

Elisa Maria Fajardo Cabeço Silva

## **LUZ E CALOR**

Experiências simples para compreender a Física do dia-a-dia



Departamento de Física

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro / 1999

Elisa Maria Fajardo Cabeço Silva

## **LUZ E CALOR**

Experiências simples para compreender a Física do dia-a-dia



Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

para obtenção do grau de Mestre em Ensino da Física

Departamento de Física

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro / 1999



Aos meus Alunos

que têm dado alma

e animado

a minha vida

## **Agradecimentos**

Agradeço à Professora Doutora Maria Manuela Amado a disponibilidade que sempre teve para me ouvir, aconselhar e incentivar e, sobretudo, a orientação que imprimiu à realização deste trabalho. Sem tudo isso, ele não teria chegado ao fim.

Agradeço ao Dr. Jorge Mendes, do Departamento de Física, o tempo e saber que dedicou à elaboração do *software* adequado ao uso de termopares para registo automático nas experiências realizadas.

Agradeço à minha amiga e colega Dr.<sup>a</sup> Maria de Fátima Oliveira e Sousa todo o trabalho e tempo que despendeu para pôr à minha disposição o material (sensores, interfaces, *software*) da sua Escola e as lições que me deu para aprender a utilizá-lo. Agradeço ainda as colegas por ela contactadas que emprestaram outro material.

Agradeço toda a simpatia da Doutora Eugénia Sofia Ferreira, do Departamento de Química, que pôs à minha disposição sensores, computadores e todo o material que fosse necessário.

Agradeço aos meus colegas e amigos Dr.<sup>a</sup> Maria Ursulina de Pinho Valente e Dr. Francisco Álvares Pires a atenção e tempo que dispensaram a mim e à leitura dos meus papéis, as correcções oportunas e judiciosas e os cuidados para me levantar o moral.

Agradeço ao Sr. Francisco Carpinteiro, da Oficina do Departamento de Física, o entusiasmo, interesse e "arte" na construção dos modelos e dispositivos necessários à realização das experiências.

Agradeço a disponibilidade e simpatia dos Professores do Mestrado.

Agradeço a todos os colegas de Mestrado a camaradagem e a amizade.

Para finalizar, destaco dois impulsos (em Física) ou dois empurrões especiais (na vida real). O primeiro fez-me entrar no Mestrado e veio da minha amiga Professora Doutora Maria de Fátima Pinheiro. O último, da parte dos meus irmãos Maria Elisabete e António Alberto Cabeço Silva, veio, no fim, pôr ordem na minha cabeça e nos meus papéis.

## Resumo

Com o presente trabalho pretende-se evidenciar os temas da Física **Luz e Calor** (na vida quotidiana), chamando a atenção para fenómenos que, por demasiado rotineiros, nos passam despercebidos.

A finalidade é despertar a curiosidade e espírito crítico dos alunos, tentando levá-los a interessar-se mais pela Física

As experiências referidas utilizam material expedito e acessível ou põem em evidência o papel da automação na aquisição e tratamento de dados.

Numa primeira parte do trabalho, onde se faz uma síntese teórica, incluem-se as experiências simples e acessíveis (ou simples observações), inseridas nos temas respectivos, do Capítulo 1. **O espectro electromagnético** e do Capítulo 2. **As transferências de energia (sob a forma de calor)**.

Assim temos, sobre radiações:

1. **Ferver água num copo de gelo** que põe em evidência o diferente efeito das microondas sobre moléculas de água com bastante facilidade de movimento (água líquida) e moléculas de água com o movimento limitado gelo
2. **Um "arco-íris" a pedido**

Sobre Transferências de energia (sob a forma de calor), refere-se:

**Para a radiação:**

1. **Espectro de um sólido** / observação do espectro de um sólido incandescente
2. **Os bons emissores são mesmo bons absorventes?** Os maus emissores são mesmo maus absorventes?
3. **O radiómetro solar** / descrição do seu funcionamento
4. **Difusão da luz** / a olhar para uma lâmpada através de uma solução coloidal.

**Para a condução:**

1. **A cruz trimetálica** que põe em evidência a condução através de metais diferentes.
2. Utilização de um **dispositivo** para comparar materiais como condutores térmicos
3. Aplicação a duas hastes de metais diferentes de **fitas termossensíveis** para comparação de termocondutividades

**Para a convecção**, refere-se a utilização de um dispositivo para observação de movimentos de convecção e faz-se a interpretação do fenómeno.

Numa segunda parte, no Capítulo 3. **Experiências de transferência de energia**, o trabalho explora a **aquisição automática de dados** ( com termopares e sensores ).

É o caso do estudo do **Efeito de estufa** (num automóvel, em frascos de vidro com revestimentos diferentes e numa estufa).

Em **Efeito de "rebanho" no arrefecimento e Simulação do arrefecimento do corpo humano na água** faz-se o tratamento matemático de fenómenos de aquecimento / arrefecimento de corpos, comparando os valores das grandezas envolvidas (no caso, as constantes de tempo de arrefecimento).

Ainda no Capítulo 3., procede-se à comparação da termocondutividade de metais diferentes usando discos de cobre e aço de dimensões iguais (condução radial) e calcula-se o valor da termocondutividade do cobre numa haste deste metal (condução linear).

Para finalizar, destaca-se no mesmo capítulo, o papel dos sensores no presente e, para o futuro, prevê-se a sua utilização cada vez mais alargada a todos os campos.



## Résumé

Le but de cette dissertation, **LUMIÈRE ET CHALEUR / Expériences simples pour faire comprendre la Physique quotidienne**, est de mettre en évidence des phénomènes que, de si ordinaires, deviennent inaperçus.

Il faut développer la curiosité et l'esprit critique des élèves, essayant de les convaincre que la Physique intéresse à tout qui nous entoure à chaque moment ( arc-en-ciel, le bleu du ciel, lever et coucher du soleil ) ou arrive même dans notre corps ( bronzage, refroidissement, par exemple).

Les expériences décrites dans le Chapitre 1. **Spectre électromagnétique** et dans le Chapitre 2. **Transferts d'énergie (sous la forme de Chaleur)** utilisent matériaux expéditifs et accessibles. On fait **l'observation des spectres** et , dans un four à micro-ondes, on voit **l'ébullition de l'eau dans un "verre" de glace**. On étudie **la diffusion de la lumière d'un laser et d'une lampe dans une solution colloïdale** pour expliquer le bleu du ciel ou les couleurs du lever ou du coucher du soleil. On utilise aussi des dispositifs simples pour mettre en évidence les transferts de chaleur.

Dans le Chapitre 3., on souligne le rôle de **l'automatisation dans l'acquisition et traitement des données** (avec thermocouples et capteurs) . On étudie **L'effet de serre , Effet "de troupeau" dans le refroidissement, Simulation du refroidissement du corps humain et Comparaison du refroidissement d'un bébé e d'un adulte**. On fait le traitement mathématique des phénomènes de refroidissement, dans les derniers cas, en établissant le rapport entre les grandeurs caractéristiques du refroidissement.

On étudie encore la conductivité thermique du cuivre et de l'acier.

Pour terminer, dans ce chapitre, on fait remarquer l'intérêt présent des capteurs et, pour le futur, on prévoit son utilisation, plus et plus accélérée et étendue, à tous les domaines.

## Summary

The purpose of this essay **LIGHT and HEAT / Simple experiences to understand the everyday life's Physics** is to put in evidence the everyday phenomena, so ordinary that passed unnoticed.

We must develop the curiosity and the critical spirit of the students trying to convince them of the interest of the Physics.

The reported experiments in Chapter **1. Electromagnetical Spectrum** and Chapter **2. Transfers of Energy (as Heat)** are executed with expeditious and approachable materials.

