo humano é $3 \times 309 \text{ kelvin}$

triplicando a temperatura, a potência emitida fica $3^4 = 81$ vezes maior...



- 1 Complete o esquema acima verificando que a potência emitida por um objecto a uma temperatura quatro vezes superior à do corpo humano é $4^4 = 256$ vezes maior que a emitida pelo corpo humano...
- 2 Esquematize um gráfico que represente os valores calculados no esquema para a potência emitida em função da temperatura.
- 3 Para dois objectos com a mesma emissividade e temperatura, mas um com área dupla do outro, quantas vezes é maior a potência emitida pelo de área superior?

Radiação emitida e temperatura de um corpo: lei de Wien

Já vimos que à medida que a temperatura de um pedaço de carvão aumenta, a sua cor vai mudando: negro, acastanhado, avermelhado... Será possível determinar a temperatura do carvão conhecendo a radiação que ele emite?

Em 1893, o físico austríaco Wilhem Wien conseguiu obter experimentalmente uma equação matemática simples que relaciona o comprimento de onda da radiação mais intensa emitida por um corpo e a temperatura do corpo: **o c.d.o. máximo é inversamente proporcional à temperatura do corpo**, em kelvin, como ilustram os gráficos ao lado. Aumentando o c.d.o. máximo, diminui proporcionalmente a temperatura do corpo.

Esta equação (**lei de Wien**) permite determinar facilmente a temperatura de um corpo conhecendo o espectro da sua radiação. Por exemplo, sabemos que a temperatura do Sol é 5 800 K (aproximadamente 5500 °C) porque é possível analisar a luz do Sol e medir o comprimento de onda mais intenso da luz solar que é de 500 nanómetros.

Outro exemplo: se um espectrómetro medir 1000 nm como sendo o c.d.o. da radiação mais intensa emitida por uma lâmpada, pode-se concluir que a temperatura do filamento da lâmpada é aproximadamente 2900 K (ver cálculos ao lado).

$$\text{c.d.o. máximo} = \frac{B}{\text{temperatura do corpo emissor}}$$

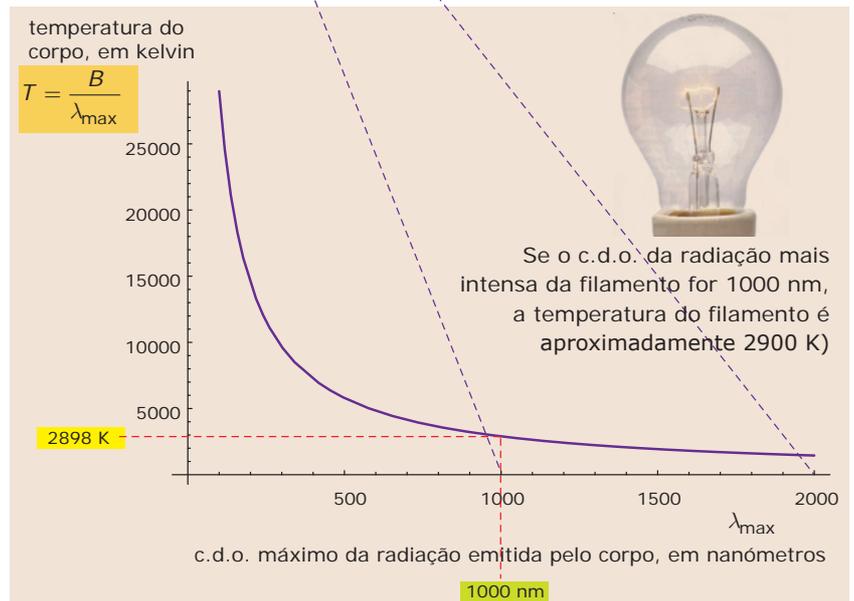
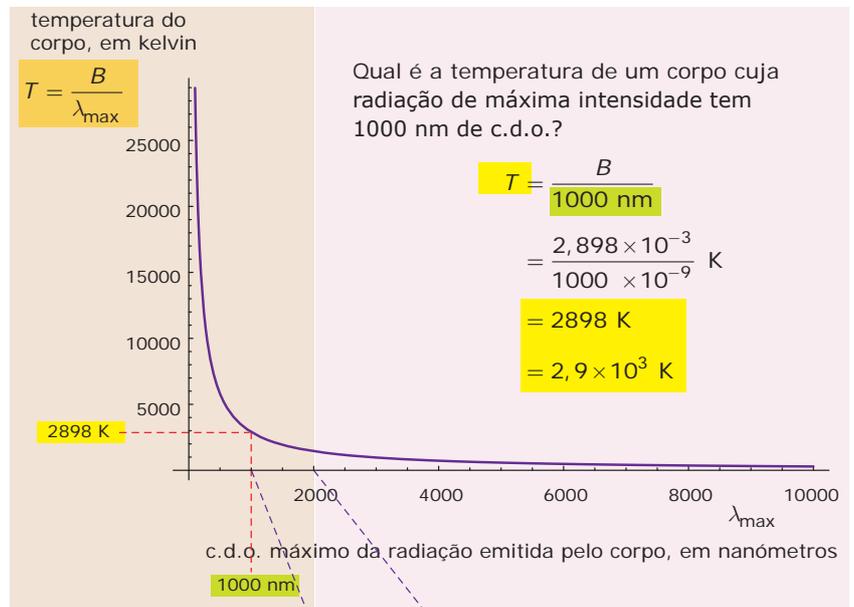
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{B}{T} \quad \text{Lei de Wien}$$

constante de proporcionalidade
2,898 × 10⁻³ unidades SI

temperatura do corpo (em kelvin)

A equação da lei de Wien é equivalente a:

$$T = \frac{B}{\lambda_{\text{max}}}$$



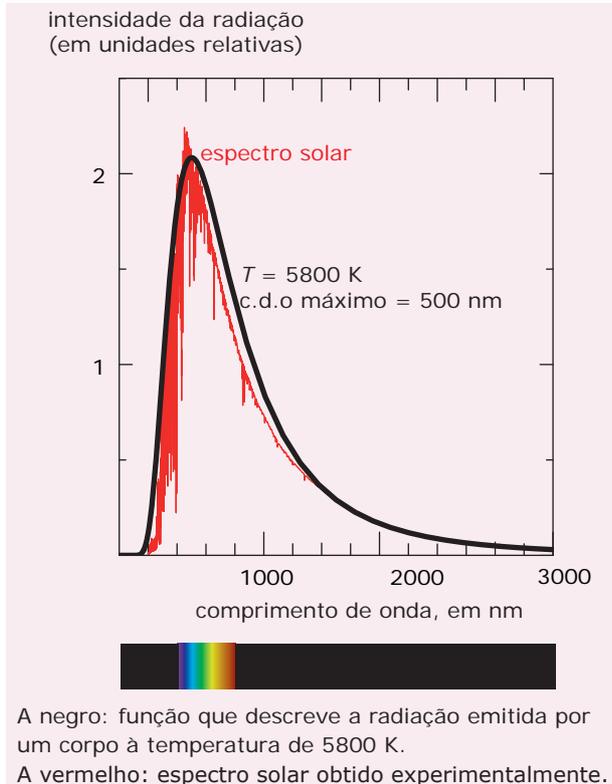
- 1 Que grandezas físicas figuram na equação que traduz a lei de Wien?
- 2 Utilize a equação da lei de Wien, $T = 2,9 \times 10^{-3} / \lambda_{\text{max}}$, para estimar a temperatura exterior do Sol, tendo em conta que o c.d.o. máximo da radiação solar é 500 nm = 500 × 10⁻⁹ m.
- 3 Utilize a equação da lei de Wien para estimar a temperatura de uma estrela que emite radiação em que o respectivo c.d.o. máximo é de 300 nm.

Espectro da radiação de corpos a diferentes temperaturas

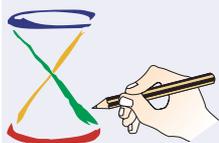
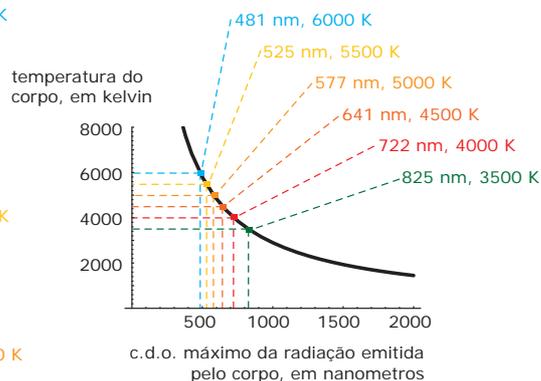
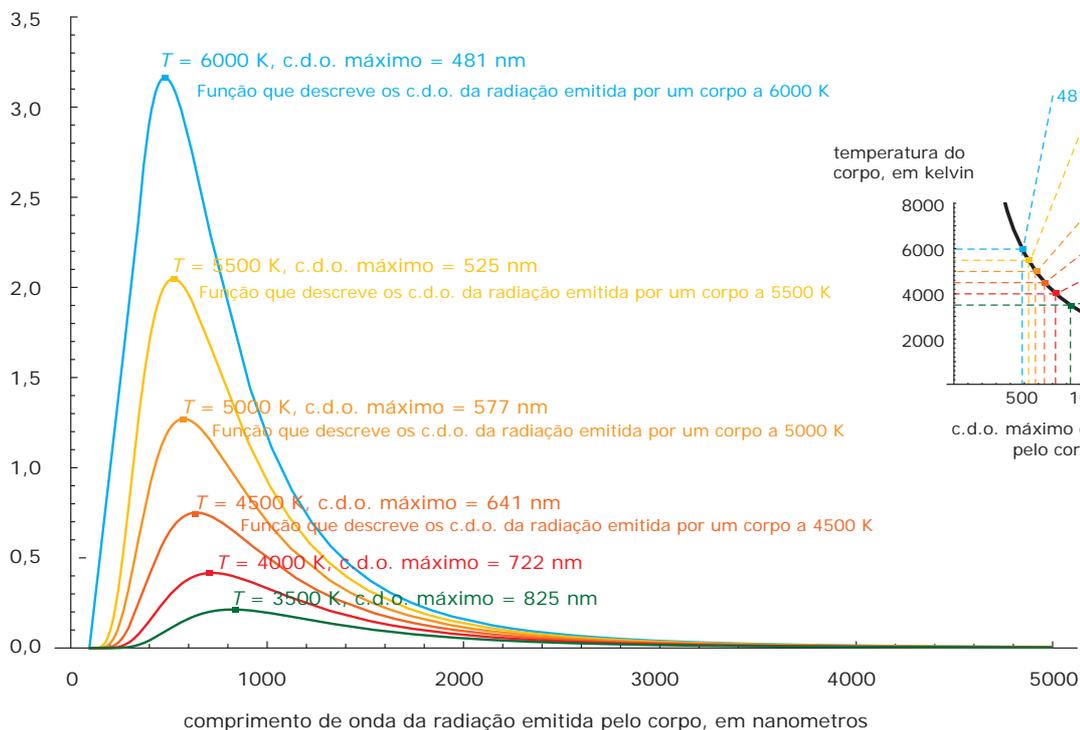
Alguns anos após Wien ter descoberto a relação matemática entre a temperatura de um corpo e o comprimento de onda da radiação mais intensa, o físico alemão Max Planck obteve uma função matemática que descreve muito aproximadamente o **espectro da radiação emitida por qualquer corpo em função da temperatura do corpo**. Os gráficos abaixo mostram essa função, para corpos a diferentes temperaturas.

Estas curvas de radiação (espectros) ajustam-se razoavelmente aos espectros obtidos experimentalmente, como se pode ver para o caso do espectro do Sol (ao lado).

Note-se que a lei de Wien está implícita na função obtida por Planck: a temperatura do corpo diminui proporcionalmente à medida que o c.d.o. da radiação mais intensa aumenta, como se pode observar nos vários gráficos em baixo.



potência da radiação (em unidades relativas)



- 1 Observe o espectro da radiação previsto para um corpo a 5000 K. Qual é o c.d.o. mais intenso da radiação emitida por esse corpo?
- 2 Observe o espectro da radiação previsto para um corpo a 3500 K (figura acima). Qual é o c.d.o. mais intenso da radiação emitida por esse corpo?
- 3 Porque é que é mais difícil aquecer um objecto à medida que a sua temperatura aumenta?

Radiação e temperatura: alguns exemplos

Será possível ver uma pessoa numa sala completamente às escuras? Como vimos, todos os objectos emitem radiação... só temos de determinar em que zona de comprimentos de onda é máxima a radiação emitida pelo corpo humano, como se ilustra a seguir, partindo da lei de Wien.

Comprimento de onda em que é máxima a potência da radiação emitida pelo corpo humano:

$$\lambda_{\max} = \frac{B}{T} \quad \text{Lei de Wien...}$$

$$= \frac{2,898 \times 10^{-3}}{273 + 30} \text{ m}$$

$$= 9,6 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\approx 10 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$= 10^{-5} \text{ m}$$

$$= \frac{10^{-4}}{10^{-4}} \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$= \frac{1}{10^{-4}} \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 10^4 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 10000 \text{ nm} \quad \text{10000 nanómetros...}$$

Este comprimento de onda (10000 nm) está na zona da radiação infravermelha, não visível. Logo, somos invisíveis numa sala às escuras... excepto para quem usar óculos com detecção de radiação infravermelha...

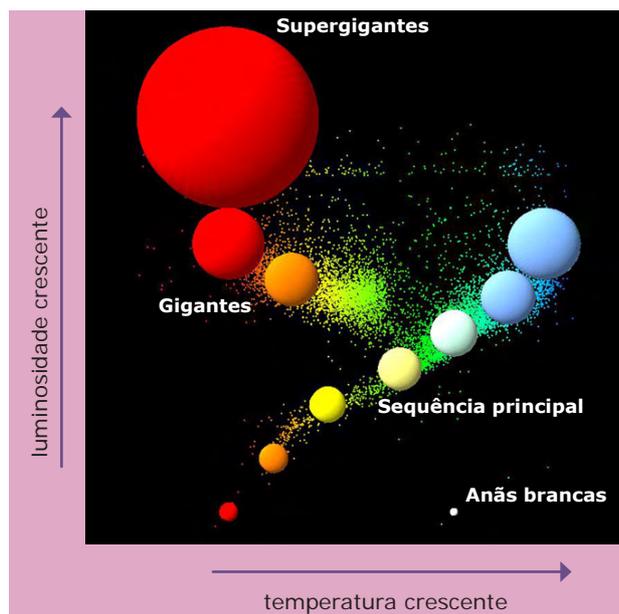


À esquerda, uma foto nocturna (máquina apenas sensível à luz visível... que era muito pouca). À direita, uma foto tirada praticamente no mesmo instante, com máquina sensível à radiação infravermelha. Como o corpo humano emite radiação infravermelha, foi detectado pela máquina...

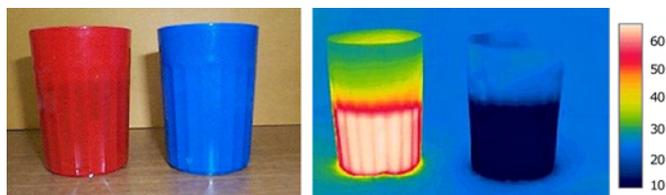
A temperatura da pele do corpo humano é aproximadamente 30 °C = 273 + 30 = 303 kelvin

Aproximando para a ordem de grandeza...

Convertendo para nanómetros...



A cor de uma estrela depende da temperatura da sua superfície. As estrelas mais escuras e vermelhas têm temperaturas da ordem de 2500 K, enquanto as estrelas azuis podem atingir de 10000 K a 50000 K. Este diagrama mostra os diversos tipos de estrelas e as suas cores, relacionando-as com a temperatura e a luminosidade das respectivas estrelas.



Os dois copos têm água... um água quente e outro água fria. À esquerda, uma fotografia dos copos utilizando uma máquina apenas sensível à luz visível. À direita, uma fotografia dos mesmos copos utilizando uma máquina sensível à radiação infravermelha (as "cores" nesta máquina são "cores falsas"). Qual dos copos tem água quente? E qual tem água fria? Porquê?

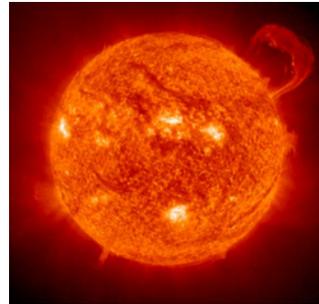


- 1 A radiação infravermelha é radiação visível ou não visível?
- 2 Um objecto à temperatura ambiente emite radiação visível ou invisível?
- 3 É vulgar associarmos a cor vermelha a objectos "quentes" e a cor azul a objectos "frios". Será que esta associação faz sentido para o caso das estrelas? Porquê?

Qual deveria ser a temperatura média da Terra...?

A lei de Stefan-Boltzmann permite determinar a **temperatura** dos objectos no Universo, desde que se conheça a *potência da radiação que emitem*.

A título de exemplo, mostra-se como se calcula a temperatura média da Terra. Obtém-se um valor (-18 °C) que felizmente não se verifica, devido ao efeito de estufa da atmosfera, como veremos adiante.



A actividade solar varia mas a energia que atinge a Terra é, em média, aproximadamente constante.

Potência da radiação que atinge a Terra, em média, por metro quadrado:

$$342 \text{ joules por segundo} = 342 \text{ W}$$

Este valor varia com a actividade do Sol, mas mantém-se aproximadamente constante.

Percentagem da radiação recebida que é absorvida pela superfície e pela atmosfera terrestre:

$$70\% = \frac{70}{100}$$

Recorde que o albedo médio da Terra é 30%

Potência da radiação recebida pela superfície e pela atmosfera terrestre, em média, por metro quadrado:

$$342 \text{ W} \times \frac{70}{100} = 239 \text{ W}$$

Potência da radiação emitida pela superfície e pela atmosfera terrestre, em média, por metro quadrado:

$$239 \text{ W}$$

Tem de ser igual à recebida... Porquê?