We prepare **Spectrum observation** and, in a microwave oven, we **Boil water in a "glass" of ice**. We study the **diffusion of the light of a laser and of a light bulb through a colloidal solution** to explain the blue sky or the sunrise/sunset colour. We make use of simple devices to evidence energy transfers.

In Chapter **3**, we establish by evidence the role of **automation in acquisition and data processing** (with thermocouples and sensors). We study **Greenhouse effect, "Flock" effect in cooling, Simulation of human body cooling** and **Baby and adult cooling**.

We study the thermal conductivity of copper and stainless steel.

At last, in this chapter, we point out the interest of sensors, in present, and we expect their use, for the future, in all domains, in an accelerated and enlarged way.

## **ÍNDICE**

<b>0.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.</b>	<b>O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO</b> As diferentes zonas do espectro na vida do dia-a-dia	
<b>1.1</b>	<b>As ondas de radiofrequência</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>As microondas</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>E ... a luz</b>	<b>18</b>
1.3.1	A luz visível	18
1.3.2	A radiação infravermelha	28
1.3.3	A radiação ultravioleta	31
<b>1.4</b>	<b>A radiação ultravioleta e o ozono</b>	<b>33</b>
<b>1.5</b>	<b>O efeito de estufa</b>	<b>40</b>
1.5.1	O efeito de estufa perto de nós e ... provocado ... para ser sentido	46
<b>1.6</b>	<b>O Mundo preocupa-se</b>	<b>50</b>
<b>2.</b>	<b>AS TRANSFERÊNCIAS DE ENERGIA (sob a forma de calor)</b>	
<b>2.1</b>	<b>A radiação</b>	<b>55</b>
2.1.1	O espectro contínuo	55
2.1.2	A radiação do corpo negro	57
2.1.3	Interpretação do espectro do corpo negro	59
2.1.4	Experiências de radiação	64
<b>2.2</b>	<b>A condução</b>	<b>73</b>
2.2.1	Fluxo de calor por condução	73
2.2.2	A condutividade térmica	76
2.2.3	A condução radial	78
2.2.4	Experiências de condução do calor	79
<b>2.3</b>	<b>A convecção</b>	<b>83</b>
2.3.1	Fluxo de calor por convecção	83
2.3.2	Experiências de convecção	87
2.3.3	Tratamento matemático da convecção	88
<b>2.4</b>	<b>Lei de arrefecimento de Newton</b>	<b>89</b>
<b>2.5</b>	<b>Transferência de energia por mudança de estado</b>	<b>92</b>
<b>2.6</b>	<b>Visualização de transferências de calor</b>	<b>94</b>

<b>3.</b>	<b>EXPERIÊNCIAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA</b>	
<b>3.1</b>	<b>Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados</b>	<b>96</b>
3.1.1	Efeito de estufa num automóvel	98
3.1.2	Efeito de estufa em frascos com revestimentos diferentes	101
3.1.3	Efeito de estufa num modelo de estufa	105
3.1.4	Efeito "de rebanho" no arrefecimento	111
3.1.5	Simulação do arrefecimento do corpo humano na água	119
<b>3.2</b>	<b>Medição da termocondutividade</b>	<b>129</b>
3.2.1	Condução radial / diferentes materiais	129
3.2.2	Condução linear / haste de cobre	132
<b>3.3.</b>	<b>Os sensores no futuro</b>	<b>135</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>138</b>
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>141</b>



## 0. INTRODUÇÃO

Em frente a uma janela num dia de sol, os nossos olhos enchem-se de ... **LUZ !**

Durante o dia, a fonte primária de luz é o Sol. A imensidade de partículas que as radiações luminosas vão encontrando, através do espaço, vão-nas difundindo e dão origem à luminosidade do céu.

Os nossos olhos, as nossas antenas para a luz, captam-na e analisam a informação que ela transporta. Vemos montes ou árvores ou carros porque a luz do Sol ressalta destes objectos e entra nos nossos olhos. Todas as cores que vemos são luz. A relva parece verde porque reflecte o verde da luz do Sol e absorve as outras cores. Observamos um belo arco-íris no céu ou nos repuxos iluminados pelo Sol porque as gotinhas de água decompõem a luz branca nas suas cores escondidas. Numa bola de sabão tremulam cores iridiscuentes porque a luz branca reflectida pelas duas faces da finíssima película de sabão interferem de forma a eliminar algumas cores e a reforçar outras.

A luz do Sol que revela o mundo começa com a vibração de electrões dos átomos. Electrões vibrando na atmosfera do Sol emitem, em todas as direcções, a luz que percorre a longa distância que o separa dos nossos olhos em oito minutos. Os nossos olhos criam a imagem do mundo que nós vemos.

Esta é uma maneira muito simplista de descrever a luz: **de onde vem e o que faz.**

E por que razão estou a falar de luz?

Sou uma adoradora do Sol: o Sol acorda-me, ilumina-me e maravilha-me.

Ensinar é uma tarefa que exige, na transmissão de conhecimentos, demonstração de entusiasmo no agente que ensina e despertar de entusiasmo naquele que aprende .

A luz é um tema fascinante sob esse aspecto, na medida em que é responsável pelos fenómenos espectaculares que a Natureza põe à frente dos nossos olhos: um intenso azul de céu, um radioso nascer do sol ou muito espantosos pôr de sol e belíssimos arco-íris. Assim, será uma boa motivação para despertar o entusiasmo para o estudo da Física.

Depois do Belo, que deve ser um ingrediente da Vida, podemos encaminharmo-nos para outros aspectos mais sérios (mas o que é belo não é sério?).

A luz transporta energia. A energia solar chega à Terra através da radiação. Nos tempos que correm, os media fazem-se eco dos perigos que afectam a Humanidade: efeito de estufa, buraco de ozono, nevoeiros fotoquímicos. Qual é a causa imediata destes

perigos? A luz? A luz visível ou sob a forma de raios IV ou UV? E quem é o responsável? O Homem? O Homem que, ao desejar usufruir de melhores condições de vida, estará a contribuir para a degradação da qualidade de vida das gerações vindouras?

Se os perigos referidos são resultado dum consumo energético excessivo, convém que sejamos cada vez mais informados para exigir aos governos que tomem as medidas necessárias para uma rentabilização da energia e estudo de energias alternativas que conduzam a uma menor poluição. O problema que se põe já não é limitado a este ou aquele país, mas é global porque não são as fronteiras que fazem barreiras; como tal, tem de ser tratado, de uma forma concertada, a nível mundial.

Aos homens e mulheres, como cidadãos, cabe o papel de estar informados, de ser críticos e fazer opções, ao seu nível, em relação ao uso da energia (porque a energia é cara e pode ser poluente). Na nossa vida de todos os dias, convém rentabilizar o consumo de energia na Habitação (isolamento, aquecimento, arrefecimento), na Alimentação (confeção e refrigeração dos alimentos), nos Transportes.

E as crianças de hoje serão os adultos de Amanhã!

Ao escolher como tema de dissertação **Luz e Calor na vida de todos os dias** tenho a intenção de pôr em evidência a utilidade da Física (talvez insuspeitada por uma grande parte das pessoas). Resulta importante relacionar o que se aprende e o que se ensina com a realidade em que nos situamos, com os fenómenos com que, diariamente, nos confrontamos.

Apesar de se verificar um esforço no sentido de modificar o ensino da Física, conferindo-lhe uma maior componente experimental, parece-me que muitas vezes os alunos estão a aprender Física no laboratório, com material de laboratório, e sentem-se muito longe da realidade.

Estuda-se Física, Química (e outras), como **disciplinas estanques**, embora se defenda a interdisciplinaridade. Vou precisar de pedir ajuda à Química de uma maneira que pode parecer despropositada mas tenho verificado que **efeito de estufa**, **“buraco” de ozono** e **nevoeiro fotoquímico** são assuntos muito confundidos na linguagem de todos os dias. Neste contexto, justifica-se o seu estudo devido à intervenção da radiação em todos eles.

Tendo em conta que muitas das nossas escolas até ao ensino secundário têm (quando têm!) laboratórios mal equipados e que o material é caro e, por isso, pouco acessível, acho importante improvisar com tudo o que está “à mão de semear”. Sem preocupações de grandes resultados quantitativos, será uma maneira de desenvolver ou aproveitar o espírito criativo e inventivo dos alunos. Sem prejuízo de, tendo laboratórios equipados, fazer um estudo mais rigoroso da Física.



## 1. O ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

### E ... fez-se Luz!

A luz é tão antiga como o Mundo: a luz visível, aquela a que os nossos olhos são sensíveis. Depois de Newton ter obtido, por dispersão da luz branca que vem do Sol, o espectro visível com as suas cores características, outros físicos descobriram que as propriedades caloríficas da luz se estendiam aquém do vermelho e que, além do violeta, no sentido oposto, se detectavam efeitos químicos. À luz visível juntaram-se as radiações infravermelha e ultravioleta que não podemos observar directamente.

Portanto, até 1867, quando Maxwell publicou pela primeira vez a sua teoria do campo electromagnético, o espectro conhecido estendia-se apenas do infravermelho até ao ultravioleta, exactamente a faixa de “luz” emitida por qualquer corpo quente.

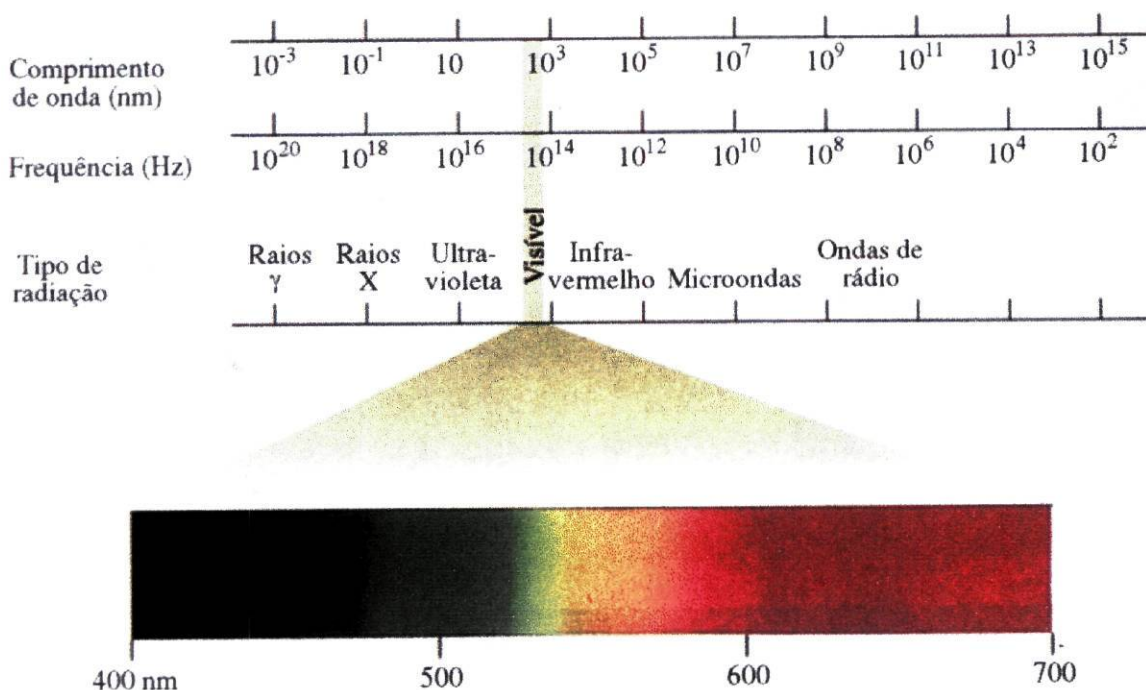


Figura 1.1 - Espectro electromagnético

Maxwell postulou, na sua teoria, que cargas eléctricas aceleradas ou correntes eléctricas variáveis dariam origem a campos eléctricos e campos magnéticos. A propagação

desses campos simultâneos, periódicos e mutuamente perpendiculares faz-se segundo ondas transversais que designamos por **ondas electromagnéticas** ou **radiação electromagnética**. Estas ondas transportam a energia emitida pela matéria - em consequência de mudanças, dos seus átomos e moléculas, nas suas configurações electrónicas - a velocidade constante, a **velocidade da luz**, que é  $c_0 = 2.998 \times 10^8$  m/s, no vazio. Caracterizam-se pela sua **frequência** e pelo seu **comprimento de onda**

$$\lambda \nu = c$$

em que  $c$  é a velocidade da luz nesse meio, sendo  $c \leq c_0$ . A velocidade da luz num meio está relacionada com a velocidade da luz no vazio por  $c = c_0 / n$ , em que  $n$  é o **índice de refração** desse meio. O índice de refração é praticamente unitário para o ar e para a maior parte dos gases e aproximadamente 1.5 para a água. A unidade mais utilizada para o comprimento de onda é o nanómetro. Ao contrário do comprimento de onda e da velocidade de propagação, a frequência de uma onda electromagnética só depende da fonte (não depende do meio através do qual a onda se propaga). A **frequência** - o número de oscilações por segundo - de uma onda electromagnética pode variar desde **alguns ciclos** até **milhões de ciclos** ou mais **por segundo**, dependendo da fonte.

Em estudos de **radiação** e de **efeito fotoeléctrico**, chegou-se à conclusão que o comportamento ondulatório das radiações electromagnéticas não era satisfatório para a explicação dos fenómenos. **Max Planck** propôs, em 1900, na sequência da sua **teoria quântica**, que a radiação electromagnética fosse considerada como a propagação de "pacotes" discretos de energia chamados **fotões** ou **quanta**. Cada **fotão** de frequência  $\nu$  tem uma energia  $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$ , em que  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  J.s é a **constante de Planck**.

Portanto, as radiações electromagnéticas possuem um comportamento **dual**: ondulatório e/ou corpuscular.



## **As diferentes zonas do espectro na vida de todos os dias**

### **1. 1. Ondas de radiofrequência**

Em 1887, Hertz obteve, pela primeira vez, experimentalmente, ondas electromagnéticas: conseguiu gerar e detectar ondas de rádio.

As suas frequências vão de **alguns hertz** até aproximadamente **um milhão de hertz** (comprimentos de onda de muitos quilómetros até mais ou menos 30 cm). São produzidas por circuitos eléctricos. Por exemplo, a corrente eléctrica alternada de 50 Hz que circula nas instalações eléctricas produz campos de radiofrequência com comprimentos de onda de  $6 \times 10^6$  m. O extremo de maior frequência desta banda é utilizado para emissões de rádio (ondas longas, ondas médias, ondas curtas) e emissões de televisão (UHF e VHF).

### **1. 2. As microondas**

Numa banda de frequência, em parte sobreponível à das radiofrequências, estende-se a região das microondas de  $10^9$  Hz até  $3 \times 10^{11}$  Hz. Os comprimentos de onda correspondentes variam entre os 30cm e 1,0 mm.

As microondas são ondas de rádio muito curtas usadas nos radares que detectam os condutores com excesso de velocidade, usadas em Astronomia e satélites de comunicações. No dia-a-dia, fazem funcionar os telefones celulares, os comandos de portas de garagens e, têm uso muito vulgarizado, nos fornos de microondas.