Lei de Stefan-Boltzmann aplicada à Terra:

$$P = e \sigma A T^4 \\ = 1 \times \sigma \times 1 \times T^4$$

Admite-se que a emissividade (e) da Terra é 1 (um valor não muito longe do valor médio real). Potência por metro quadrado, logo o valor da área nesta equação é $A = 1 \text{ m}^2$...

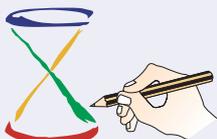
Resolvendo a equação em ordem à temperatura T da Terra:

$$239 = \sigma T^4 \\ \frac{239}{\sigma} = T^4 \\ T^4 = \frac{239}{5,67 \times 10^{-8}} \\ = 4,21 \times 10^9 \\ T = \sqrt[4]{4,21 \times 10^9} \\ = 255 \text{ K}$$

Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ unidades SI

$$255 \text{ K} = 252 - 273 = -18\text{ °C}$$

Temperatura média estimada para a Terra (-18 °C , brrrr... que frio!!!!!!), um valor felizmente muito diferente do registado na Terra!



- 1 Qual é a temperatura média estimada para a Terra?
- 2 Se o albedo médio da Terra fosse nulo, que sucederia à radiação que atingiria a Terra?
- 3 Verifique que se o albedo médio da Terra fosse nulo, a temperatura média estimada para a Terra seria de $5,7\text{ °C}$.

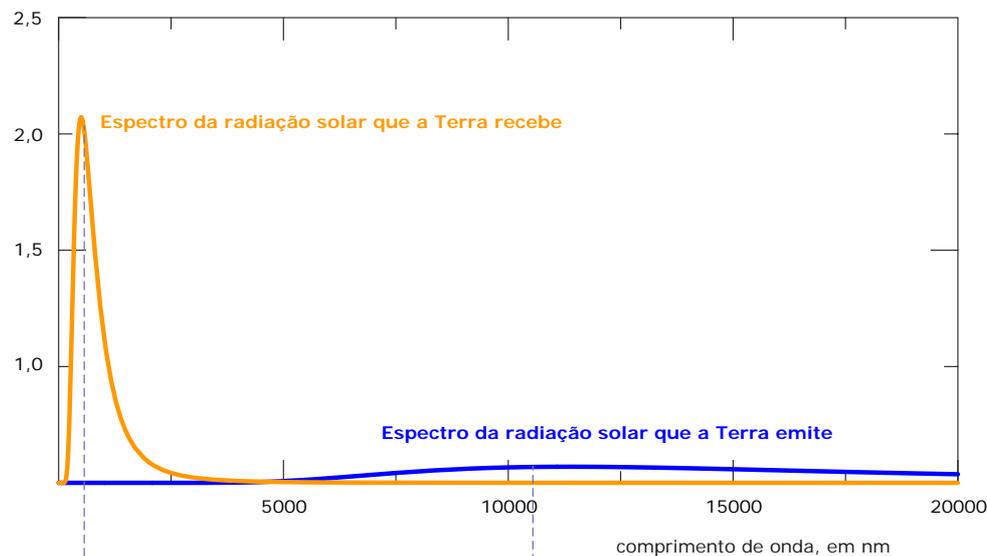
Que tipo de radiação recebe a Terra? E que tipo de radiação emite para o espaço?

Já vimos que a Terra está continuamente a receber energia do Sol e a emitir energia para o espaço: em média, a quantidade que recebe é igual à que emite. Se assim não fosse, a Terra estaria permanentemente a aquecer, não podendo manter a sua temperatura média constante, ao longo de milhares de anos, como tem mantido, aproximadamente.

Mas há uma diferença importante entre a radiação que recebe e a que emite para o espaço. **A Terra recebe radiação do Sol com menor c.d.o. (principalmente luz visível) do que a radiação que emite (principalmente radiação infravermelha).** A energia que a Terra recebe é, pois, "mais concentrada" do que a que emite para o espaço.



potência da radiação (em unidades relativas)



A radiação solar que atinge a Terra é mais intensa para menores c.d.o., nomeadamente na zona da radiação visível (400 nm a 700 nm)

A radiação solar que a Terra emite é mais intensa para maiores c.d.o., nomeadamente na zona da radiação infravermelha (muito acima dos 700 nm, sendo a mais intensa cerca dos 10000 nm)



- 1 A Terra recebe mais energia do que a que emite para o espaço? Fundamente a resposta.
- 2 A temperatura média da Terra é cerca de $14,5\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 288\text{ K}$. Qual é o comprimento de onda mais intenso da radiação emitida pela Terra?
- 3 Porque razão a nave espacial Voyager apenas fotografou "metade da Terra" se toda a Terra está a emitir radiação (ver foto acima)?

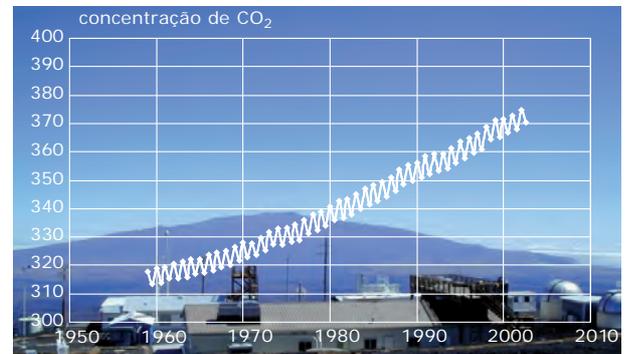
E qual é, de facto, a temperatura média da Terra? Porquê?

Certos gases existentes na atmosfera, nomeadamente o dióxido de carbono, provocam o chamado **efeito de estufa na atmosfera**, isto é, *retêm parte da radiação emitida pela superfície terrestre, não a deixando sair para o espaço*. A atmosfera deixa-se atravessar mais facilmente pela radiação visível vinda do Sol, de menor comprimento de onda, mais penetrante, do que pela radiação infravermelha emitida pela Terra, de maior maior comprimento de onda, menos penetrante.

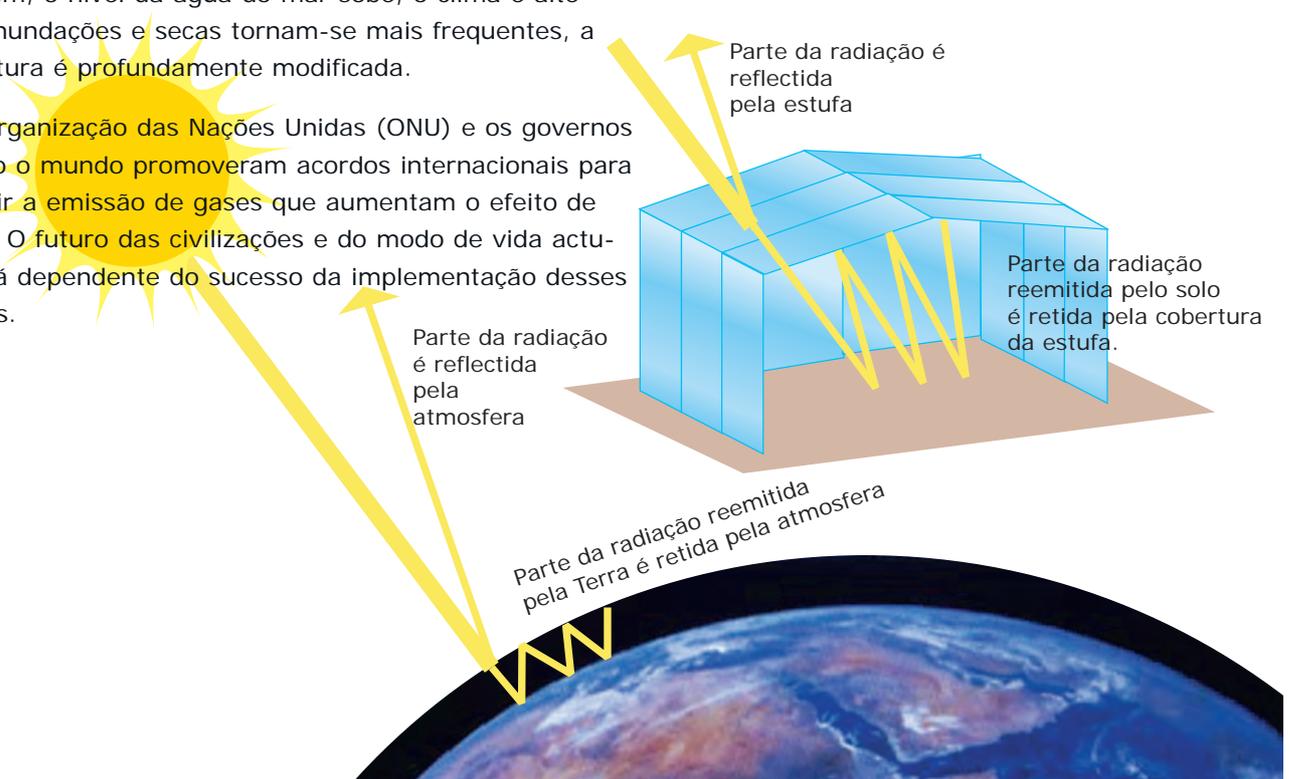
Sem efeito de estufa, no equilíbrio entre a radiação recebida e a radiação emitida, a Terra teria, como vimos, uma temperatura média cerca de duas dezenas de graus Celsius abaixo de zero. Os oceanos gelariam e dificilmente haveria vida! Graças ao efeito de estufa, a temperatura média na Terra situa-se entre os 14 °C e os 15 °C. Por isso, há água líquida e a vida é possível. Mas se existir excesso de gases como o dióxido de carbono, aumenta o efeito de estufa, aumentando a radiação retida pela atmosfera terrestre. Logo, a Terra aquece. Se a Terra aquecer excessivamente, os gelos do Pólo Norte e do Pólo Sul derretem, o nível da água do mar sobe, o clima é alterado, inundações e secas tornam-se mais frequentes, a agricultura é profundamente modificada.

A Organização das Nações Unidas (ONU) e os governos de todo o mundo promoveram acordos internacionais para diminuir a emissão de gases que aumentam o efeito de estufa. O futuro das civilizações e do modo de vida actuais está dependente do sucesso da implementação desses acordos.

Principais gases na atmosfera com efeito de estufa: vapor de água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono.



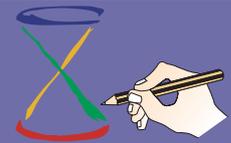
Evolução da concentração de dióxido de carbono na montanha Mauna Loa, numa ilha do Oceano Pacífico.



- 1 Indique dois gases que contribuam para o efeito de estufa na Terra.
- 2 Em duas ou três frases, descreva o que é o efeito de estufa.
- 3 Qual é a importância do efeito de estufa na Terra?
- 4 Quais são os riscos do aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera?

Cenários e impactos do aquecimento global

Texto de Filipe Duarte Santos, professor de Física da Universidade de Lisboa. Publicado na revista *Grande Reportagem*, Agosto de 2002



O clima da Terra não é fixo e imutável. Pelo contrário, tem variado profundamente desde o início da formação da atmosfera terrestre há mais de 4000 milhões de anos. Registos paleoclimáticos revelam que desde muito cedo houve ciclos de glaciação nos quais épocas glaciares, com formação de extensas camadas de gelo, alternaram com épocas interglaciares em que, devido ao aumento da temperatura média global da atmosfera, se deu a fusão dos gelos. A última época glacial teve início há aproximadamente 120 mil anos e terminou há cerca de vinte mil anos. Nessa época a temperatura média global era 5 °C a 7 °C menor do que a actual e o nível médio do mar estava cerca de 120 metros abaixo do actual. A serra da Estrela estava coberta por extensas camadas de gelo e no vale do Zêzere, a montante de Manteigas, havia um glaciar. Estas alterações climáticas têm causas naturais, mais ou menos bem identificadas. As principais são pequenas variações na órbita da Terra em torno do Sol, na luminosidade do Sol e períodos de intensa actividade vulcânica.

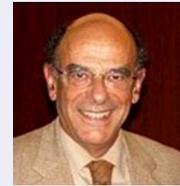
Recentemente a humanidade passou a ser também um factor de alteração do clima terrestre através, principalmente, da queima de combustíveis fósseis — carvão, petróleo e gás natural — e ainda de profundas alterações no uso dos solos, em especial a desflorestação. A queima dos combustíveis fósseis lança para a atmosfera dióxido de carbono (CO₂), um gás com efeito de estufa, isto é, que aumenta a temperatura da atmosfera (...). Desde o início da Revolução Industrial, em meados do século XVIII, a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou 32 por cento. Para ter uma ideia da dimensão do problema, note-se que durante a década de 1990 a 1999 a queima de carvão, petróleo e gás natural provocou o lançamento médio anual para a atmosfera de 6300 milhões de toneladas de carbono (...). (...) Isto significa que cada um de nós, habitante do planeta Terra, lança em média por ano mais de uma tonelada de carbono para a atmosfera. A humanidade está pois a realizar uma gigantesca experiência (...) ao alterar a composição da atmosfera terrestre sem ter suficiente conhecimento dos riscos potenciais envolvidos. Note-se que há disparidades profundas entre países nas emissões *per capita*. Os Estados Unidos da América, com cerca de cinco por cento da população mundial, produzem 25 por cento das emissões mundiais de CO₂ e, *per capita*, emitem onze vezes mais do que a China, vinte vezes mais do que a Índia e trezentas vezes mais do que Moçambique.

O processo lento mas continuado de aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera irá inevitavelmente provocar uma alteração climática. Qual vai ser a alteração? Para responder é necessário construir modelos que simulem o sistema climático da Terra e validar as simulações confrontando-as com o clima do passado. Simulações obtidas para o século XX, durante o qual a temperatura média global aumentou de 0,6 ± 0,2 °C, permitem concluir que grande parte do aumento observado nos últimos cinquenta anos é devido a causas antropogénicas. Os mesmos modelos permitem fazer cenários do clima futuro que (...) projectam um aumento da temperatura até 2100 de 1,4 °C a 5,8 °C. Haverá também alterações na precipitação com variações espaciais significativas; maior precipitação nas latitudes elevadas e nas regiões equatoriais e menor precipitação nas latitudes médias, em particular na região mediterrânica e do Sul da Europa onde Portugal se situa.

As alterações climáticas terão efeitos benéficos e adversos sobre os vários sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos sensíveis ao clima. Quanto maior e mais rápida for a mudança climática, maior será a predominância dos efeitos adversos sobre os benéficos. (...)

As alterações climáticas irão agravar a escassez de água nas regiões áridas e semiáridas do globo e simultaneamente aumentar o risco de cheias devido a uma maior frequência de fenómenos climáticos extremos. (...)

A produtividade agrícola irá diminuir, especialmente em muitos países



Filipe Duarte Santos.

- 1 O clima da Terra foi sempre idêntico ao actual? Porquê?
- 2 Porque está a humanidade a alterar o clima?
- 3 Que países mais contribuem para as alterações climáticas? Porquê?
- 4 Que significa "antropogénico"?
- 5 Qual é o aumento esperado para a temperatura média na Terra nos próximos 100 anos?

Para mais informação:

Projecto "Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures" (SIAM),
<http://www.siam.fc.ul.pt>

Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch>

Uma verdade Inconveniente,
<http://www.climatecrisis.net>

dos trópicos e subtropicos, o que tenderá a agravar a situação dos mais de oitocentos milhões de pessoas com fome. As alterações climáticas irão pois agravar o fosso Norte-Sul e corre-se o risco de aumentar os fluxos de emigração.

As alterações na temperatura, precipitação e frequência de fenómenos climáticos extremos irão afectar a produtividade das florestas e provocar a migração ou extinção de espécies florestais. O risco de incêndios florestais irá aumentar de modo significativo em vários países — Portugal é um deles. As alterações climáticas irão também modificar a estrutura, composição e distribuição geográfica dos ecossistemas e diminuir a biodiversidade. Alguns ecossistemas são particularmente vulneráveis como, por exemplo, os recifes de corais e os ecossistemas de montanha.

A saúde humana é também vulnerável às alterações climáticas devido, principalmente, ao aumento potencial da mortalidade relacionada com o calor excessivo e às ondas de calor, a um maior risco de doenças relacionadas com a escassez de recursos hídricos e menor qualidade da água e a um maior risco de doenças transmitidas por vectores (mosquitos, carraças, moscas) e roedores, tais como a malária, dengue, doença de Lume, leishmaniose, leptospirose e a febre do Nilo Ocidental.

Os cenários futuros projectam até 2100 um aumento do nível médio do mar entre 9 e 88 centímetros, com um valor central de 48 centímetros. Esta subida do mar irá ter impactes profundamente negativos sobre as zonas costeiras, forçando a retirada de dezenas de milhões de pessoas que aí vivem, causando perda de terreno e aumentando o risco de erosão e de intrusão salina. Calcula-se que cerca de metade da população mundial vive em zonas costeiras e cerca de cinquenta milhões sofrem anualmente inundações. Uma elevação do nível do mar de cinquenta centímetros irá duplicar aquele número.

O estudo *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (...)*, sobre os impactes das alterações climáticas em Portugal revela que a maioria são adversos, especialmente nos sectores dos recursos hídricos, zonas costeiras, saúde, florestas e biodiversidade. Outros estudos feitos para toda a Europa mostram claramente que se esperam impactes mais negativos a Sul do que no Norte. A região mediterrânica é particularmente vulnerável às alterações climáticas.

Há ainda muita incerteza nos cenários climáticos, nos cenários das emissões de gases com efeito de estufa, na identificação e quantificação dos impactes e na selecção das medidas de adaptação. Apesar desta incerteza, os cenários futuros são suficientemente graves para justificar o recurso ao princípio da precaução. É necessário agir no sentido de diminuir as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Só assim conseguiremos estabilizar a concentração desses gases na atmosfera. Estamos perante um tremendo desafio porque a economia global está alicerçada no uso dos combustíveis fósseis. O Protocolo de Quioto é um primeiro passo extremamente importante no sentido de diminuir as emissões dos países desenvolvidos. Sabemos que ele não evita as alterações climáticas no corrente século mas será, quando entrar em vigor, um instrumento fundamental no processo de mitigação. Não vai ser nada fácil cumprir os objectivos da redução das emissões acordadas no Protocolo de Quioto, nos países que o ratificaram. O problema não se resolve apenas ao nível do governo. Em última análise, tudo irá depender do nosso comportamento individual, da nossa informação, conhecimento e sensibilidade para a problemática das alterações climáticas e do nosso sistema e hierarquia de valores.

Na minha opinião, é forçoso optar entre a solidariedade com as futuras gerações que garante o controlo das alterações climáticas e a irresponsabilidade intergeracional que despreza a qualidade do futuro para além da nossa vida.

6 Que impactes se prevê que terão as alterações climáticas?

7 Em que regiões da Terra se farão sentir com maior intensidade os efeitos das alterações climáticas?

8 Que foi decidido pela comunidade internacional para diminuir as causas das alterações climáticas?



O barco durante a inundação. Quadro de Alfred Sisley (1839-1899).

A radiação solar na produção da energia eléctrica – painéis fotovoltaicos

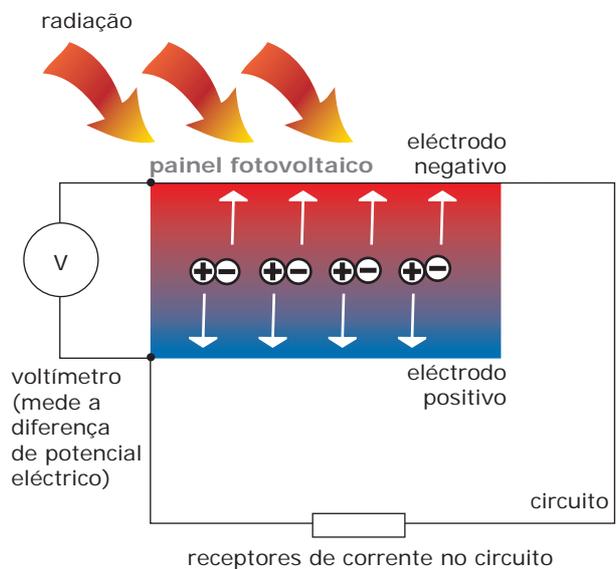
Um painel fotovoltaico é um sistema que converte a energia da radiação em energia da corrente eléctrica.

Desde o final do século XIX que se conhece a propriedade de certos materiais (**materiais semicondutores**), como o selénio e o silício, de produzirem uma diferença de potencial eléctrico nas suas extremidades quando a radiação incide no material. **Essa diferença de potencial surge devido ao facto da radiação “arrancar” certos electrões dos átomos**, criando “buracos” de carga positiva. Os electrões movem-se para uma das extremidades do material e os “buracos positivos” surgem na outra extremidade. Assim, a extremidade com excesso de electrões fica carregada negativamente e a outra extremidade com falta de electrões fica carregada positivamente: está criada a diferença de potencial eléctrico. Associando vários painéis, pode-se aumentar a diferença de potencial eléctrico. E ligando os painéis a receptores exteriores, obtém-se uma corrente eléctrica.

O **rendimento dos painéis fotovoltaicos** está entre 5% e 25%, mas há expectativa de ser aumentado até valores próximos dos 40%, devido à descoberta de materiais mais eficientes. No entanto, de acordo com alguns especialistas, **o importante é reduzir o custo da produção de painéis** porque, como a **energia solar é gratuita**, o rendimento não é muito importante: o que é realmente importante é o custo da energia produzida!

Actualmente, os custos da energia fotovoltaica são mais elevados do que os custos da energia obtida noutras fontes de energia. Por isso, governos e empresas estão a apoiar a investigação com vista a diminuir esses custos. Por outro lado, os governos estão interessados em apoiar a criação de centrais solares porque estas evitam a queima de combustíveis, contribuindo assim para a diminuição de gases de estufa para a atmosfera.

A energia de origem fotovoltaica é particularmente útil para dispositivos isolados, não ligados à rede, como é o caso de habitações rurais longe das redes de distribuição, sinais de trânsito e telefones de socorro em auto-estradas, carregadores de pilhas para montanhistas, etc.



Este painel de 2 m² de área tem um rendimento médio de 15%. Se a potência média da radiação solar for 400 W/m², a potência do painel é, por cada metro quadrado:

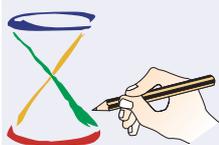
$$0,15 \times 400 \text{ W/m}^2 = 60 \text{ W/m}^2.$$

Como tem 2 m², a potência do painel é

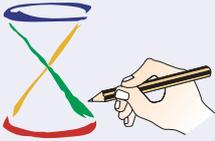
$$2 \times 60 \text{ W/m}^2 = 120 \text{ W}$$

Com este painel, pode alimentar-se duas lâmpadas de 60 W.

Uma mochila com painéis fotovoltaicos que permitem manter equipamento eléctrico, como um computador portátil, sempre com a bateria carregada...



- 1 Descreva, em duas ou três frases, como é que a energia se transfere da radiação para um circuito eléctrico alimentado por um painel fotovoltaico.
- 2 Que significa afirmar que o rendimento de um painel solar é de 20%?
- 3 Um sistema de painéis solares tem um rendimento de 20%. Em média, a potência da radiação é 400 W por metro quadrado, num determinado local. Verifique que a área mínima dos painéis para fazer funcionar um aparelho com a potência de 80 W é de 1,0 m².



Em Brinches, Serpa, ficou totalmente concluída em Março de 2007 a maior central fotovoltaica da Europa, constituída por 52 300 painéis com uma potência total instalada de 11 MW (foto em baixo).

A produção anual de energia na central está estimada em 21 000 MWh. Com esta central, poupa-se, por ano, quase 2 000 toneladas de petróleo e evita-se a emissão de cerca de 20 000 toneladas de dióxido de carbono para a atmosfera.

Recorde que:

- o watt é a unidade de potência do SI;
- 1 megawatt = 1000 quilowatts;
- o quilowatt-hora (kWh) e o megawatt-hora (MWh) são unidades de energia;
- 1 quilowatt-hora (kWh) é a energia consumida durante 1 hora por um sistema com a potência de 1 kW;
- 1 megawatt-hora (MWh) é a energia consumida durante 1 hora por um sistema com a potência de 1 MW.

- 1 Verifique que a potência média de cada painel fotovoltaico é de 0,00021 megawatts.
- 2 Verifique que a potência média de cada painel fotovoltaico é de 0,21 quilowatts.
- 3 A potência da central fotovoltaica é constante ao longo do dia? Porquê?
- 4 A potência média diária da central é constante ao longo do ano? Porquê?
- 5 Cada painel fotovoltaico tem 1,4 m² de área. Qual é a potência média dos painéis por cada metro quadrado?
- 6 De acordo com a Direcção-Geral de Geologia e Energia (<http://www.dgge.pt>), em média, cada habitação em Portugal consome cerca de 2400 kWh por ano. Verifique que a central fotovoltaica de Serpa poderia fornecer energia a 8750 habitações, se não houvesse perda nas linhas de transmissão.
- 7 A energia eléctrica consumida em Portugal é cerca de 50×10^6 MWh por ano. Quantas centrais semelhantes à de Serpa seriam necessárias para que toda a energia eléctrica consumida em Portugal tivesse origem fotovoltaica?

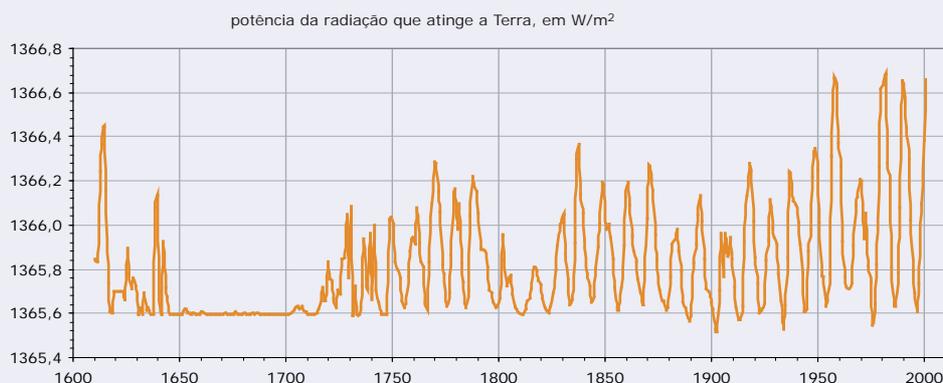
Central fotovoltaica de Brinches, Serpa.



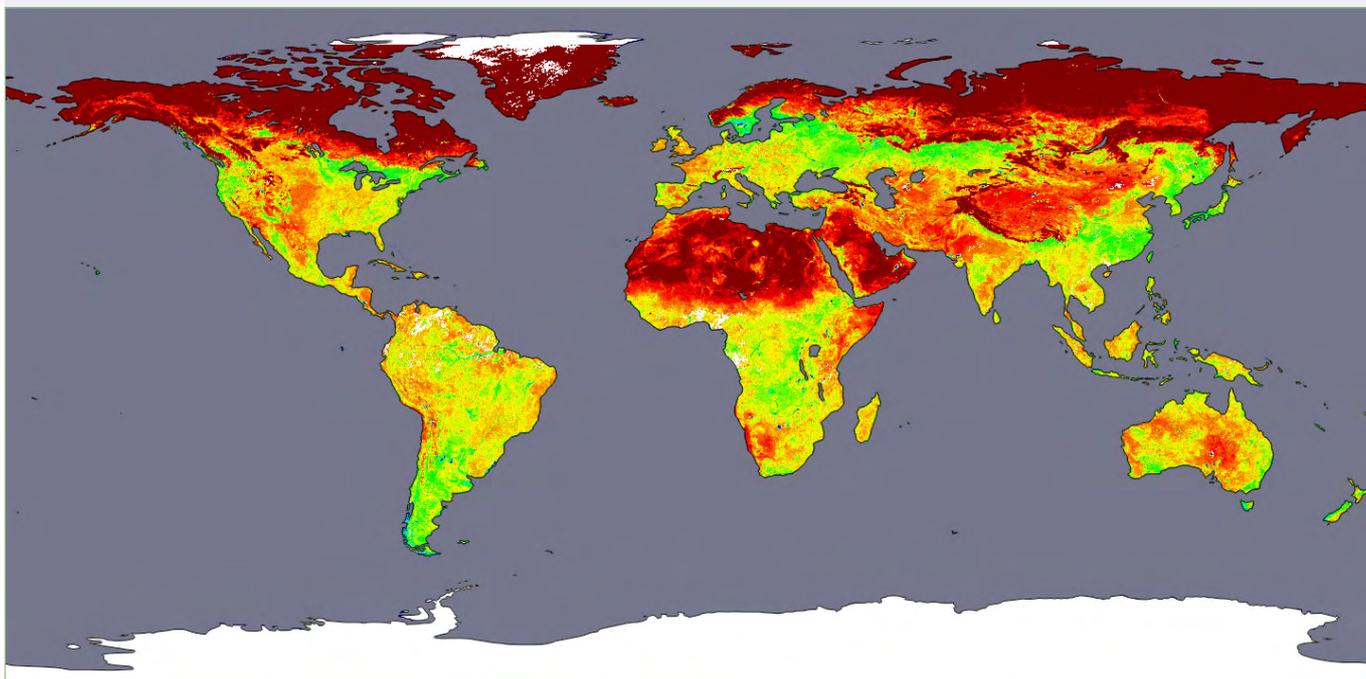
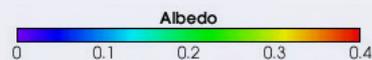
Questões para pensar e para calcular

Radiação, espectros e temperatura: leis de Stefan-Boltzmann e de Wien

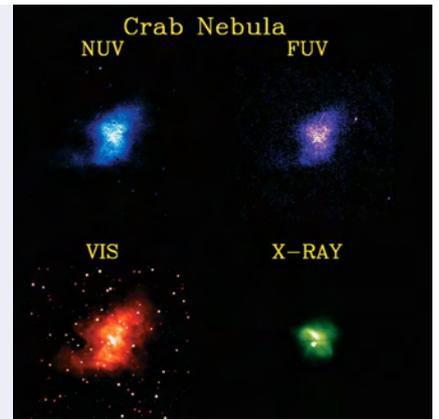
- 1 Qual é, em percentagem, o valor aproximado da energia solar que incide na Terra e que atinge a superfície (continentes e oceanos)?
- 2 O gráfico mostra os valores da potência da radiação solar que atingiu a Terra entre o século XVII e a actualidade.



- 2.1 Faça uma estimativa do valor médio, com três algarismos significativos.
 - 2.2 Em geral, a potência varia com uma certa regularidade. Verifique que, aproximadamente, atinge valores máximos de 11 anos em 11 anos.
 - 2.3 No final do século XVII, a potência da radiação solar manteve-se sempre próximo de valores mínimos. Que influência na temperatura média da Terra pode ter tido tal facto?
- 3 O albedo médio terrestre é 30%.
 - 3.1 Que significa este valor?
 - 3.2 A figura abaixo mostra o albedo médio da superfície terrestre nas diversas zonas geográficas do planeta (nas zonas em branco, cor que não tem correspondência na escala, o albedo ainda é mais elevado: cerca de 80%). Em que zonas é maior o albedo? E em que zonas é menor?
 - 3.3 O gelo e a areia reflectem mais radiação solar do que a vegetação. Relacione este facto com os dados da figura.



4 A imagem ao lado é uma montagem de quatro fotografias da nebulosa do Caranguejo descoberta pelo astrónomo francês Messier, em 1758. Esta nebulosa é o resultado da explosão de uma enorme estrela que ocorreu há quase mil anos e foi registada por chineses e japoneses. Na imagem, NUV (“near ultraviolet”) e FUV (“far ultraviolet”) representam registos de radiação ultravioleta, VIS registo de radiação visível e X-RAY de raios X.

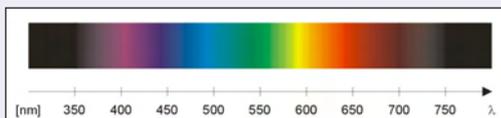
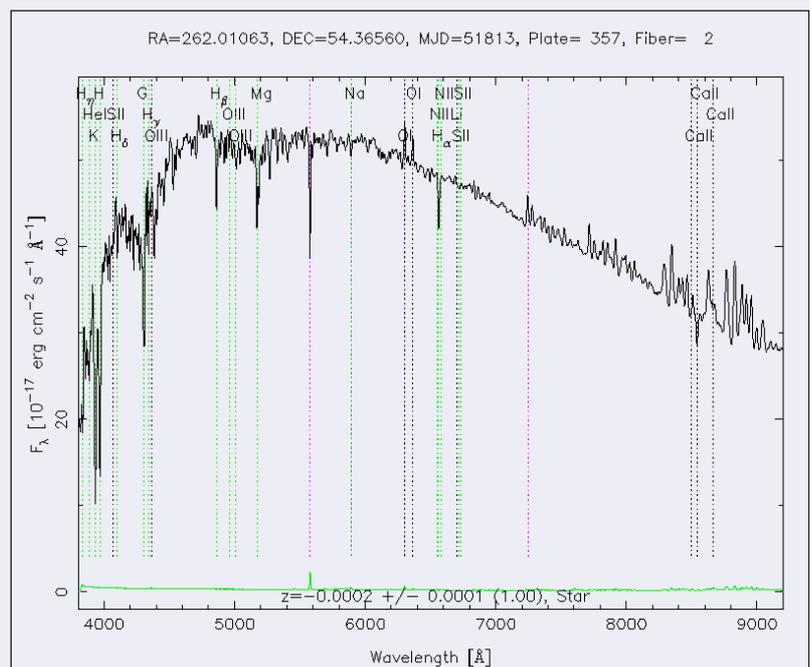
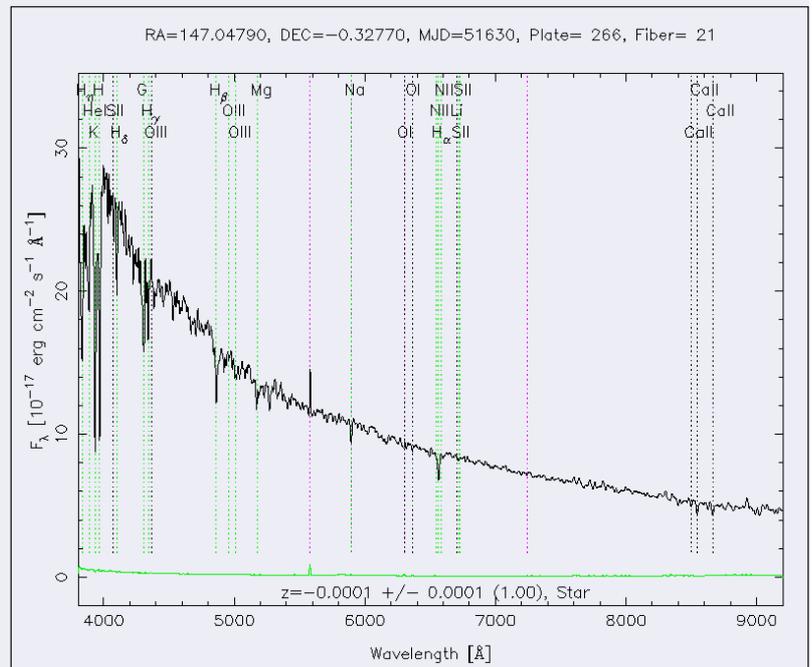


- 4.1 Qual das fotos corresponde ao que seria possível observar com um telescópio óptico?
- 4.2 Qual das fotos registou radiação de menor comprimento de onda?
- 4.3 Das quatro fotos, três estão apresentadas em falsas cores. Quais são essas fotos? Porquê?