São reflectidas pelos metais, propagam-se no vidro e no plástico, e são absorvidas pelas moléculas dos alimentos, constituídos, principalmente, por água, açúcares, gorduras. Assim, a energia eléctrica convertida em radiação num forno de microondas torna-se, eventualmente, parte da energia interna dos alimentos. Este tipo de fornos transfere energia para os alimentos com o máximo de eficiência desde o instante em que são ligados, e assim cozem mais depressa consumindo menos energia.

As moléculas podem absorver e emitir energia alterando o seu estado de movimento vibratório ou de rotação. A energia associada a estes movimentos está quantificada e os correspondentes níveis energéticos são distintos dos níveis electrónicos. Só as moléculas polares, sob a acção de um campo eléctrico associado a uma onda electromagnética incidente, rodam sobre si próprias, alinhando-se umas com as outras e com o campo; só estas moléculas polares é que podem absorver um fotão que lhes provoque uma transição rotacional para um estado excitado.

As moléculas pesadas têm uma grande inércia para a rotação de modo que será de esperar que tenham ressonâncias rotacionais de baixa frequência na gama dos infravermelhos e das microondas.

Os **foros de microondas**, que normalmente operam a frequências de 2.450 MHz, são uma aplicação prática do facto de as moléculas de água absorverem eficientemente microondas com frequências próximas das frequências de ressonância.

No gelo, as moléculas polares da água estão dispostas de modo ordenado com posições e orientações fixas. Mas na água líquida, as moléculas distribuem-se ao acaso. Só estão condicionadas pela sua tendência de formar entre umas e outras ligações por pontes de hidrogénio.

Se colocarmos água num campo eléctrico intenso, as moléculas de água tendem a rodar em alinhamento com o campo. Isso porque uma molécula não alinhada tem uma energia potencial electrostática extra e vai acelerar rodando na direcção que reduz a sua energia potencial o mais possível. Assim, a molécula de água ficará sujeita a um momento e adquire uma aceleração angular que a faz rodar no sentido do alinhamento. Quando roda, a molécula colide com outras moléculas e vai converter alguma da sua energia potencial elástica em energia térmica.

O campo eléctrico variável de uma microonda é adequado para aquecer água. Um forno de microondas usa uma frequência de 2.450 MHz para excitar as moléculas de água dos alimentos, correspondendo-lhes oscilações da ordem dos mil milhões de vezes por segundo. Quando as moléculas rodam, chocam com as outras e aquecem. A água absorve as microondas e converte a sua energia em energia térmica. Esta frequência particular foi escolhida porque não é usada nas comunicações e porque dá às moléculas de água o tempo exactamente necessário para uma rotação completa antes de o campo se inverter novamente.

Este efeito orientacional explica porque só alimentos contendo água – ou outras moléculas polares - cozem bem num forno de microondas. Pratos de cerâmica, copos de vidro, recipientes de plástico não contêm água na sua composição e normalmente não aquecem. Mesmo o gelo tem dificuldade em absorver este tipo de energia. As moléculas do gelo estão rigidamente ligadas na sua estrutura cristalina e não podem modificar as suas orientações. Mas enquanto o gelo funde lentamente, a água líquida que se forma aquece rapidamente. Isso explica porque, ao descongelar um prato culinário num microondas, por vezes se têm porções líquidas e quentes, misturadas com porções frias ou geladas.

O compartimento de cozedura de um microondas tem paredes metálicas que reflectem a radiação e a mantêm a saltar de parede para parede no interior. Mesmo a porta do forno é revestida de uma rede metálica reflectiva. A reflexão é tão boa que, mesmo que não haja nada dentro do forno para absorver as microondas, elas regressam ao magnetrão, causando eventualmente o seu sobreaquecimento, o que não será muito conveniente para o bom funcionamento do aparelho. Para prevenir essa situação, é conveniente que, dentro do forno, esteja sempre um pequeno copo com água.



Enquanto as paredes metálicas ajudam a confinar as microondas dentro do forno, cozinhando os alimentos, metal extra dentro do forno pode provocar problemas. Se embrulharmos o alimento numa folha de alumínio, este reflectirá as ondas e o alimento não coze. Mas se o alimento for colocado num prato baixo metálico, já coze relativamente bem porque as microondas passam através do alimento embora se reflectam no prato.

Os metais reflectem as microondas porque as suas cargas móveis são aceleradas por campos eléctricos. Algumas destas cargas móveis fazem mais do que reflectir as ondas. Se cargas em número suficiente são empurradas para uma ponta do metal ou parte retorcida da folha de alumínio, essas cargas saltam no ar como uma descarga. Essa faísca pode dar origem a um fogo.

Os metais também podem ficar muito quentes dentro do forno de microondas. Quando as microondas empurram as cargas para cá e para lá num metal, o metal fica sujeito a uma corrente alternada. Se o metal tem uma resistência eléctrica elevada, a corrente eléctrica pode aquecê-lo significativamente. Enquanto as paredes espessas do forno têm baixas resistências e se conservam frias, lâminas finas de metal podem sobreaquecer. Decorações metálicas na louça são susceptíveis de danos num microondas. Portanto, aquecer café numa chávena com um fiozinho dourado no bordo é má ideia, só para ter uma sensação desagradável e ver como é. Contudo, alguns alimentos podem já vir em invólucros especiais que conduzem corrente suficiente para se tornarem muito quentes num forno de microondas. Estes invólucros fornecem temperaturas à superfície altas para dourar os alimentos.

Outra particularidade característica dos microondas é que eles não cozem por igual. Isto porque a amplitude do campo eléctrico das microondas não é uniforme por todo o forno. Como as ondas saltam de um ponto para outro do forno, passam pelo mesmo ponto vindo de direcções diferentes. Quando isso acontece, os seus campos eléctricos combinam-se uns com os outros. Num sítio, podem reforçar-se e aí o alimento aquece depressa. Noutra sítio, os campos podem ter sentidos contrários e anular-se. Aí, a comida não coze nada bem.

Se nada se mover dentro do forno, a disposição das ondas não se modifica. Há regiões em que o campo eléctrico tem grandes amplitudes e regiões em que as amplitudes são muito pequenas. Quanto maior a amplitude do campo eléctrico, mais depressa a comida é cozinhada.

Para uniformizar a cozedura, conforme as marcas, os fornos dispõem de antenas giratórias ou, mais vulgarmente, de discos de apoio, pratos giratórios.

A diferença de comportamento das microondas na sua transferência de energia para as moléculas de água num líquido e para as moléculas de água do gelo pode ser posta em evidência com uma experiência relativamente simples:

### **Ferver água num cubo de gelo**

No congelador do frigorífico, deixemos a formar-se um bloco de gelo (cúbico ou paralelepípedo).

Retira-se o bloco do frigorífico e escava-se (ou faz-se fundir) uma pequena cavidade no centro da face superior.

Coloca-se o bloco sobre um prato de cerâmica que possa ir ao forno de microondas e leva-se o conjunto para o congelador de modo a arrefecer.

Depois de arrefecidos e congelados, tiram-se do congelador e introduzem-se rapidamente no microondas. Na cavidade do gelo, colocam-se algumas gotas de água e liga-se imediatamente o forno.

A rapidez na sucessão das operações anteriores é absolutamente necessária para garantir que a água ainda se encontra no estado líquido sobre o gelo quando o forno começa a emitir microondas. A água líquida vai absorver potência das microondas que enchem o espaço de cozedura mas o gelo não. A água (proveniente das gotas) torna-se extremamente quente e começa a fundir a parte superior do gelo. Passado pouco tempo, o bloco de gelo já tem um buraco escavado pela água aquecida. O arrefecimento do prato e do bloco, antes da introdução no forno, serve para garantir que a água líquida de que dispomos inicialmente é só aquela que constitui as gotas que adicionamos.