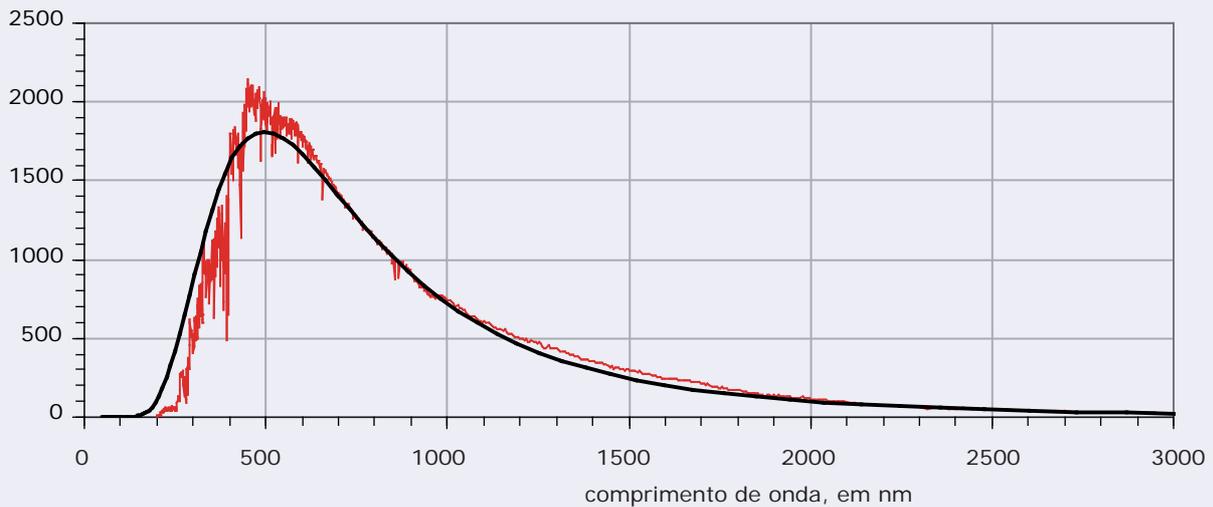
5 Os dois gráficos ao lado representam espectros de duas estrelas distintas (ver a base de dados de espectros de estrelas e galáxias em <http://cas.sdss.org>).

No eixo horizontal, representam-se os comprimentos de onda da radiação emitida pelas estrelas e no eixo vertical a intensidade da radiação de cada comprimento de onda. A unidade utilizada para exprimir o c.d.o. é o angstrom, uma unidade que vale 0,1 nanómetros.

- 5.1 Entre que comprimentos de onda, expresso em nanómetros, está indicada a constituição da luz proveniente de ambas as estrelas?
- 5.2 Qual é, aproximadamente, o c.d.o. da radiação mais intensa emitida por cada uma das estrelas?
- 5.3 Utilize a lei de Wien para estimar a temperatura de cada uma das estrelas.
- 5.4 Essa radiação é visível ou não visível? Fundamente a resposta, consultando a imagem do espectro visível (em baixo).
- 5.5 O espectro de uma estrela funciona como uma “impressão digital” da estrela. Qual é o significado desta afirmação?

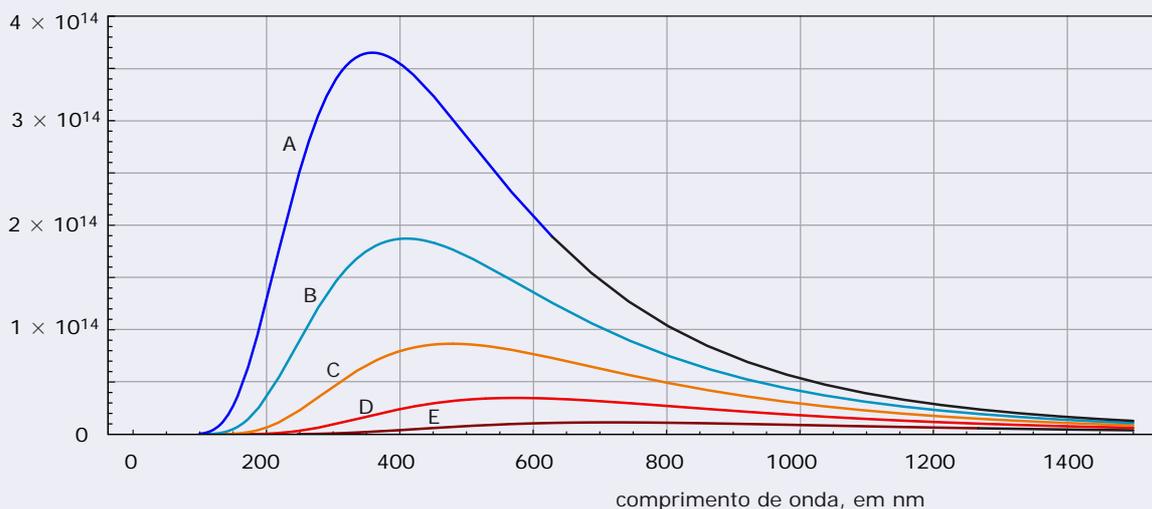


intensidade relativa



- 6 A imagem acima mostra o espectro da radiação solar no topo da atmosfera e a função matemática que descreve a radiação emitida por um corpo a 5855 K.
- 6.1 Qual é a cor da linha que representa o espectro solar?
 - 6.2 Qual é, aproximadamente, o c.d.o. da radiação mais intensa do espectro solar?
 - 6.3 Utilize o valor desse c.d.o. para estimar a temperatura do Sol.
 - 6.4 A radiação que atinge a superfície terrestre não inclui radiação de certos comprimentos de onda da radiação que atinge a alta atmosfera. Porquê?
- 7 A imagem abaixo mostra as funções matemáticas que descrevem a radiação emitida por corpos às seguintes temperaturas: 4000 K; 5000 K; 6000 K; 7000 K; 8000 K.
- 7.1 Faça a correspondência entre as diversas funções e a letra que identifica cada curva.
 - 7.2 Calcule o c.d.o. da radiação mais intensa emitida por cada um dos corpos.
 - 7.3 Construa um gráfico da relação entre o c.d.o. da radiação mais intensa e a temperatura do corpo.
 - 7.4 Que relação de proporcionalidade existe entre o c.d.o. da radiação mais intensa e a temperatura do corpo?
 - 7.5 Utilize o gráfico que construiu para estimar o valor da temperatura de um corpo cuja radiação mais intensa que emite tem 380 nm de c.d.o.
 - 7.6 De acordo com a Lei de Stephan-Boltzmann, quantas vezes maior deve ser a potência emitida pelo corpo a 8000 K do que a potência emitida pelo corpo a 4000 K, se a área dos dois corpos for igual? Fundamente a resposta.

intensidade relativa

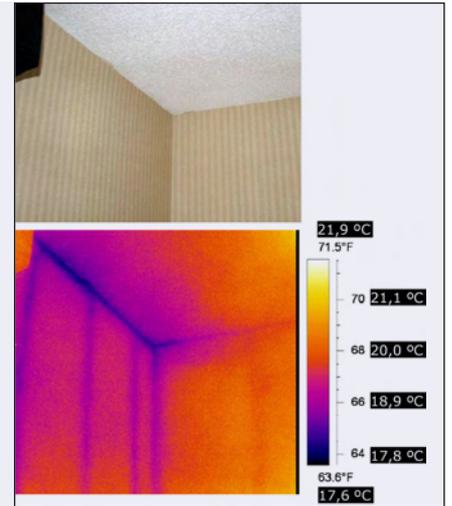


8 As fotos ao lado mostram um canto de uma sala com problemas de isolamento térmico. Em cima, foto com radiação visível. Em baixo, foto com uma câmara de radiação infravermelha, com uma escala de temperaturas.

8.1 As cores da foto de baixo são cores falsas. Porquê?

8.2 A que deve a existência de diferentes "cores" na foto de infravermelhos?

8.3 Em que zonas da imagem é possível identificar que o isolamento térmico está mal feito? Fundamente a resposta.



A Terra como sistema termodinâmico: balanço energético da Terra

9 Observe com atenção a figura em baixo. Todas as quantidades estão expressas em W/m^2 .

9.1 Que está representado nesta figura?

9.2 Qual é a percentagem da radiação solar que atinge a Terra que é reflectida para o espaço?

9.3 Qual é a percentagem da radiação solar que atinge a Terra que é absorvida pelo solo e pelos oceanos?

9.4 Compare a energia transferida para a Terra com a energia transferida pela Terra para o espaço.

9.5 Compare a energia recebida pelos gases presentes na atmosfera com a energia transferida por esses gases para o espaço e para a superfície terrestre.

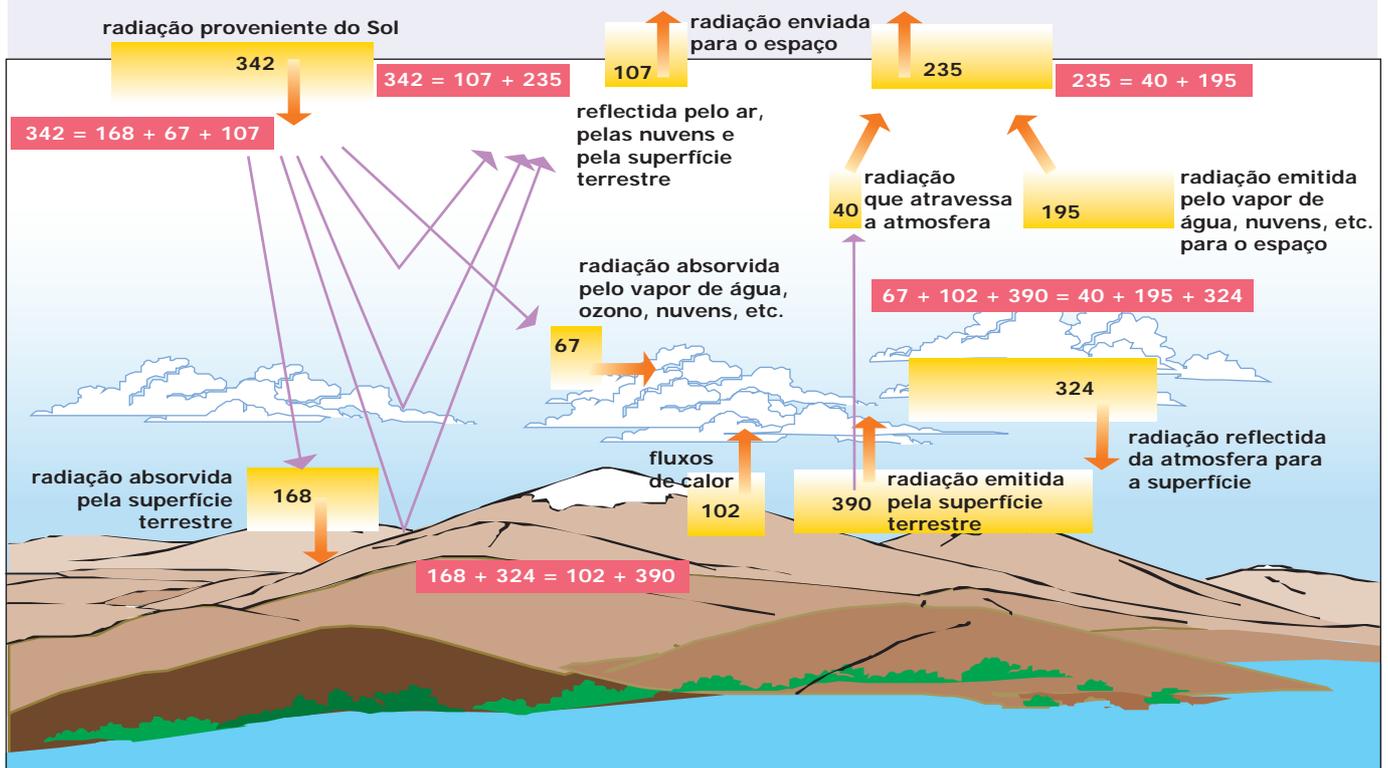
9.6 Compare a energia recebida pela superfície terrestre com a energia transferida pela superfície para a atmosfera e para o espaço.

9.7 Que sucederia na Terra se o nosso planeta recebesse mais energia do que a que transfere para o espaço?

9.8 Que transferência de energia é provocada pelo chamado efeito de estufa?

9.9 Que características físicas tem a radiação que atinge a superfície terrestre? E que características físicas tem a radiação que a superfície terrestre emite?

9.10 Que implicações tem essa diferença entre a radiação que a superfície terrestre recebe e a que emite?



10 A composição da atmosfera influencia o clima na Terra. Quando há erupções vulcânicas, como a representada na figura, são emitidos gases e poeiras.



10.1 Como se explica a influência da composição da atmosfera no clima?

10.2 Em certas erupções vulcânicas, os gases e as poeiras emitidas são suficientes para transformar “o dia em noite” nas regiões próximas do vulcão. Que influência pode ter uma erupção desse tipo na temperatura média nessas regiões? Essa influência será muito duradoura ou temporária? Fundamente a resposta.

11 O efeito de estufa tem, em certos meios de comunicação, uma conotação fortemente negativa.

11.1 Que aconteceria à temperatura na superfície terrestre se não existisse efeito de estufa? É justificada essa conotação negativa do efeito de estufa?

11.2 Que características têm os gases com efeito de estufa, no que diz respeito à sua permeabilidade à radiação?

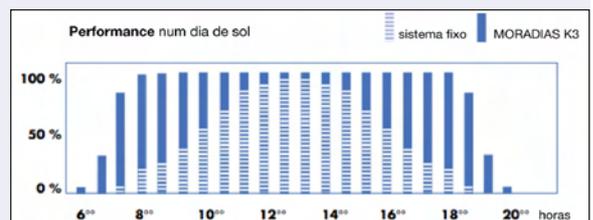
11.3 Que acontecerá à temperatura na superfície terrestre se o efeito de estufa aumentar significativamente? O que é que pode provocar o aumento do efeito de estufa?

A radiação solar na produção de energia eléctrica

12 Em duas ou três frases, explique como é que energia da radiação solar é transformada em energia da corrente eléctrica num painel fotovoltaico.

13 Que variáveis influenciam, em cada instante, a potência de um painel fotovoltaico?

14 Em Fevereiro de 2007, a empresa portuguesa <http://www.ws-energia.com> tinha para venda sistemas fotovoltaicos (“K3”) para moradias com 12 módulos instalados, num seguidor solar, com 15 m² de superfície orientável e com 2,4 kW de potência capaz de produzir 4300 kWh por ano (preço: 16.355,00 €).



14.1 Que se pode concluir da análise do gráfico ao lado, fornecido pela empresa?

14.2 Qual é a vantagem de incluir um seguidor solar? E qual é a desvantagem?

14.3 Qual é a potência por m² dos painéis fotovoltaicos?

14.4 Admita que 1 kWh custa 0,10€ na rede eléctrica nacional. Qual é o custo de 4300 kWh?

14.5 Considerando apenas os custos iniciais, durante quantos anos deveria funcionar o sistema fotovoltaico K3 para esse custo inicial ser equivalente ao custo da energia na rede eléctrica nacional?

14.6 Que vantagens ambientais apresentam os painéis fotovoltaicos?

15 Um certo tipo de painéis fotovoltaicos tem um rendimento médio de 10% e estão numa zona em que a potência média da radiação solar é 400 W/m².

15.1 Que área deve ter o painel para se obter uma potência de 1,0 kW?

15.2 Admita que o painel pode produzir energia eléctrica durante 12 h por dia, em média, durante um ano. Que quantidade de energia produz durante um ano?



1.2

A energia no aquecimento e arrefecimento de sistemas



Conceitos-chave nesta secção:

transferência de energia como calor

- condução térmica
 - corrente térmica e lei de Fourier
 - condutividade térmica
- convecção térmica

trabalho e aquecimento

- experiência de Joule
- trabalho de agitação
- calor e energia, um debate do século XIX

energia interna

- variação da energia interna
 - calor
 - trabalho
 - radiação

Primeira Lei da Termodinâmica

- como contabilizar a variação da energia interna
- conservação da energia

transformações irreversíveis

- espontaneidade
- entropia e desordem microscópica

Segunda Lei da Termodinâmica

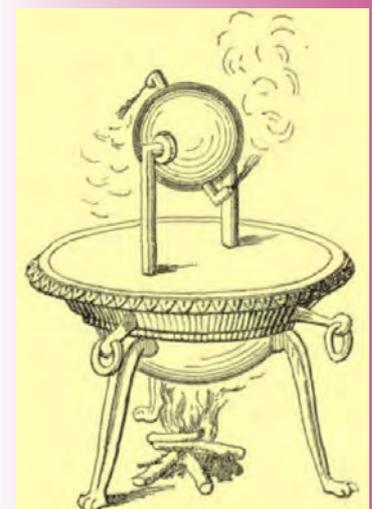
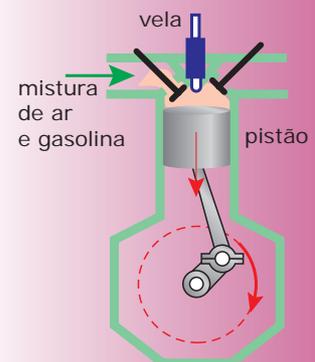
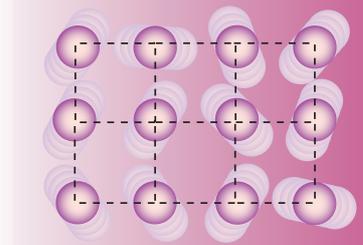
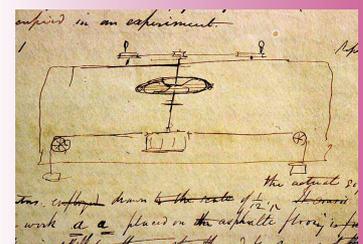
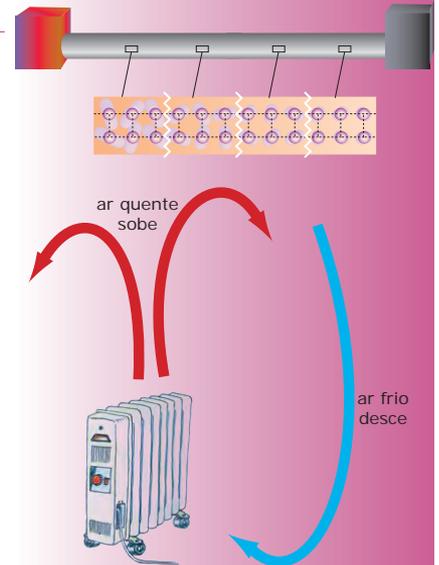
- aumento da entropia em sistemas isolados

obtenção de trabalho a partir de variações de energia interna

- máquinas térmicas
 - rendimento

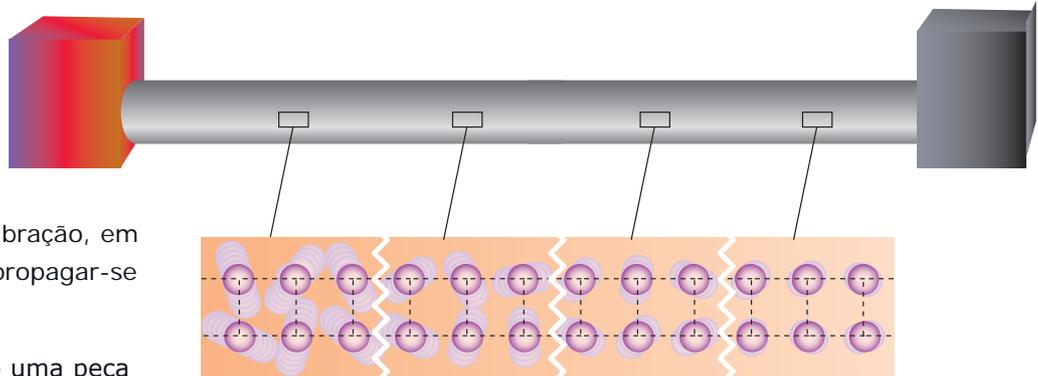
utilização de trabalho para diminuir a energia interna

- máquinas frigoríficas
 - eficiência



Transferência de energia por condução térmica

Os sólidos são constituídos por partículas que *vibram permanentemente em torno das suas posições médias*. Quanto maior for a temperatura de um sólido, mais rápida é essa vibração, em média. Essa agitação pode propagar-se ao longo do sólido.