Ao repetir a experiência com um bloco de gelo, pode-se conseguir levar a água na cavidade à ebulição, antes que se escape através do caminho que vai abrindo no gelo, por fusão.



Figura 1.2 - Ferver água num copo de gelo



### 1.3 E... A LUZ

No século XVII, Isaac Newton observou que a luz solar (luz branca) sofria **dispersão**: ao passar através dum prisma de vidro decompunha-se nas cores observadas nos arco-íris. Newton mostrou, portanto, que a luz branca é uma mistura das suas componentes coloridas que, recombinadas, com outro prisma em posição adequada, reconstituíam o feixe de luz branca original.

Foi uma grande contribuição para o desenvolvimento do estudo da Luz. Seguiram-se estudos de espectroscopia que foram ajudar, mais tarde, à compreensão da estrutura da matéria e que alargaram o conceito de luz às vizinhanças do vermelho (**luz infravermelha**) e do violeta (**luz ultravioleta**), nos fins do século XVIII.

Com Maxwell (1862), estas radiações encontraram o seu lugar no espectro electromagnético de que constituem uma banda bastante estreita.

#### 1.3.1 A luz visível

Ondas electromagnéticas de comprimentos de onda menores que os das ondas de rádio e as microondas, variando ao longo do espectro, entre 700 nm e 400 nm, são detectadas pelos nossos olhos, constituem a **luz visível** e são as principais componentes da luz solar.

Com comprimentos de onda tão curtos e sendo  $\lambda v = c$ , as frequências variam na razão inversa e estão compreendidas entre  $10^{14}$  Hz e  $10^{15}$  Hz (aproximadamente) o que corresponde a um número extraordinariamente grande de orientações do campo eléctrico num e noutra sentido, **onde** se podem encontrar as “antenas” emissoras ou receptoras deste tipo de ondas, se as dimensões apropriadas das antenas são da ordem do meio comprimento de onda da respectiva radiação? São fáceis de encontrar **nos átomos** ou **nas moléculas** que constituem a matéria, com as suas **partículas carregadas** (os electrões). Estas partículas, submicroscópicas, sofrem oscilações extremamente rápidas, de frequências da ordem de  $10^{14}$  Hz -  $10^{15}$  Hz e, sendo aceleradas e desaceleradas, sucessiva e alternadamente, emitem luz visível.

A luz solar tem origem na parte externa do Sol, na **fotosfera**. Aí, a 5800 °C, iões atómicos e electrões (partículas carregadas), emitem ondas electromagnéticas. Como o movimento destas cargas é aleatório, desordenado, e sofrem colisões frequentes, a distribuição por comprimentos de onda só depende da temperatura. Temos uma distribuição correspondente a um **espectro de corpo negro**, àquela temperatura de 5.800 °C. Uma grande parte da luz solar situa-se na parte visível do espectro. Na parte invisível para nós, humanos, aparecem os comprimentos de onda mais longos, a **radiação infravermelha** de

que sentimos o seu efeito calorífico, por exemplo, em frente de uma lareira acesa; e os comprimentos de onda mais curtos, do lado das radiações (violetas) de maior frequência, a **radiação ultravioleta**, que também não vemos mas de que notamos os seus efeitos químicos quando provoca, por exemplo, o bronzeado da pele. Em hipóteses piores, produz-nos queimaduras solares mais ou menos graves, podendo contribuir para o aparecimento de cancro na pele ou de cataratas nos olhos.



## **PORQUE É AZUL O CÉU?**

O céu é a aparência do limite da atmosfera para os nossos olhos. Se a Terra não tivesse atmosfera, o céu apareceria completamente negro excepto na direcção do Sol. Como a Terra tem atmosfera que muda a direcção da luz solar na **difusão**, a luz que nos chega parece vir não só do disco solar mas de todas as partes do céu. O céu, em dias secos e límpidos, é azul.

Sabemos que, quando um feixe de luz entra numa sala às escuras, ele é visível devido às partículas de pó existentes no ar, que difundem a luz em todas as direcções, fazendo com que os raios luminosos difundidos, que chegam aos olhos do observador, tornam o feixe visível. Se não houvesse pó, não se via o feixe no seu trajecto, só se veria a imagem do orifício onde ele entra, na intersecção do feixe com um obstáculo. Como é melhor **ver para crer**, é fácil de se observar o que se disse, na sala de aula obscurecida, sacudindo um apagador de giz no trajecto de um feixe luminoso.

Os primeiros estudos quantitativos do fenómeno da **difusão** foram feitos em 1871 por Lord Rayleigh e essa difusão é vulgarmente chamada *scattering de Rayleigh*. A investigação matemática do problema conduziu a uma lei matemática, para a luz difundida, aplicável a quaisquer partículas de índice de refração diferente do meio exterior, desde que as dimensões lineares das partículas sejam consideravelmente menores que o comprimento de onda  $\lambda$  da luz, cerca de  $10^{-3} \lambda$ .

Sabe-se há muito que as ondas de comprimento de onda curto são mais difundidas que as de comprimento de onda mais longo. Experimentalmente, Rayleigh determinou que a intensidade da difusão é proporcional à quarta potência da frequência ou (o que é o mesmo) é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda, relação conhecida por **lei da quarta potência ou lei do inverso da quarta potência**.

Uma vez que o vermelho ( $\lambda = 720 \text{ nm}$ ) tem um comprimento de onda 1,8 vezes maior que o comprimento de onda do violeta ( $\lambda = 400 \text{ nm}$ ), a lei prevê que há  $(1,8)^4 = 10$  vezes mais *scattering*, para a luz violeta, de partículas muito mais pequenas que o comprimento de onda de cada cor.

Se a luz branca for difundida por partículas suficientemente finas, como, por exemplo, o fumo do tabaco, a cor difundida tem sempre uma cor azulada, se o fumo estiver a libertar-se livremente. Se o tamanho das partículas é aumentado até deixar de ser pequeno em comparação com o comprimento de onda, a luz torna-se branca. Assim, se uma pessoa retiver o fumo do cigarro na boca, como as partículas ficam envolvidas por moléculas de água que lhes aumenta o tamanho, ao libertá-lo o fumo aparece branco.

A dependência da cor difundida por partículas muito pequenas, com o tamanho das partículas, foi estudada pela primeira vez por Tyndall (1820-1893). Daí vem a designação de **efeito Tyndall** para o fenómeno da difusão da luz por dispersões coloidais.