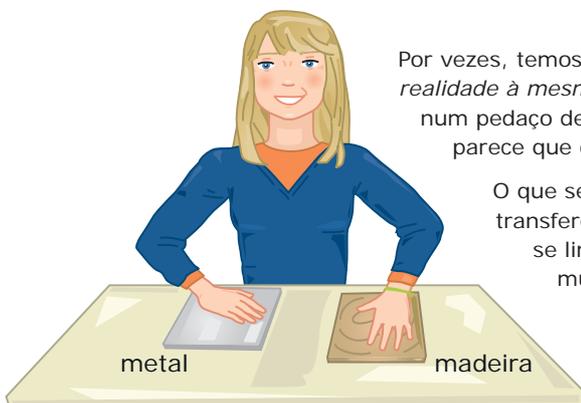
Por exemplo, aquecendo uma peça de metal numa ponta, os iões da rede cristalina do metal começam a vibrar mais rapidamente nessa zona, vibração essa que agita os iões vizinhos, propagando-se assim ao longo de todo o pedaço de metal. Este processo de transferência de energia designa-se por **condução térmica**.

Nos sólidos não metálicos, em que não há uma estrutura cristalina como nos metais, a condução térmica é reduzida. É o que sucede, por exemplo, na madeira e na cortiça que são, por isso, utilizados como isolantes térmicos.

Nos líquidos — onde também não há estrutura cristalina — a condutividade térmica é inferior à dos sólidos metálicos. E nos gases a condutividade térmica é ainda menor, uma vez que as partículas dos gases estão muito afastadas umas das outras, comparativamente com as dos líquidos e as dos sólidos.

Um modelo da transferência de energia por condução térmica numa barra que une um corpo quente com um corpo frio:

- As partículas do lado mais quente da barra agitam-se, em média, mais rapidamente, e as partículas do lado mais frio agitam-se, em média, mais lentamente;
- Estas partículas mais agitadas vão colidindo com as partículas vizinhas, transferindo para elas parte da sua energia...;
- Estas colisões entre partículas vizinhas vão-se repetindo ao longo da barra em que ocorre a condução térmica...;
- Quando todas as partículas se agitam, em média, do mesmo modo, deixa de haver condução de calor.



Por vezes, temos a sensação de frio e quente com objectos que *estão, na realidade à mesma temperatura*. Por exemplo, tocando numa peça de metal e num pedaço de madeira (que estão em equilíbrio térmico com o ar da sala), parece que o metal está frio e a madeira está mais quente. Falso!

O que se passa é que o metal é bom condutor térmico e, portanto, a transferência de energia da mão para o metal dá-se continuamente, não se limitando à zona de contacto. Sentimos, assim, a mão a arrefecer muito mais porque transfere energia continuamente para o metal, ao contrário do que sucede com a mão que está em contacto com a madeira, que é um material isolador térmico. Na madeira, a energia que esta recebe da mão fica localizada na zona de contacto e, rapidamente, esta zona fica à temperatura da mão.



- 1 Explicar em duas ou três frases o que é a condução térmica.
- 2 A condutividade térmica dos gases é baixa, comparada com a dos sólidos. Como é possível explicar esta diferença?
- 3 A borracha tem baixa condutividade térmica. Que hipótese é razoável formular acerca do modo como se organizam as partículas numa amostra de borracha?

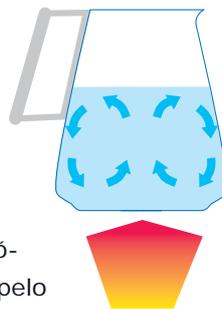
Transferência de energia por convecção térmica

Apesar da condutividade térmica de líquidos e gases ser relativamente baixa, há grandes fluxos de calor em líquidos e gases como, por exemplo, no ar. Mas esse fluxo de calor ocorre, por convecção térmica, não por condução.

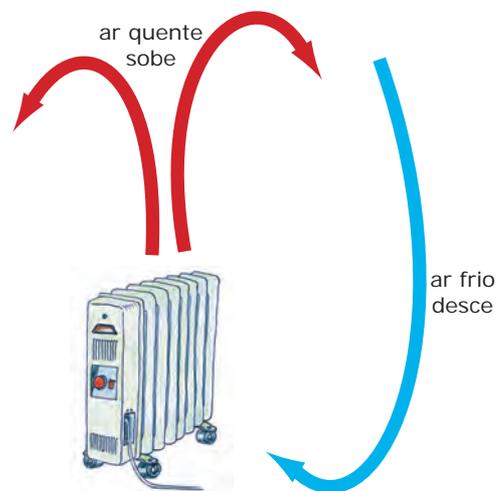
A **convecção** é um **processo de transferência de energia devido ao movimento de partes de um líquido ou de um gás numa certa zona**. Por exemplo, numa sala com um aquecedor ou uma lareira:

- 1 O ar perto da lareira é aquecido...
- 2 Esse ar mais quente sobe até ao tecto (o ar quente é menos denso que o ar frio)...
- 3 O ar que sobe até ao tecto, começa a arrefecer, porque está mais longe da lareira...
- 4 Entretanto, o ar mais frio de outras zonas da sala aproxima-se da lareira...
- 5 O ar que se aproxima da lareira é aquecido...
- 6 Esse ar mais quente sobe até ao tecto, arrefecendo...
- 7 E assim sucessivamente.

A convecção também ocorre em qualquer recipiente onde se aquece um líquido. Numa cafeteira com água, a água mais perto da fonte de calor é aquecida, ficando menos densa (as suas partículas ficam, em média, mais afastadas). Como diminui a densidade, a água sobe na cafeteira. À medida que sobe, a água quente vai transferindo energia para as regiões vizinhas, arrefecendo, por isso, ela própria. Ao arrefecer, a sua densidade aumenta, pelo que acaba por descer, voltando ao fundo, onde recebe novamente energia... Torna a ficar menos densa, a subir, a arrefecer...



A convecção térmica é o processo de transferência de energia pelo calor predominante nos fluidos, ou seja, nos líquidos e nos gases. Apenas nos fluidos pode haver movimentos ascendentes e descendentes.



São as correntes de convecção térmica ascendentes de ar quente que permitem que os parapentes possam subir e manter-se no ar. O ar é aquecido junto ao solo e sobe, uma vez que é menos denso que o ar frio.



- 1 Explicar em três ou quatro frases o que é a convecção térmica.
- 2 Porque é que a convecção térmica é praticamente inexistente nos sólidos?
- 3 Por vezes, em águas marítimas pouco profundas, observa-se que pequenos animais andam numa "roda viva", subindo e descendo junto às rochas. Tendo em conta que na água do mar pode haver correntes de convecção, faça um esquema do movimento dos animais e explique porque se movem eles desse modo.

Como medir fluxos de calor por condução: corrente térmica entre dois corpos e lei de Fourier

A **corrente térmica** é uma grandeza física que **mede a rapidez com que se transfere energia, na forma de calor, entre dois corpos**. Esta grandeza pode ser expressa através da equação seguinte:

$$\phi = \text{corrente térmica} = \frac{\text{energia transferida como calor}}{\text{tempo que demora a transferência}}$$

Por exemplo, se entre dois corpos A e B se transferem 1000 J de energia em 20 s, a corrente térmica vale

$$\phi = \text{corrente térmica} = \frac{1000 \text{ J}}{20 \text{ s}} = 50 \text{ J/s}$$

A corrente térmica ϕ depende, evidentemente, das características do material condutor térmico.

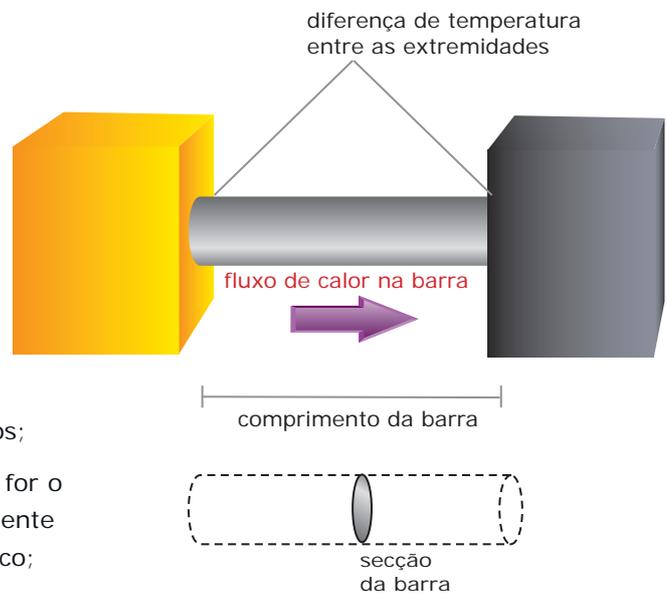
Medições rigorosas permitem concluir que, para um condutor térmico em forma de barra ou paralelepípedo colocado entre dois corpos a temperaturas diferentes:

- A corrente térmica é directamente proporcional à diferença de temperaturas ΔT entre esses corpos;
- A corrente térmica ϕ é tanto menor quanto maior for o comprimento ℓ do condutor; em rigor, é inversamente proporcional ao comprimento ℓ do condutor térmico;
- A corrente térmica é tanto maior quanto mais largo for o condutor; em rigor, é directamente proporcional à área A da secção recta do condutor térmico.

Estas relações de proporcionalidade podem ser expressas numa única equação, que traduz a chamada **lei de Fourier**:

$$\phi = k \frac{A}{\ell} \Delta T$$

Nesta equação, k é uma constante de proporcionalidade chamada **condutividade térmica**. A condutividade térmica, uma grandeza física muito importante na engenharia de construção, tem valores diferentes para os diversos materiais condutores, sendo maior para os bons condutores térmicos. Por exemplo, a condutividade térmica do ferro é 80 unidades SI, enquanto a condutividade térmica do cimento é 100 vezes menor (apenas 0,8 unidades).



A corrente térmica é tanto maior...

- quanto maior for a diferença de temperatura nos extremos da barra (é directamente proporcional à diferença de temperaturas);
- quanto menor for o comprimento da barra (é inversamente proporcional ao comprimento da barra);
- quanto maior for a área da secção da barra (é directamente proporcional à área da secção).



- 1 Que significa dizer que a corrente térmica numa barra metálica é de ϕ joules por segundo?
- 2 De que factores depende a corrente térmica numa barra?
- 3 A corrente térmica numa barra é 1000 J/s. Mantendo todas as restantes variáveis constantes, como varia a corrente térmica se duplicar a diferença de temperaturas nos extremos da barra?
- 4 A corrente térmica numa barra é 1000 J/s. Mantendo todas as restantes variáveis constantes, que valor deve ter a corrente térmica noutra barra idêntica mas de comprimento duplo?

Bons e maus condutores térmicos: condutividade térmica de um material

É muito importante conhecer que materiais são bons condutores térmicos e quais são maus condutores térmicos. Por exemplo, os engenheiros civis e os arquitectos têm que escolher materiais adequados para que um edifício não seja muito quente no Verão e muito frio no Inverno. Para tal precisam de conhecer as características térmicas dos materiais.

A **condutividade térmica k** permite descrever quantitativamente as características térmicas dos materiais, informando-nos com rigor se os materiais são bons ou maus condutores de calor.

A unidade SI desta grandeza pode ser obtida a partir da equação da lei de Fourier. Expressando as grandezas nas respectivas unidades SI, temos:

$$\begin{aligned} \phi &= k \frac{A}{\ell} \Delta T \\ \frac{\text{J}}{\text{s}} &= k \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \text{K} \\ \frac{\text{J}}{\text{s}} &= k \text{ m K} \\ \frac{\text{J}}{\text{s m K}} &= k \\ k &= \frac{\text{J}}{\text{s m K}} = \frac{\text{joule}}{\text{segundo} \times \text{metro} \times \text{kelvin}} \\ &= \frac{\frac{\text{J}}{\text{s}}}{\text{m K}} = \frac{\text{W}}{\text{m K}} = \frac{\text{watt}}{\text{metro} \times \text{kelvin}} \end{aligned}$$

Portanto, a unidade SI de condutividade térmica é o joule por segundo por metro por kelvin, $\text{J}/(\text{s m K})$, que é idêntica ao watt por metro por kelvin, $\text{W}/(\text{m K})$. Como a variação de temperatura de 1 kelvin é igual a 1 grau Celsius, os valores de condutividade são iguais quer se use kelvins quer se use graus Celsius para exprimir a temperatura.

Assim, quando se diz que a condutividade térmica do aço é $80 \text{ W}/(\text{m K})$, quer-se dizer que entre os extremos de uma barra de aço com 1 metro de comprimento e 1 metro quadrado de secção, passam 80 joules de energia por segundo quando a diferença de temperatura entre os extremos da barra for de $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Condutividade térmica k de diversos materiais, em $\text{W}/(\text{m K})$	
Prata	427
Cobre	397
Alumínio	238
Latão	109
Aço	80
Chumbo	35
Cimento	0,8
Vidro	0,8
Água	0,6
Areia (seca)	0,3
Borracha	0,2
Madeira	0,08
Cortiça	0,06
Lã	0,04
Ar	0,023



A condutividade térmica do aço é centenas de vezes superior à da madeira...



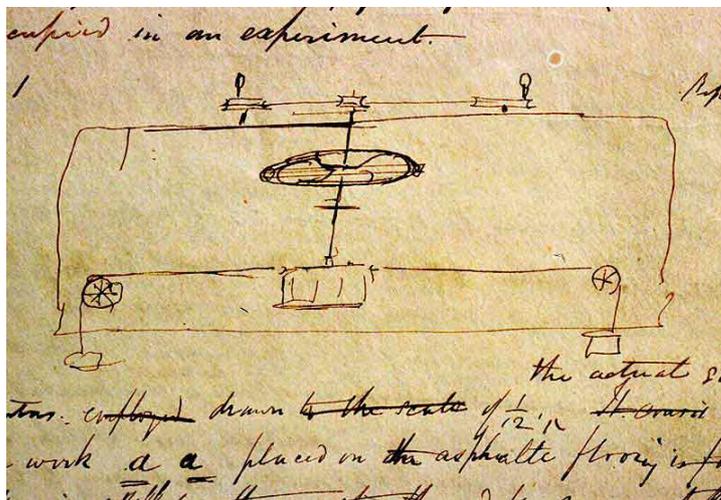
- 1 Que significa dizer que a condutividade térmica do chumbo é 45 watts por metro por kelvin?
- 2 Qual é a condutividade térmica do chumbo em watts por metro e por grau Celsius? Fundamente a resposta.
- 3 Verifique que a corrente térmica numa parede de cimento de 10 m^2 de área e com 20 cm de espessura é de $200 \text{ W}/(\text{m K})$, quando a diferença de temperaturas entre as duas faces da parede é $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Trabalho e aquecimento: a experiência de Joule

Haverá algum processo de aquecer água sem colocar a água em contacto com uma fonte de calor? Esta parece uma pergunta absurda, mas de facto não o é! Todos nós aquecemos as mãos num dia frio esfregando-as uma na outra...

De facto, há muitas maneiras de aquecer água. No século XIX, o inglês James Prescott Joule (1818-1889) mostrou que se podia aquecer água *agitando a água*. O esquema ao lado, da autoria de Joule, mostra como fazê-lo: penduram-se dois corpos, ligados a um sistema rotativo que faz mover umas pás no interior de um recipiente com água e... zás, a água aquece!

Medindo o trabalho realizado pelos corpos e a variação de temperatura, Joule conseguiu determinar qual é a energia mecânica que é preciso fornecer para que tudo se passe como se a água seja aquecida por uma chama. Esse valor (o chamado "equivalente mecânico da caloria") é 4,18 joules por grama e por grau Celsius. Ou seja, para que 1 grama de água aumente 1 °C de temperatura necessita de ser feito o trabalho de 4,18 joules, através da queda dos corpos (ou por outro processo).



A experiência de Joule é uma das mais importantes da História da Ciência. Pela primeira vez, mostrava-se que calor e trabalho eram duas formas equivalentes de transferir energia. Em cima, um desenho de Joule explicando o dispositivo que utilizou e à direita uma reprodução do sistema de aquecimento (calorímetro). A rotação das pás, provocada pela queda de corpos ligados ao fio, aquecia a água no interior do calorímetro.



Como aquecer água fria que esteja numa garrafa termo? Uma maneira consiste em **agitar intensamente a garrafa**. O movimento de agitação, se for suficientemente enérgico, provoca o aquecimento da água. Este aquecimento não é, em geral, muito grande, mas é real, podendo ser detectado com a ajuda de um termómetro. Diz-se que se *transfere energia para o sistema realizando trabalho*, porque se *aplicaram forças e houve movimento*. Este trabalho é chamado **trabalho de agitação**.



- 1 Qual é a importância da experiência de Joule?
- 2 É possível aquecer a água num recipiente termicamente isolado? Fundamente a resposta?
- 3 Uma "varinha mágica" de cozinha, agitando um copo de água, aquece a água? Descreva um modelo a nível microscópico que fundamente a sua resposta.



O que é o calor? E a energia? Um debate científico do século XIX

Foi só no século XIX que se chegou à conclusão de que o calor é uma forma de transferência de energia. Antes, **julgava-se que o calor era uma substância** — o chamado **calórico**. Dizia-se que *um corpo mais quente tinha mais calórico do que um corpo mais frio*. Os fenómenos térmicos explicavam-se por trocas de calórico entre os corpos.

Benjamin Thompson (1753-1814), mais tarde Conde de Rumford, um norte-americano que emigrou para a Europa porque durante a Guerra da Independência dos EUA tomou o partido dos ingleses, foi o primeiro a concluir que o calor não era uma substância (e a convencer os outros cientistas de que a sua ideia era correcta!). Como responsável pela produção de canhões para um príncipe alemão, teve oportunidade de observar que o metal dos canhões aquecia continuamente, sem parar, quando era perfurado pelas brocas para fazer o canhão. Logo, o calor não podia ser uma substância, pois parecia inesgotável, desde que a broca continuasse a perfurar o metal.

Em 1842, um médico alemão, Julius Mayer, com base na observação do corpo humano, formulou a ideia da existência de uma "indestrutibilidade das forças da Natureza" (nessa época, "força" era sinónimo de "energia" ao contrário do que acontece hoje em dia). Mayer obteve pela primeira vez o chamado "equivalente mecânico" do calor, isto é, o valor da energia mecânica necessária para obter um aumento de temperatura de um dado material igual ao produzido por uma caloria, tal como Joule faria um ano depois.

Alguns anos depois, outro médico alemão, Hermann Helmholtz, escreveu um artigo célebre intitulado "Sobre a conservação da força", onde dizia que "é impossível criar uma força motriz a partir do nada". E disse mais: "Se trabalho, calor e electricidade se podem transformar uns nos outros, é porque não passam de formas diferentes de algo que não varia, qualquer coisa que ora vem sob a forma de calor, ora sob a forma de luz, ora sob a forma de trabalho mecânico". Defendeu essa ideia com argumentos matemáticos, o que contribuiu bastante para que ela fosse levada a sério. Estavam dados os grandes passos para a ideia de energia e para a lei da conservação da energia.



Benjamin Thompson foi o primeiro cientista que conseguiu convencer a comunidade científica a considerar o calor como energia e não como uma "substância". Teve um papel importante na ciência no início do século XIX, tendo estado ligado à criação de sociedades científicas que contribuíram para tornar a ciência uma profissão como outra qualquer.

Foi ainda um inventor de instrumentos para a cozinha e para o aquecimento de casas, nomeadamente de lareiras e chaminés mais eficientes. É-lhe também atribuída a invenção da roupa térmica interior.



- 1 Que observações poderão ter levado alguns pensadores até ao século XIX a aceitar a teoria que afirmava que o calor era uma substância?
- 2 Thompson apresentou argumentos convincentes para mostrar que o calor não poderia ser uma substância. Qual era o raciocínio de Thompson?
- 3 As ideias de Thompson sobre o calor não eram coerentes com o aquecimento provocado pela radiação solar. Porquê?

Primeira Lei da Termodinâmica e energia interna

Se apenas é possível medir a variação de energia interna de um sistema, como se pode exprimir essa variação?

Uma regra ou lei da Termodinâmica, a chamada **Primeira Lei da Termodinâmica**, mostra como se calcula a variação de energia interna:

- a variação da energia interna de um sistema é igual à soma do trabalho que se faz sobre o sistema (ou que o sistema faz sobre o exterior) com o calor que recebe (ou que cede) e com a radiação que recebe (ou emite).

A Primeira Lei da Termodinâmica é, simplesmente, uma forma de escrever a lei da conservação da energia. O aumento ou diminuição de energia interna do sistema é exactamente igual à energia que o sistema recebe ou cede...

$$\Delta E_{\text{interna}} = W + Q + R$$

variação de energia interna do sistema

radiação absorvida pelo sistema
 ou
 radiação emitida pelo sistema

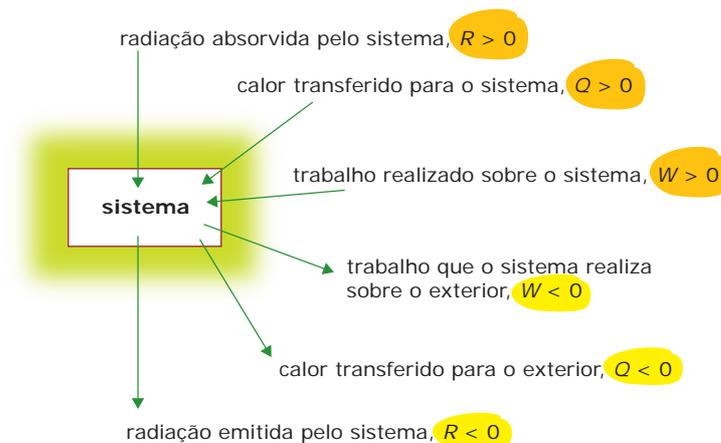
calor transferido para o sistema
 ou
 calor transferido para o exterior

trabalho realizado sobre o sistema
 ou
 trabalho que o sistema realiza sobre o exterior

Nesta “contabilidade” de energia que “entra” ou “sai” do sistema, considera-se que:

- O trabalho, o calor e a radiação **forne-**
necidos ao sistema são contabilizados como valores **positivos**.
- O trabalho, o calor e a radiação **cedi-**
dos pelo sistema ao exterior são contabilizados como valores **negativos**.

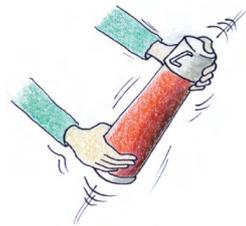
Nos sistemas isolados, não há trocas de energia com o exterior. Assim, num sistema isolado, tudo fica mais simples: como o sistema não recebe nem transfere energia para o exterior, seja na forma de trabalho, de calor ou de radiação, não há variação de energia interna.



- Que significa dizer que uma grandeza se conserva? A energia interna de um sistema conserva-se sempre? Fundamente a resposta.
- Qual é a variação de energia interna de um sistema que recebe 1000 J de calor e realiza 800 J de trabalho sobre o exterior?
- Um sistema não isolado pode manter a sua energia interna constante e ocorrerem transferências de energia? Fundamente a resposta com um ou vários exemplos.

Trabalho nos sistemas termodinâmico: alguns exemplos

Aquecer água agitando-a violentamente ou aquecer água utilizando uma corrente eléctrica são dois exemplos de transferência de energia utilizando trabalho (trabalho mecânico no primeiro caso, trabalho eléctrico no segundo caso). Como, nestes casos, *o trabalho provoca aquecimento*, diz-se que é **trabalho termodinâmico**.



Trabalho de agitação...

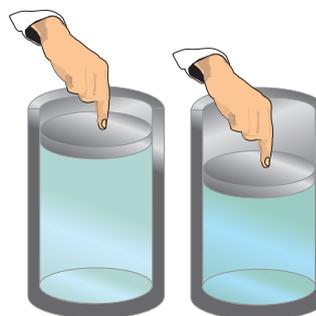
Outra forma de realizar trabalho termodinâmico consiste em *comprimir um sistema*, como quando se comprime o ar numa seringa. As forças de pressão sobre o gás (sistema) na seringa realizam trabalho, transferindo energia para o sistema. De igual modo, se o ar dentro da seringa se expandir, depois de comprimido (basta deixar de empurrar a seringa...), realiza trabalho, transferindo energia para o exterior.



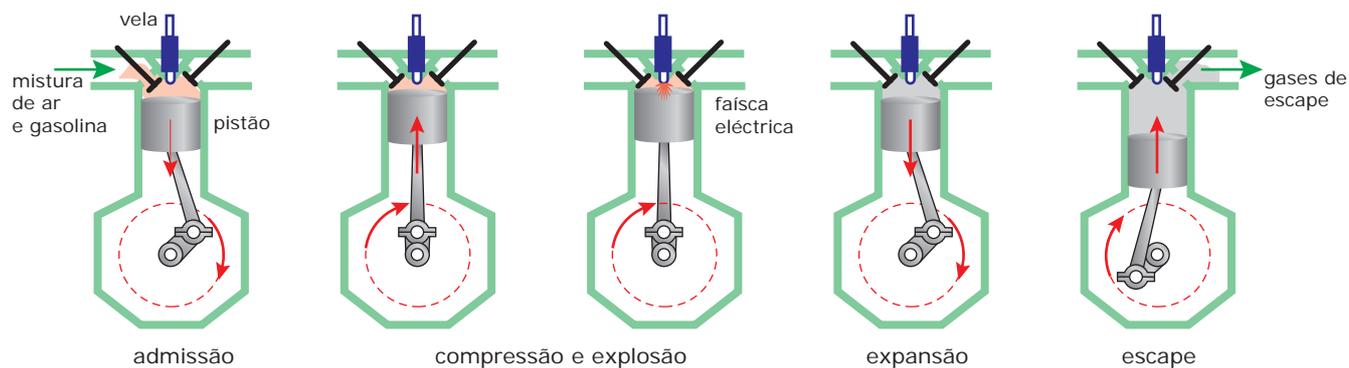
O trabalho eléctrico pode ser realizado num sistema de aquecimento que utiliza a corrente eléctrica obtida numa porta USB de um computador...

O trabalho eléctrico depende da intensidade da corrente eléctrica e da resistência do condutor, bem como do tempo que demora a corrente a passar.

O trabalho das forças de pressão num gás depende da pressão e da variação de volume. Quanto maior a pressão, maior o trabalho realizado. E quanto maior for a variação de volume, também maior é o trabalho realizado.



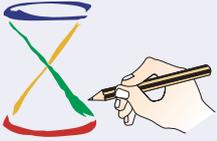
Comprimindo um gás, as forças de pressão realizam trabalho e transferem energia para o gás. Deixando de comprimir o gás, este expande-se, realizando trabalho sobre o exterior.



No motor de explosão de um automóvel, o calor obtido na câmara de combustão, devido à explosão da mistura de ar e gasolina (iniciada por uma faísca numa «vela»), é aproveitado para expandir a mistura gasosa. Esta expansão empurra um pistão ou êmbolo, realizando trabalho sobre o exterior. Após a expansão, o gás é expelido. Em seguida, entra novamente gás, que é comprimido até se voltar a dar uma nova explosão, seguida de expansão e escape. Este processo é *cíclico*: está sempre a repetir-se.

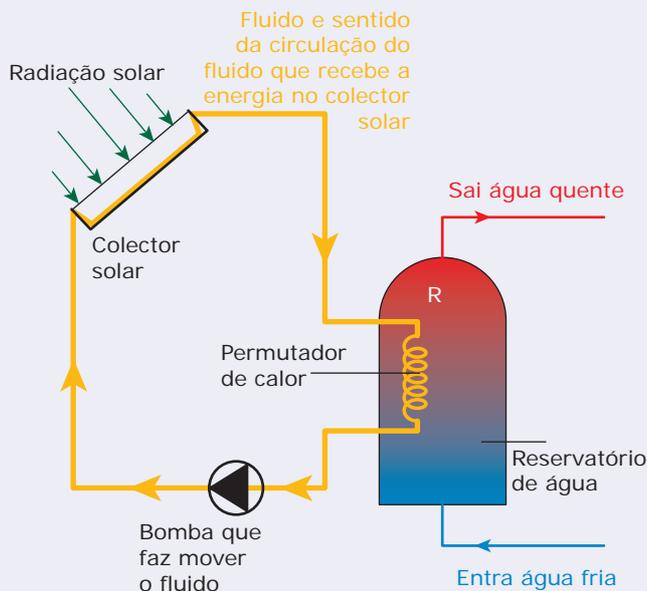


- 1 O trabalho de uma força provoca variação de energia cinética e, ou, de energia potencial... E o trabalho termodinâmico está associado a que tipo de variação de energia?
- 2 Considere um sistema constituído por um gás num recipiente fechado mas com volume variável. Pode-se aumentar a energia interna desse sistema sem o aquecer? Fundamente a resposta.
- 3 Descreva em três ou quatro frases como é que a energia potencial química da gasolina e do ar é utilizada para realizar trabalho útil num motor de combustão.



Um coletor solar é um exemplo de um sistema termodinâmico em que o aumento de energia interna do fluido que circula no sistema é devida à transferência de energia por radiação. O fluido (água e glicol, que diminui a temperatura de congelamento e que é particularmente útil nos climas frios) é aquecido pela radiação no coletor, uma caixa que possui um vidro transparente e o interior pintado de preto baço, tal como os tubos absorvedores. Uma vez aquecido no coletor, esse fluido move-se para um permutador de calor onde a água do circuito da casa é aquecida.

- 1 Porque é que os tubos absorvedores são negros?
- 2 Qual é a vantagem de colocar os tubos absorvedores numa caixa negra, coberta por um vidro transparente?
- 3 A circulação do fluido transportador faz-se, em alguns sistemas, por convecção e noutros com uma bomba auxiliar. Como se processa a circulação por convecção? Qual é a vantagem de se usar esse processo de circulação? E qual é a desvantagem?
- 4 No permutador de calor, no interior do reservatório, utilizam-se, em geral, tubos de cobre. Como se processa a transferência de energia do fluido para a água do circuito da casa? Que característica apresenta o cobre que o recomende para tal utilização?



Transformações irreversíveis, aumento da “desordem” e entropia

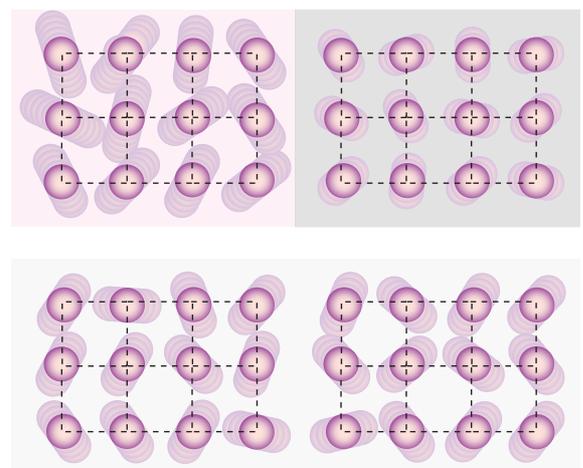
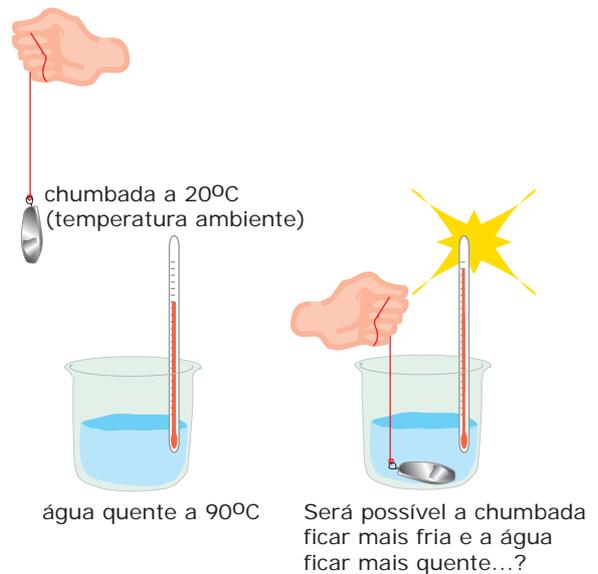
Todos sabemos que quando se colocam em contacto dois corpos a temperaturas diferentes, o que está mais quente arrefece e o que está mais frio aquece até ficarem ambos à mesma temperatura... Nunca se viu acontecer o contrário: o mais frio arrefecer e o mais quente aquecer! *E nunca se viu os dois corpos, depois de ficarem à mesma temperatura, passarem espontaneamente a ter temperaturas diferentes, um mais quente e outro mais frio...*

De modo semelhante, quando se agita água, como na experiência de Joule, a água aquece. *Mas nunca se viu a água arrefecer espontaneamente para fazer mover o agitador da água...*

Estas duas situações ilustram aquilo que os cientistas designam por **transformações irreversíveis**, ou seja, transformações que só ocorrem numa direcção, transformações que “não podem voltar atrás”. Na realidade, *todas as transformações que ocorrem espontaneamente, como as situações acima exemplificadas, são transformações irreversíveis.*

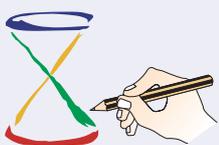
Para descrever o que acontece nas transformações, as ciências físicas usam uma grandeza chamada **entropia**, que se mede em unidades adequadas. Esta grandeza entropia é uma forma de medir a “desordem” das partículas do sistema. E, como nas transformações irreversíveis, a “desordem” das partículas aumenta sempre, então **a entropia aumenta sempre que há uma transformação irreversível.**

Por exemplo, quando um sistema constituído por dois corpos a temperaturas diferentes entram em contacto um com o outro, ambos ficam à mesma temperatura, ao fim de um certo tempo. Quando a temperatura se iguala nos dois corpos, a agitação térmica das partículas está “espalhada” de modo mais ou menos igual pelos dois corpos. Quer dizer, a “desordem” é grande em *todas* as zonas dos dois corpos. Se apenas houvesse agitação térmica numa zona, a “desordem” seria menor. Ou seja, o contacto térmico entre corpos a temperatura diferente aumenta a entropia dos dois corpos.