A explicação deste fenómeno está intimamente relacionado com a reflexão e a difracção como se pode interpretar das figuras seguintes:

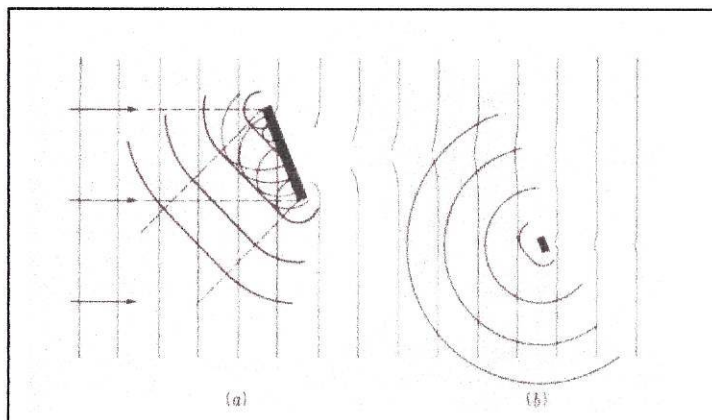


Figura 1.3 - A difracção da luz

Em (a) temos um feixe paralelo formado por ondas planas que avançam para a direita e vão chocar com uma pequena superfície plana reflectora. As frentes de onda sucessivas estão separadas por um comprimento de onda, portanto o tamanho do reflector é razoavelmente maior do que um comprimento de onda. A luz emitida pela superfície do reflector é produzida pela vibração de cargas eléctricas na superfície com uma certa relação de fase, e as ondas esféricas produzidas por estas vibrações interferem construtivamente para produzir pequenos segmentos de frentes de ondas planas. Junto às bordas do espelho, as ondas espalham-se, devido à difracção de maneira semelhante ao que aconteceria com a luz transmitida através de uma fenda estreita. A largura do reflector é equivalente à largura da fenda e, assim, o espalhamento é tanto maior quanto menor for a largura do reflector relativamente ao comprimento de onda.

Em (b) na figura, o reflector é muito menor que o comprimento de onda e aqui o espalhamento é tão grande que as ondas reflectidas diferem muito pouco de ondas esféricas. Neste caso, a luz proveniente do feixe inicial diz-se que é **difundida** (*scattered*) e não reflectida, porque as leis da reflexão deixaram de se aplicar. A luz passa a ser enviada em todas as direcções.

Portanto:

**Porque é o céu azul?**

**Porque é que o céu, à noite, não é azul quando temos lua cheia?**

**O que acontece ao céu no pôr-do-sol? E no nascer-do-sol?**



A resposta a todas estas perguntas é: efeitos da **difusão da luz**.

Os fótons das ondas electromagnéticas que constituem a luz visível colidem com os electrões das moléculas do ar. A luz violeta (no fim do espectro visível) com fótons mais energéticos tem a influência mais forte sobre os electrões. Assim, os electrões das moléculas do ar absorvem a energia de oscilação da parte “azul” do espectro da radiação solar que incide nelas. Isso provoca a excitação dos electrões que passam a radiar. Esta radiação secundária propaga-se em todas as direcções e não só na direcção incidente.

Segundo Minnaret, são provavelmente as moléculas de  $O_2$  e  $N_2$  os agentes mais difusores na atmosfera já que têm um tamanho cerca de 10.000 vezes menor que o comprimento de onda do violeta.

Portanto, as moléculas do ar difundem a maior parte da luz da zona azul do espectro, e o céu parece-nos azul.

Mas se é a radiação violeta a mais difundida, porquê azul e não violeta? Por duas razões: primeira, os nossos olhos não são muito sensíveis ao violeta; segunda, a luz solar transporta menos fótons violeta que azuis.

Ao fim do dia, os raios de sol percorrem uma distância muito maior do que ao meio-dia. Quanto maior camada de atmosfera a luz atravessar, maior é o número de centros de difusão que removem a luz azul, assim a luz transmitida aparece mais avermelhada que o normal. Acontece ainda que outros dispersores como o fumo, poeira e partículas diminutas afectam a difusão na atmosfera, como observamos na fotografia do Sol ao meio-dia, visto através do fumo de um incêndio.

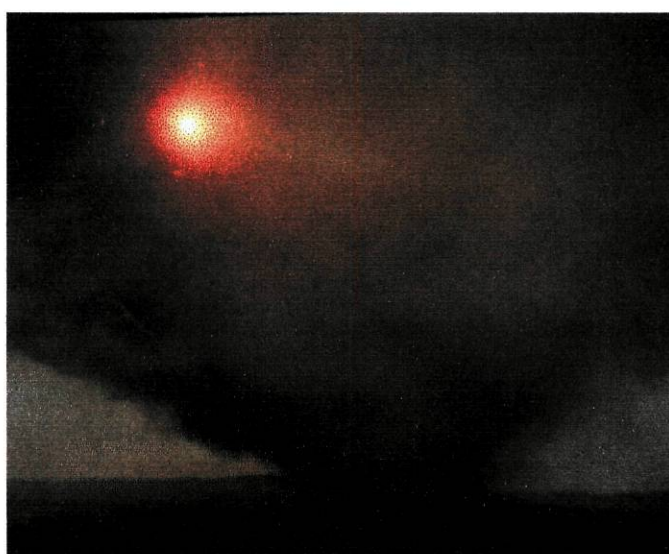


Figura 1.4 - "Pôr-de-sol" às 11horas

Ao pôr-do-Sol apresentam-se cores deslumbrantes. Às vezes acontece que o disco solar pode aparecer mesmo azul. Neste caso, a luz do Sol é difundida por um aerossol atmosférico composto de partículas de 400 a 900 nm - tamanho comparável ao comprimento de onda da luz visível. Devido a essas dimensões apreciáveis, a difusão da luz faz-se mais intensamente na banda vermelha do espectro e só a luz azul chega aos nossos olhos.

Habitamo-nos a observar pela vida fora os espectáculos de luz que são os arco-íris, a invariável sequência das cores **V A A V A A V** que resultam da dispersão da luz branca.

É muito mais raro ver no céu um arco-íris diferente, não mais bonito mas insólito. Sobre o fundo escuro do céu, temos um arco-íris só em vermelhos. O céu está negro não só porque está carregado (acabou de chover) mas também porque é quase noite, no fim de um dia de verão. O Sol está mesmo a pôr-se.



Figura 1.5 - Arco-íris vermelho

Este fenómeno, em que as cores azuis, verdes e amarelas não se observam, está relacionado com o grande caminho percorrido pela luz solar durante o qual a radiação (azul, verde e amarela) foi difundida pelo que a luz refractada e reflectida dentro das gotas de chuva se situa numa gama estreita de laranjas e vermelhos.

É fácil a preparação de soluções coloidais, dissolvendo amido em água (ou diluindo algumas gotas de leite em água). As moléculas de amido já por si são grandes e algumas que se juntem dão uma partícula de dimensão característica dos colóides. Normalmente, misturas coloidais de amido são leitosas ou podem mesmo ser opacas, porque as partículas coloidais são suficientemente grandes para reflectir e difundir luz visível. Mesmo quando são tão diluídas que se apresentam claras e transparentes como a água, as moléculas de amido são capazes de difundir luz suficiente para tornar visível o feixe através delas. Nas soluções verdadeiras, os solutos envolvem espécies demasiado pequenas para difundir a luz e não se verifica o **efeito Tyndall**.

Para pôr em evidência esta diferença de comportamento, podemos usar o feixe proveniente de um laser que vai atravessar dois tubos de ensaio: um tubo com uma solução coloidal (água a que se juntaram umas gotas de leite); outro tubo só com água (1) e com solução coloidal (2). Observa-se a diferença.

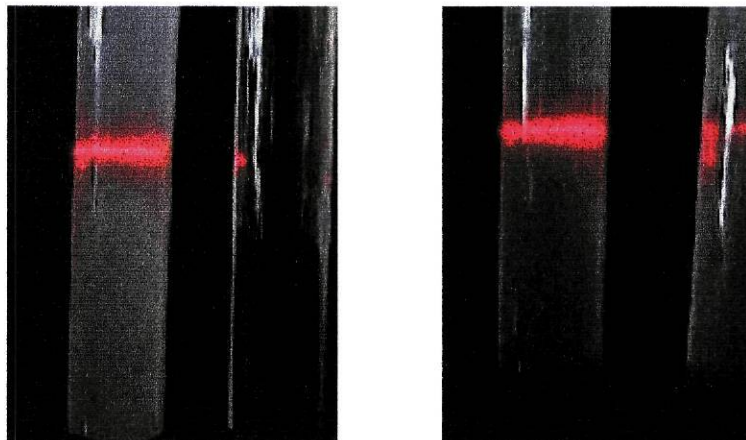


Figura 1.6 - Difusão da luz do laser através:

(1) de uma solução coloidal e  
de água

(2) de duas soluções  
coloidais



### **A olhar para uma lâmpada através duma solução coloidal**

Enche-se um frasco de vidro com água da torneira. Juntam-se umas gotas de leite: a solução deve ficar muito diluída.

Interpondo o frasco entre a lâmpada e os nossos olhos, observa-se a cor alaranjada em consequência duma maior difusão das radiações azuis e violeta pelas partículas provenientes do leite.

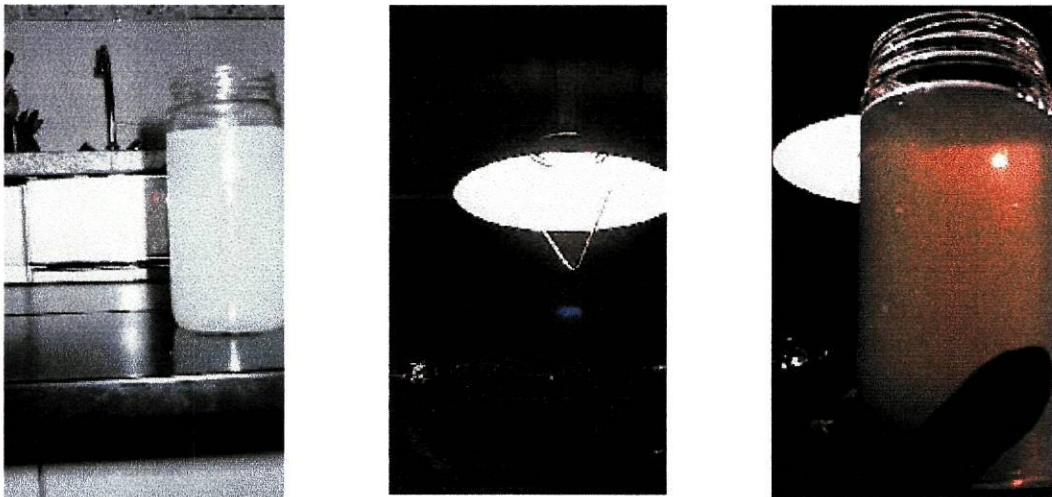


Figura 1.7 - Difusão da luz numa solução coloidal



## **Um arco-íris a pedido**

Nas mais variadas situações deparam-se, aos nossos olhos, surpresas: pequenas formações de arco-íris espontâneos - no jardim, provocados pelas gotas de água dos jactos das mangueiras e dos repuxos; nas paredes de uma sala, quando a luz atravessa os pingentes de cristal dos candeeiros; na sala de aula, quando os alunos brincam com Bics transparentes, num dia de sol, ou numa esplanada quando a luz do Sol passa através dum copo de água.

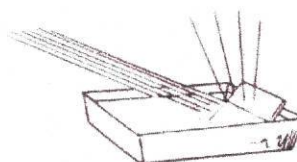
Com tantos casos acidentais, não será difícil produzir, sob controle, um espectro solar, sem necessidade de montagens sofisticadas nem condições atmosféricas especiais.

### **Arco-íris com sol e sem chuva**

#### **Material:**

Tina para água (prato baixo ou tabuleiro)

Espelho de bolso (rectangular)



#### **Modo de proceder:**

Na água da tina mergulha-se um espelho de bolso com a inclinação adequada para receber um feixe de luz solar que entre por uma janela.

No tecto, ou numa parede da sala, (conforme a inclinação do espelho) observa-se o espectro solar.

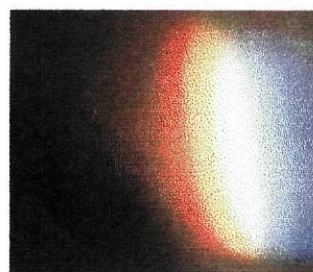
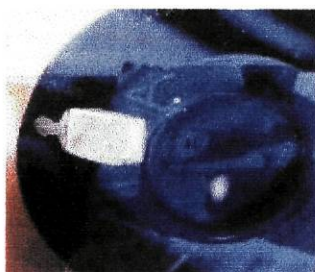


Figura 1.8 - A luz a incidir no espelho dentro de água e o espectro

## **Arco-íris sem chuva e sem sol**

### **Material:**

Retroprojector

Caixa de plástico transparente (paralelepípedica)

### **Modo de proceder:**

Coloca-se a caixa de plástico transparente, com água até cerca de  $\frac{3}{4}$  de altura sobre a plataforma de um retroprojector. O espelho superior está fechado, porque o aparelho não se usa como projector.

Com a sala às escuras, liga-se o retroprojector. Observa-se um espectro sobre uma parede à nossa frente e ... outro à direita e ... . Ao todo, observam-se quatro espectros, um para cada face lateral da caixa.

Interpondo alvos (folhas de cartolina branca), observamos os nossos belos arco-íris.

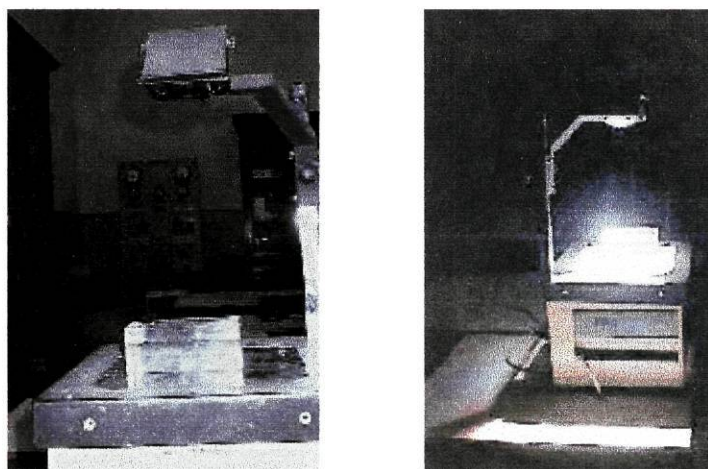


Figura 1.9 - Montagem com retroprojector / obtenção do espectro

### 1.3.2 A radiação infravermelha

Antes de 1800, só se conheciam as radiações visíveis que se evidenciavam fazendo passar a luz branca através de um prisma que a dispersava. Foi William Herschel que abriu o caminho para novas descobertas.

Embora a grande paixão da vida de Herschel fosse a Astronomia, teve como profissão ser professor de música até que a descoberta do planeta Urano o empurrou para a fama que lhe deu independência económica para se dedicar à Astronomia a tempo inteiro. Ao fazer uma investigação sobre distribuição de energia na luz solar, ele decompô-la com um prisma e, usando termómetros sensíveis, determinou as potências caloríficas relativas da luz de diferentes comprimentos de onda. A potência calorífica aumentava desde o violeta até ao vermelho. Para além do vermelho, onde não se via luz, a potência calorífica ainda era maior, donde veio o nome de **infravermelho**. Assim, Herschel descobriu radiação invisível com uma potência calorífica maior que a da radiação visível.

O infravermelho estende-se por quatro gamas de comprimentos de onda: o **IV próximo**, próximo do visível, de 780 a 3000 nm, o **IV intermédio** de 3000 a 6000 nm, o **IV térmico** de 6000 a 15000 nm e o **IV remoto** de 15000 nm a 1,0 mm.

É evidente que a radiação infravermelha detectada por Herschel se situava no infravermelho próximo.