Quando dois corpos a temperaturas diferentes são colocados em contacto, há um fluxo de calor do que tem maior temperatura para o que está a temperatura inferior, *até se atingir o equilíbrio térmico.*

Este fluxo de calor do corpo mais quente para o corpo mais frio corresponde a um aumento da “desordem” das partículas. De facto, se o corpo mais frio arrefecesse ainda mais e o corpo mais quente aquecesse ainda mais, haveria uma diminuição da desordem das partículas, porque as mais agitadas se concentravam apenas no corpo mais quente. Ora, isso é altamente improvável...



- 1 Um fenómeno espontâneo é sempre um fenómeno irreversível. Qual é o significado desta afirmação?
- 2 Imagine que um corpo frio transfere energia espontaneamente para um corpo quente, aquecendo-o ainda mais. Este facto poderia estar de acordo com a lei da conservação da energia? Fundamente a resposta.
- 3 Como é que a Física explica o facto de um corpo frio não poder ceder calor a um corpo quente?

Degradação da energia, entropia e Segunda Lei da Termodinâmica

A energia conserva-se, sempre! Mas, após o seu uso, degrada-se, fica menos utilizável porque se “espalha” pelas partículas dos corpos, aumentando a sua “desordem”, aumentando a entropia...

Por exemplo, quando se queima uma certa quantidade de gás, pode aumentar-se a temperatura de outros corpos. A energia interna do gás é energia “concentrada”, em partículas com moléculas com fortes ligações químicas no seu interior. Quando estas moléculas reagem, as ligações quebram-se, transfere-se energia, e fica tudo mais “desordenado”. Dizemos que a entropia aumentou.

A entropia está constantemente a ser “produzida” na Natureza, onde as transformações irreversíveis existem por todo o lado. A entropia é “gratuita”, ao contrário da energia. Não precisamos de fazer nada para que a entropia aumente... basta deixar o tempo correr.

A chamada **Segunda Lei da Termodinâmica** afirma precisamente isso:

- **a entropia de um sistema isolado aumenta sempre que haja qualquer transformação.**

O aumento da entropia é, assim, uma espécie de “seta do tempo”: num sistema isolado, à medida que o tempo passa, a entropia aumenta...

Mas, note-se, esta lei nada diz sobre a entropia quando o sistema não está isolado. **Em sistemas não isolados, a entropia pode aumentar, diminuir ou manter-se constante.**

Por exemplo, um organismo vivo não está evidentemente isolado do seu ambiente, pelo que a sua entropia pode diminuir. Mas isto só é possível à custa do fornecimento constante de energia do exterior. Quando um sistema não está isolado, pode ficar cada vez mais organizado graças à energia que obtém do exterior, como sucede com os seres vivos. Mas, se considerarmos a entropia total do sistema e do exterior, esta entropia total aumenta necessariamente.

entropia

entropia

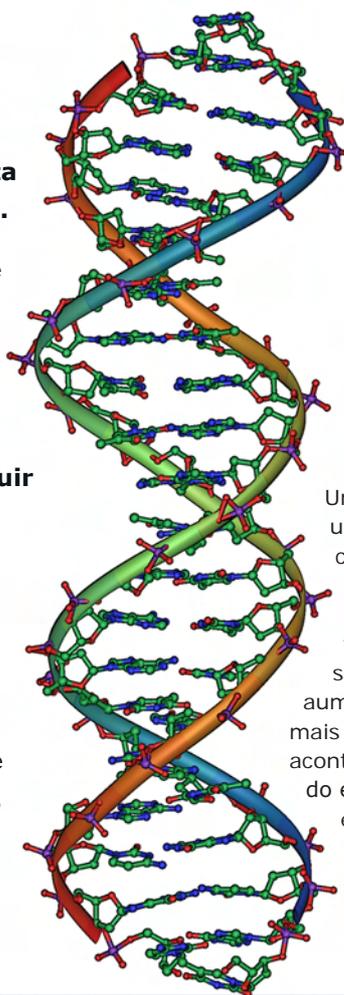
entropia

entropia

entropia

entropia

A entropia é uma medida da “desordem” do sistema. Basta deixar o tempo correr para aumentar a entropia...



Um modelo da molécula de ADN, um tipo de molécula presente nas células de todos os organismos vivos e que contém a informação necessária para “construir” o ser vivo. Se um ser vivo fosse um sistema isolado, a sua entropia aumentaria sempre, ficando cada vez mais “desorganizado”. Para tal não acontecer, os seres vivos usam energia do exterior. Assim, diminuem a sua entropia, à custa do aumento da entropia do exterior.



- 1 A entropia é uma grandeza física. Que características do sistema mede esta grandeza?
- 2 Um sistema isolado pode diminuir a sua entropia quando ocorre uma transformação no sistema? Fundamente a resposta.
- 3 Um sistema não isolado pode diminuir a sua entropia quando ocorre uma transformação no sistema? Fundamente a resposta.

Máquinas térmicas e rendimento

As **máquinas térmicas** permitem **obter trabalho útil a partir de um fluxo de calor** entre duas fontes a temperatura diferente, uma "fonte quente" e uma "fonte fria". Por exemplo, o motor de automóvel é uma máquina térmica: a câmara onde está a mistura de ar e gasolina, após a explosão, funciona como fonte quente e o exterior funciona como fonte fria.

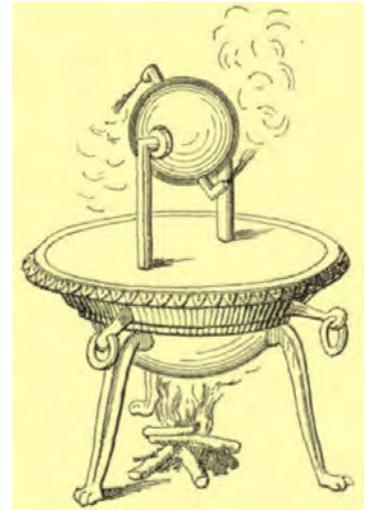
Desde a Antiguidade que se conhecia o poder do calor, mas demorou quase 2000 anos a inventarem-se processos de o aproveitar para obter trabalho. O desenvolvimento das máquinas térmicas, que ocorreu nos séculos XVIII e XIX, teve uma importância extraordinária nas sociedades: está na origem da chamada **Revolução Industrial**.

A figura abaixo esquematiza o funcionamento das máquinas térmicas. A energia obtida numa fonte de calor, Q_1 , é utilizada para realizar o trabalho W e, inevitavelmente, uma parte é transferida para o exterior, Q_2 .

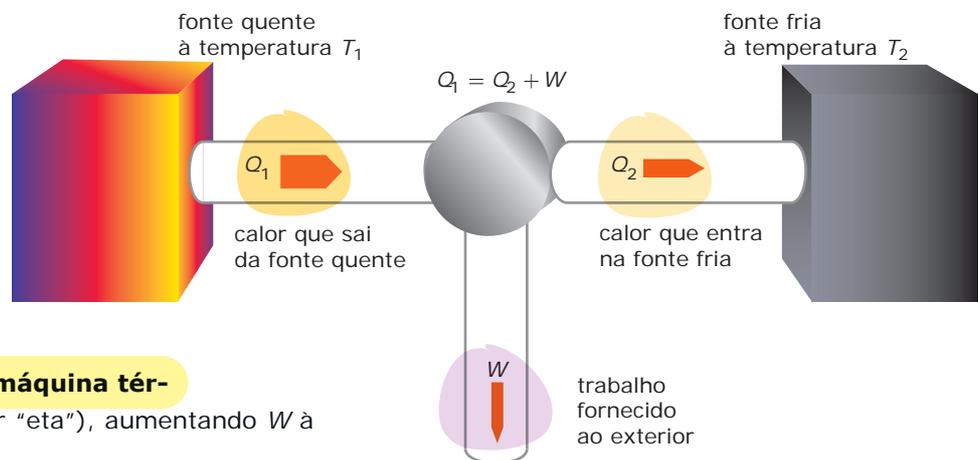
Por exemplo, num motor de explosão, há sempre uma parte da energia Q_1 obtida na explosão que surge como trabalho W (expansão do cilindro), enquanto outra parte Q_2 aquece o cilindro e a restante vizinhança, sem poder ser aproveitada para realizar qualquer trabalho útil.

Um dos objectivos dos engenheiros de máquinas é diminuir esta energia Q_2 que aquece o motor e o ambiente sem qualquer utilidade. Ou seja, querem aumentar o **rendimento da máquina térmica** (representa-se por η , ler "eta"), aumentando W à custa da diminuição de Q_2 .

O rendimento das melhores máquinas térmicas actuais é, em geral, inferior a 50% e, no caso dos motores de combustão, apenas da ordem dos 20%. Quer dizer, da energia obtida na explosão da mistura ar e gasolina, apenas 20% é aproveitada como trabalho útil.



Heron de Alexandria, que viveu há cerca de 2000 anos, escreveu vários livros onde explicava as suas invenções, nomeadamente aquela que é considerada a primeira máquina a vapor, representada na figura: uma bola metálica com duas aberturas, suspensa num eixo, roda à medida que o vapor é expulso pelas aberturas.



$$\text{rendimento} = \frac{\text{trabalho fornecido ao exterior}}{\text{calor obtido da fonte quente}}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$



- Qual é o rendimento de uma máquina térmica em que por cada 100 J de energia obtida como calor da fonte quente, 15 J são transferidos para o exterior como trabalho?
- No século XIX, o físico francês Carnot mostrou que o rendimento máximo η que é possível obter de uma máquina térmica é dado por $\eta = 1 - T_2/T_1$, onde T_1 é a temperatura da fonte quente e T_2 a temperatura da fonte fria, ambas em kelvins. Verifique que o rendimento máximo possível do motor de um automóvel é 0,78 se a temperatura na câmara de combustão do motor for 1100 °C e a temperatura ambiente for 25 °C.
- Na realidade, o rendimento típico de um motor de gasolina é apenas 15% a 25%. Porquê?

Máquinas frigoríficas e eficiência

Ao contrário das máquinas térmicas, que recebem calor da fonte quente para realizar trabalho, as **máquinas frigoríficas** recebem trabalho do exterior para obter um fluxo de calor de uma fonte fria para uma fonte quente.

Por exemplo, num frigorífico de cozinha, um motor eléctrico comprime um gás que se liquefaz. Quando deixa de estar comprimido, expande-se e, como para se expandir necessita de energia, obtém essa energia do interior do frigorífico. Em seguida, esse líquido é arrefecido em contacto com o ar da cozinha, na parte de trás do frigorífico. É por isso que um frigorífico aquece a cozinha... à medida que arrefece o interior do frigorífico.

A figura abaixo esquematiza o funcionamento das máquinas frigoríficas. Um motor eléctrico, por exemplo, realiza um certo trabalho W na compressão do gás usado no circuito frigorífico. Esse gás, quando deixa de estar comprimido, evapora-se, retirando a energia Q_2 do interior do frigorífico. No balanço total, a energia $W + Q_2 = Q_1$ acabada por ser transferida para o exterior, aquecendo-o. O "ideal" era a fonte fria (interior do frigorífico) arrefecer espontaneamente, mas já sabemos que isso é impossível...

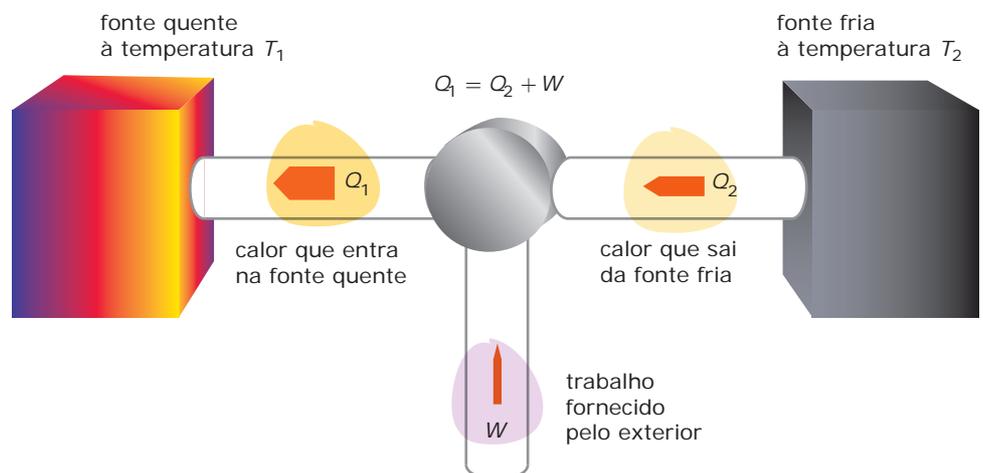
As máquinas frigoríficas são caracterizadas pela sua **eficiência**, uma grandeza que compara a energia Q_2 retirada da fonte fria com o trabalho W realizado sobre a máquina. Quanto maior for Q_2 , comparado com W , mais eficiente é a máquina frigorífica.

Um frigorífico típico tem uma eficiência de 5: quer dizer, por cada 100 J de calor retirados da fonte fria, são transferidos 20 J de trabalho do exterior para o frigorífico:

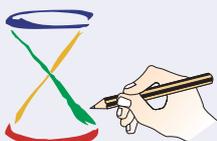
$$\text{eficiência} = \frac{100 \text{ J}}{20 \text{ J}} = 5$$



Um frigorífico funciona com um aquecedor da cozinha (a "fonte quente"), arrefecendo o interior do frigorífico (a "fonte fria"), graças ao trabalho realizado pelo exterior (o motor eléctrico)...



$$\text{eficiência} = \frac{\text{calor retirado da fonte fria}}{\text{trabalho realizado pelo exterior}} = \frac{Q_2}{W}$$



- 1 Para um frigorífico com uma eficiência de 5, quantos joules são retirados da fonte fria por cada 1000 J de trabalho fornecidos à máquina frigorífica?
- 2 Será possível construir uma máquina frigorífica que não necessite de receber trabalho W do exterior? Uma máquina desse tipo estaria de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica? E com a Segunda Lei? Fundamente a resposta.
- 3 Quando se coloca um pouco de éter ou de álcool na mão tem-se uma sensação de frio. Porquê?

**Questões para
pensar e para
calcular**

Transferência de energia como calor

1 Que sentido tem a seguinte afirmação: “quando se mede a temperatura de um sistema com um termómetro, influencia-se a temperatura do sistema”?

2 A capacidade térmica mássica da água líquida é $4,2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$.

2.1 Qual é o significado deste valor?

2.2 Complete a tabela ao lado (utilizando cálculo mental...).

massa de água (em kg)	calor recebido pela água (em J)	aumento de temperatura (em $^\circ\text{C}$)
1,000	42×10^2	1,0
0,500	___ $\times 10^2$	1,0
0,100	___ $\times 10^2$	1,0
0,050	___ $\times 10^2$	1,0
0,010	___ $\times 10^2$	1,0
0,200	$8,4 \times 10^2$	1,0
0,200	___ $\times 10^2$	2,0
0,200	___ $\times 10^2$	5,0
0,200	___ $\times 10^2$	10,0
0,200	___ $\times 10^2$	20,0

3 Introduziram-se 20,0 g de gelo, a $0,0 \text{ }^\circ\text{C}$, num copo de plástico com 200 g (100 cm^3) de água inicialmente à temperatura ambiente de $20,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Admitimos que o plástico é bom isolante térmico e que o copo está assente numa base de corticite (também isolante térmico). Não consideramos, pois, o fluxo de calor do ambiente para a água,

com a qual estava em equilíbrio térmico antes de se deitar o gelo. O calor de fusão do gelo é $336 \times 10^3 \text{ J}/\text{kg}$ e a capacidade térmica mássica da água é $4,18 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$

3.1 Faça um esquema que represente adequadamente a situação descrita.

3.2 Quantos joules é necessário fornecer a 1,00 kg de gelo para fundir completamente?

3.3 Quantos joules é necessário fornecer a 50,0 g de gelo para fundir completamente?

3.4 Qual é a origem da energia utilizada para fundir o gelo?

3.5 A equação $0,020 \times 336 \times 10^3 = 4,18 \times 10^3 \times 0,200 \times \Delta T$ onde ΔT é a variação de temperatura da água, representa o balanço de energia recebida pelo gelo para fundir. Fundamente a escrita desta equação.

3.6 Verifique que a temperatura da água deve diminuir $8 \text{ }^\circ\text{C}$, para que se dê a fusão completa do gelo.

3.7 A variação de temperatura obtida no ponto anterior é aproximada por excesso ou por defeito? Porquê?

3.8 Uma vez fundido o gelo, atinge-se o equilíbrio térmico? Porquê?

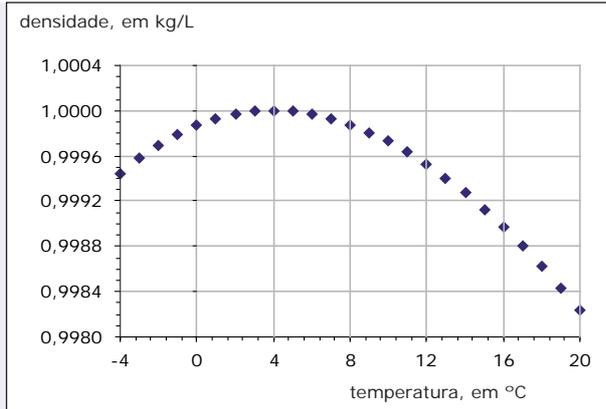
4 Existe equilíbrio térmico na condução térmica ao longo de uma barra? Justificar.

5 Que há de comum entre a condução térmica e a convecção térmica? E que há de diferente?

6 Há recipientes de bebidas em vidro e em alumínio. Estes dois materiais têm densidades e capacidade térmica mássica aproximadamente iguais. No entanto, as garrafas têm massa cerca de 10 vezes superior (as latas são mais finas). Qual destes tipos de recipiente necessita de mais energia para aquecer até à temperatura ambiente, quando sai do mesmo frigorífico, com igual quantidade da mesma bebida? Fundamente a resposta.



7 O gráfico ao lado mostra a densidade da água, à pressão atmosférica normal, para diferentes valores de temperatura. Nos lagos gelados, o gelo apenas se forma à superfície, permitindo que os peixes sobrevivam.



- 7.1 A que temperatura é máxima a densidade da água?
- 7.2 A água a essa temperatura tem tendência a subir ou a descer no lago?
- 7.3 Qual é o mecanismo predominante da troca de calor entre o gelo na superfície do lago e a água sob a superfície?

8 De manhã, num dia de Inverno, colocamos um fio de prata ao pescoço e vestimos uma camisola de lã. É legítimo afirmar, perante as sensações experimentadas, que “a camisola de lã é quente” e “o fio de prata é frio”? Explicar.

9 Em certos dias de Verão, de manhã não há brisa junto às praias. Mas, de tarde, já se observa uma brisa. Como se explica esta situação?



10 Os dados da tabela abaixo dizem respeito a uma barra de aço e foram

obtidos a partir da equação que traduz a lei de Fourier da corrente térmica: $\phi = k \frac{A}{\ell} \Delta T$.

- 10.1 Qual é o significado e a respectiva unidade SI de cada um dos símbolos utilizados nesta equação?
- 10.2 A partir dos dados da tabela, indique qual é o valor da condutividade térmica do ferro.
- 10.3 Complete a tabela (utilizando apenas cálculo mental...), tendo em conta as relações de proporcionalidade expressas na equação da lei de Fourier.
- 10.4 Qual é a importância do conhecimento do valor da condutividade térmica na selecção de materiais de construção?
- 10.5 Se numa habitação não existir isolamento térmico do exterior, que sucede se se ligar o aquecimento no interior da habitação num dia de Inverno?

10.6 Um *igloo* (casa, na língua inuit) é um abrigo construído com blocos de gelo e neve. No interior podem ser muito confortáveis, desde que lá estejam pessoas. Que se pode concluir deste facto acerca da condutividade térmica do gelo?

diferença de temperatura nos extremos da barra	comprimento da barra	área da secção da barra	energia transferida por segundo...
1,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	80 J
2,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	160 J
3,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	240 J
4,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	
10,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	
20,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	
1,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	80 J
1,0 °C	2,0 m	1,0 m ²	
1,0 °C	3,0 m	1,0 m ²	27 J
1,0 °C	4,0 m	1,0 m ²	
1,0 °C	20,0 m	1,0 m ²	
1,0 °C	0,5 m	1,0 m ²	
1,0 °C	1,0 m	1,0 m ²	
1,0 °C	1,0 m	0,5 m ²	40 J
1,0 °C	1,0 m	0,2 m ²	
1,0 °C	1,0 m	0,1 m ²	



Primeira Lei da Termodinâmica e variação da energia interna



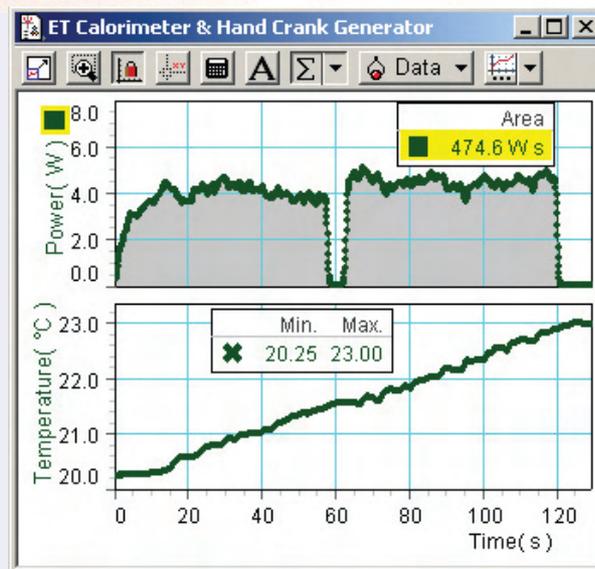
- 11** Esfregue vigorosamente uma mão na outra. Que observa? Esta transformação não resulta de se aquecer as mãos com uma fonte de calor. Como explicar, então, o aquecimento?
- 12** Ao encher-se rapidamente um pneu de bicicleta, a bomba aquece. Esta transformação não resulta de se aquecer o pneu com uma fonte de calor. Como explicar, então, o aquecimento?

- 13** A foto ao lado ilustra um processo de conversão de energia mecânica em energia eléctrica (no gerador que é segurado pela mão do experimenter), seguido de conversão de energia eléctrica em energia interna da água colocada no interior do calorímetro.



A intensidade da corrente e a diferença de potencial no resistor, mergulhado na água do calorímetro, foram medidas com sensores. A temperatura da água foi também medida ao longo do tempo, com um sensor de temperatura.

Os dois gráficos ao lado mostram a potência eléctrica no resistor e a temperatura da água, durante 130 s.



- 13.1** A rapidez de transferência de energia manteve-se constante? Fundamente a resposta.
- 13.2** Faça uma estimativa do valor médio da potência eléctrica no resistor.
- 13.3** Tendo em conta a definição de potência, calcule a energia transferida para a água durante 120 s.
- 13.4** Verifique que a “área” sob a curva da potência em função do tempo mede a energia transferida para a água (note que potência × intervalo de tempo = energia).

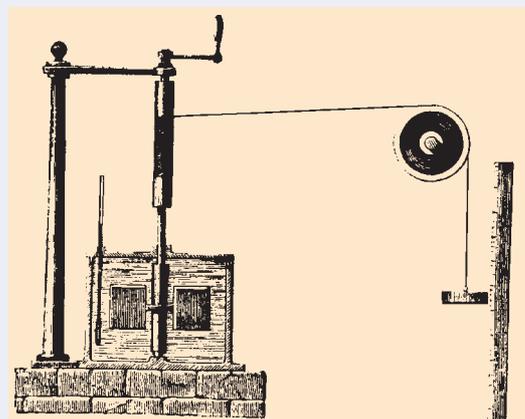
- 13.5** Qual foi a variação de temperatura da água?

- 13.6** Fundamente a escrita da seguinte equação, em que m representa a massa de água no calorímetro:

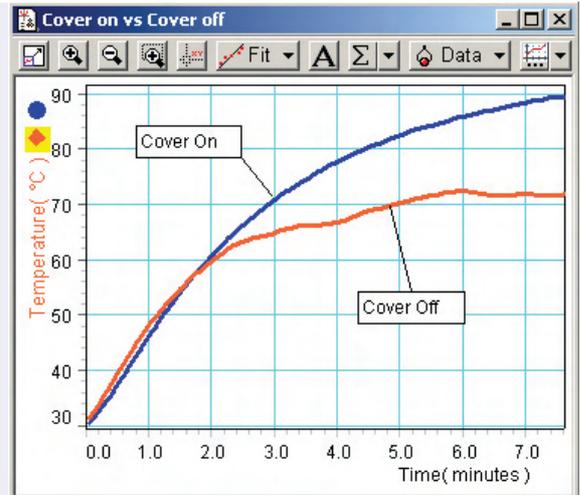
$$474 = 4180 \times m \times 2,75$$

- 13.7** Calcule a massa de água no calorímetro.
- 13.8** Este valor está calculado por excesso ou por defeito? Fundamente a resposta.
- 13.9** A energia interna da água aumentou devido ao contacto com uma fonte de calor? Fundamente a resposta.

- 14** A figura ao lado mostra um esquema de um texto original de Joule que ilustra como é possível aumentar a energia interna de uma certa massa de água através da realização de trabalho mecânico. Faça a legenda da figura, descrevendo o papel de cada um dos objectos.

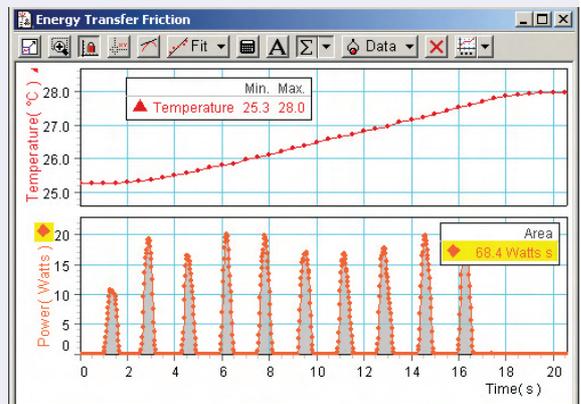


15 O gráfico e a foto ao lado correspondem a uma investigação sobre a energia recebida por radiação numa placa metálica preta de alumínio. A placa tem acoplado um sensor de temperatura. A placa metálica preta é colocada no interior de uma caixa plástica, na qual pode ser colocada uma tampa transparente. Os registos no gráfico apresentam a temperatura da placa metálica ao longo do tempo, em dois ensaios. Um com a tampa transparente colocada na caixa ("cover on") e outro sem a tampa plástica transparente ("cover off"). Portanto, neste último ensaio, a radiação incidia directamente sobre a placa metálica preta.



- 15.1** Como se designa este processo de transferência de energia para a placa metálica?
- 15.2** Em qual dos ensaios a placa metálica atingiu maior temperatura?
- 15.3** Uma vez estabilizada a temperatura da placa metálica, deixa de haver transferências de energia? Fundamente a resposta.
- 15.4** Como se explica o facto de, no ensaio com a tampa transparente colocada na caixa, a temperatura final da placa metálica ter sido mais elevada?
- 15.5** Que semelhanças há entre esta experiência e o fenómeno que ocorre numa estufa de vidro? E com o que se passa com a radiação recebida pela Terra?

16 O gráfico e a foto ao lado correspondem a uma investigação sobre a energia transferida por trabalho da força exercida pela mão. Esta força é medida em cada instante por um sensor de força. O fio amarelo desliza com atrito num cilindro de alumínio de 20 g, aquecendo-o. A temperatura do cilindro é medida com um sensor de temperatura.



O sistema computacional de medida representa a potência da força ao longo do tempo, bem como a temperatura do cilindro. A capacidade térmica mássica do alumínio é 897 joules por quilograma por grau Celsius.



- 16.1** Como se designa este processo de transferência de energia para o cilindro de alumínio?
- 16.2** Num dos gráficos está indicado o valor da energia transferida pela força. Qual é esse valor, em joules?
- 16.3** Qual foi o aumento de temperatura do cilindro de alumínio?
- 16.4** Verifique que o cilindro de alumínio recebeu energia no valor de 48 J.
- 16.5** Verifique que o rendimento da transferência de energia foi de 70%.
- 16.6** A transferência de energia foi realizada de modo constante? Fundamente a resposta.

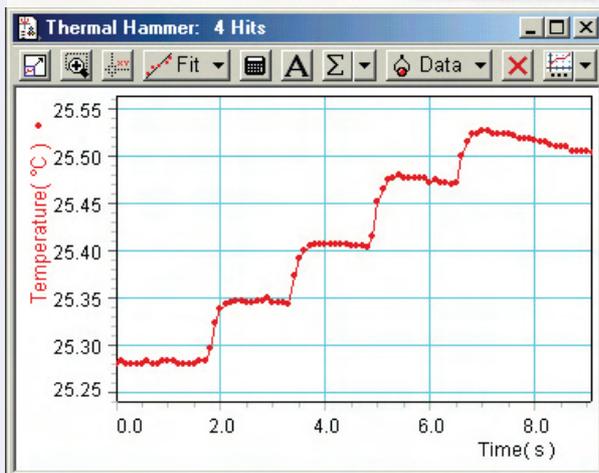
17 O equilíbrio térmico entre dois sistemas implica que ambos os sistemas tenham a mesma energia interna? Fundamentar a resposta, exemplificando.

18 A foto e o gráfico ao lado correspondem a uma investigação sobre a energia transferida para pequenas esferas de metal colocadas no interior de um cilindro, fixo em cima de "martelo". No interior desse cilindro está também colocado um sensor de temperatura. Batendo com o martelo, agitam-se as esferas de metal.

O sistema computacional de medida representa a temperatura das esferas de metal ao longo do tempo.

18.1 Como se designa este processo de transferência de energia para as esferas de metal?

18.2 Como interpretar a evolução da temperatura ao longo do tempo, representada no gráfico?

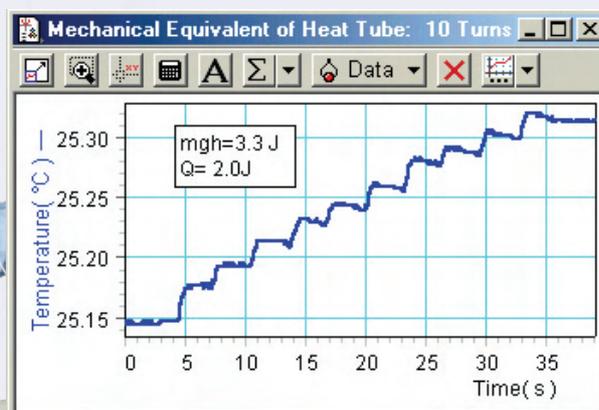


19 A foto e o gráfico ao lado correspondem a uma investigação sobre a energia transferida para pequenas esferas de metal colocadas no interior de um tubo de plástico com as extremidades fechadas.

Numa das extremidades está colocada uma pequena placa metálica, com um sensor de temperatura acoplado.

O tubo é invertido várias vezes para que as esferas caiam contra a placa metálica.

O sistema computacional de medida representa a temperatura da placa metálica ao longo do tempo.



19.1 Como se designa este processo de transferência de energia para as esferas de metal?

19.2 Como interpretar a evolução da temperatura ao longo do tempo, representada no gráfico?

19.3 No gráfico está indicada a variação da energia potencial total das esferas e a energia recebida como calor pela placa metálica. Qual é o rendimento desta transferência de energia?

20 A foto ao lado mostra uma investigação sobre a energia transferida para pequenas esferas de chumbo ($m = 100 \text{ g}$, $c = 128 \text{ J}/(\text{kg} \times ^\circ\text{C})$) colocadas no interior de um tubo de cartão de 75 cm (dentro de um pequeno recipiente de plástico, fechado).

Com um termómetro digital, mediu-se a temperatura das esferas antes e depois de inverter o tubo 30 vezes.

$$A \text{ equação } 30 \times (0,100 \times 10 \times 0,75) = 128 \times 0,100 \times \Delta T$$

permite calcular a variação de temperatura ΔT das esferas de chumbo se toda a energia potencial das esferas for convertida em energia interna das esferas. Fundamente a escrita desta equação.



21 A Primeira Lei da Termodinâmica pode ser representada através da seguinte equação:

$$\Delta E_{\text{interna}} = W + Q + R$$

- 21.1** Qual é o significado de cada um dos símbolos nesta equação?
- 21.2** Que afirma esta lei?
- 21.3** Com que sinal é "contabilizada" a energia que "entra" no sistema?
- 21.4** Com que sinal é "contabilizada" a energia que "sai" no sistema?
- 21.5** Qual é a variação de energia interna de um sistema sobre o qual se realiza um trabalho de 250 J?
- 21.6** Qual é a variação de energia interna de um sistema sobre o qual se realiza um trabalho de 250 J e que perde 250 J para o exterior como calor?
- 21.7** Qual é a variação de energia interna de um sistema que recebe 500 J de radiação e que perde 400 J para o exterior como calor?

Segunda Lei da Termodinâmica e degradação da energia

22 Onde é que há mais energia: num copo de chá quente ou no copo e no ambiente depois do chá ter arrefecido? Fundamente a resposta.

23 Fazer contas com energia é simples: a energia não aumenta nem diminui! Se a energia não aumenta diminui, então porque é tão grande a preocupação com o esgotamento da energia dos combustíveis?

24 Fazer contas com a entropia é simples: em todos os processos espontâneos, a entropia de um sistema aumenta sempre.

- 24.1** Qual é a interpretação microscópica da energia interna de um sistema?
- 24.2** E qual é a interpretação microscópica da entropia de um sistema?
- 24.3** Como é possível diminuir a entropia de um sistema?

25 Que significa dizer que a energia dos combustíveis se degrada depois de se queimar o combustível?

26 Coloca-se um pedaço de gelo na mão e o gelo funde.

- 26.1** De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, seria possível que a mão aquecesse enquanto o gelo ficaria ainda mais frio... Explique porque é que esta afirmação está, de facto, de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica.
- 26.2** De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, aquecer a mão à custa do arrefecimento do gelo é impossível. Descreva como é que a Segunda Lei da Termodinâmica permite interpretar esta impossibilidade.
- 26.3** De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, seria possível construir um motor que utilizasse a energia interna do ar que nos rodeia e o arrefecesse sem utilizar qualquer fonte de energia para fazer funcionar o motor? Fundamente a resposta.



Calor, máquinas e rendimento

- 27 Em duas ou três frases, descreva o funcionamento de uma máquina térmica.
- 28 O rendimento de uma máquina térmica é sempre inferior a 100%. Que diferença haveria nas transferências de energia se fosse possível criar uma máquina com um rendimento de 100%?
- 29 O motor de explosão tem um rendimento da ordem dos 20%.
- 29.1 Que significa esta afirmação?
- 29.2 Essa afirmação está de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica? Fundamente a resposta.
- 29.3 Essa afirmação está de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica? Fundamente a resposta.
- 30 Em que difere uma máquina frigorífica de uma máquina térmica?
- 31 Uma máquina frigorífica tem uma eficiência da ordem de 5%.
- 31.1 Que significa esta afirmação?
- 31.2 Essa afirmação está de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica? Fundamente a resposta.
- 31.3 Essa afirmação está de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica? Fundamente a resposta.
- 32 A foto ao lado mostra um sistema de fornecimento de água “fresca” e de água à temperatura ambiente. A água do reservatório está “fresca”.
- 32.1 A água à temperatura ambiente é obtida directamente do reservatório ou necessita de ser previamente aquecida? Porquê?
- 32.2 O motor eléctrico responsável pela extracção de energia do reservatório aquece o ambiente. Porquê?
- 32.3 Como deve ser construído este sistema de fornecimento de água para aproveitar a energia cedida ao ambiente devido ao funcionamento do motor para arrefecer a água do reservatório?
- 32.4 Este sistema de arrefecimento de água pode ser considerado como um sistema isolado? Porquê?