A energia radiante, no extremo dos grandes comprimentos de onda, tanto pode ser gerada por osciladores de microondas como por fontes incandescentes (osciladores moleculares). Qualquer material pode absorver ou emitir radiação IV como resultado de agitação molecular. Uma molécula pode rodar e pode, também, vibrar de diferentes modos, conforme a maneira como os átomos se podem deslocar uns em relação aos outros. Muitas moléculas têm ressonâncias rotacionais e vibracionais no infravermelho.

Todos os corpos (qualquer corpo se encontra a temperatura superior a 0 K) radiam no infravermelho, embora a intensidade possa ser reduzida. O infravermelho é emitido abundantemente, num espectro contínuo, por corpos sólidos incandescentes (aquecedores eléctricos ou carvão em brasa, por exemplo). Cerca de metade da energia emitida pelo Sol situa-se no infravermelho e uma lâmpada eléctrica incandescente emite muito mais no infravermelho que no visível. O corpo humano, como o de todos os animais de sangue quente, também radia no infravermelho. Esta propriedade é aproveitada, na Natureza, por certos tipos de serpentes, que atacam as suas presas de sangue quente durante a noite. É o mesmo princípio que é aplicado em mísseis guiados por IV que se movimentam em função da posição das fontes de calor e que não largam as suas “presas”, depois de lançados.



Há lasers de IV, telescópios e satélites astronômicos de IV que prescrutam os céus e permitem estudar as emissões de IV que vêm do espaço. Há filmes sensíveis ao IV próximo que aproveitam radiação solar difusa. No espaço orbitam satélites que detectam o lançamento de mísseis pela sua emissão de IV, satélites de recursos naturais que podem detectar doenças em colheitas. As fotografias de satélite são feitas com radiação do **IV próximo** ao **IV remoto**. As fotografias de **IV próximo** aproveitam radiação solar difusa que desaparece com o pôr-do-Sol. As fotografias de **IV remoto** exploram a radiação emitida dia e noite.

Pequenas diferenças entre as temperaturas dos objectos e a sua vizinhança dão origem a emissões IV características, que podem ser utilizadas na detecção de tumores no cérebro ou do cancro da mama (*termografias*) ou, noutras situações mais específicas, como sistemas de detecção anti-intrusão.

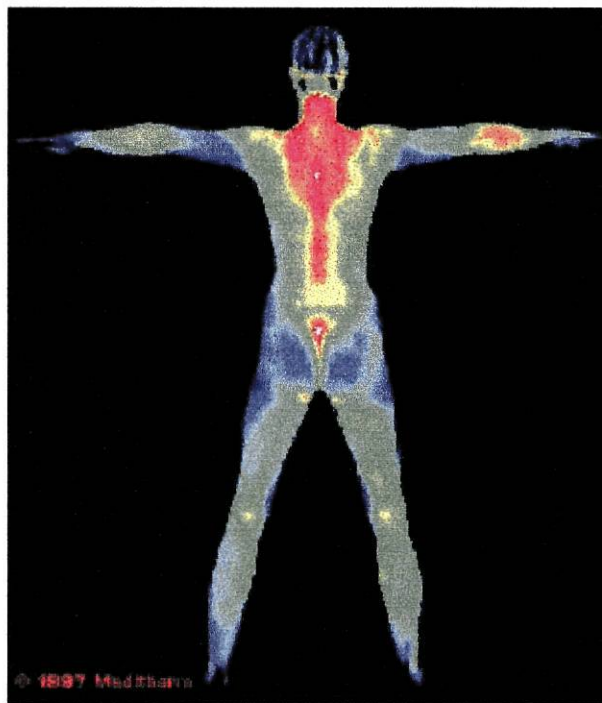


Figura 1.10 - Termografia do corpo humano

## RADIAÇÃO INFRAVERMELHA :

### **Experiência que evidencia a radiação invisível**

#### **Material:**

- termómetro de aquário
- 2 clips para suporte do termómetro
- retroprojector
- cápsula de Petri (ou tina larga e baixa)

Quando o termómetro, com o reservatório pintado de negro, é colocado sobre o retroprojector, a coluna líquida sobe lentamente porque a radiação emitida pelo projector é absorvida pela tinta preta.

Deve-se observar a altura da coluna líquida quando estabilizar. Então, coloca-se uma cápsula transparente com água por baixo do reservatório do termómetro. Verifica-se que a coluna líquida começa a baixar lentamente.

Excepto em camadas espessas, a água pura é transparente para a radiação visível. Mas isso não obriga que seja transparente para a radiação invisível. As observações da **radiação invisível** têm de ser indirectas.

Assim, o projector deve emitir radiação que não podemos ver mas que, nem por isso, deixa de fornecer energia aos objectos que a absorvem. A água é **transparente** para a radiação que podemos ver mas **opaca** para a que não podemos ver. Portanto, a água funciona como um filtro para o **infravermelho**.

**Em alternativa**, podem registar-se as temperaturas medidas pelo termómetro, a intervalos regulares (por exemplo de minuto a minuto), com o termómetro colocado directamente sobre o retroprojector e sobre a água da cápsula. Conclui-se que é diferente a rapidez com que a temperatura sobe nos dois casos.

### **1.3.3 A radiação ultravioleta**

Pouco depois da descoberta dos **IV** em 1800 por William Herschel, outro tipo de radiação foi detectado para lá do extremo violeta do espectro visível solar. Esta radiação com menor comprimento de onda que a luz visível foi baptizada de ultravioleta (**UV**) e descoberta por Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) devido às suas propriedades químicas.

Verifica-se que, quando a luz incide sobre nitrato de prata em solução, se formam pequeníssimos grãos de prata que parecem negros. Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) observou que as radiações do espectro solar escureciam tiras de papel embebidas em solução de nitrato de prata; a luz azul produzia um maior efeito que a luz vermelha.

Seguindo a técnica de Herschel para os infravermelhos, Ritter decidiu experimentar para além do limite violeta do espectro e verificou que nessa zona a reacção era mais intensa, descobrindo a luz invisível no **ultravioleta**.

A energia dos fotões desta banda varia entre os 3,2 eV e os 100 eV. Os raios ultravioletas do Sol têm energia mais que suficiente para ionizar os átomos das camadas altas da atmosfera, criando, assim, a ionosfera. Estas energias são da ordem de grandeza das energias envolvidas nas reacções químicas e, portanto, os raios UV podem provocar algumas reacções, umas fundamentais para a nossa vida (a síntese da vitamina D, por exemplo) e outras prejudiciais, como são os casos conhecidos da opacificação do cristalino (formação de cataratas) e da alteração do material genético (cancros de pele). Felizmente o ozono existente na estratosfera absorve as radiações de pequenos comprimentos de onda que poderiam ser letais. Os olhos são particularmente vulneráveis a este tipo de radiação e é, por isso, que não se deve olhar directamente para uma lâmpada de UV como uma lâmpada fluorescente de vapor de mercúrio.

Se um feixe luminoso emanado de uma lâmpada de vapor de Hg e irradiando sobre uma pessoa for interceptado por um filtro que só deixe passar radiação UV, verifica-se que sobressaem os dentes, as unhas ou um lenço (ou camisa) branco lavado com detergente, pois se tornam fluorescentes. A casca de ovo também fica fluorescente

Os materiais fluorescentes absorvem radiação UV e voltam a radiar luz visível. As lâmpadas fluorescentes contêm vapor de Hg e as suas superfícies interiores são revestidas de pós fluorescentes que emitem luz clara característica quando a radiação UV incide sobre eles. As lâmpadas de vapor de Hg são boas fontes luminosas

A emissão de um fotão UV ocorre quando um electrão de um átomo transita de um nível energético elevado (estado fortemente excitado) para o nível fundamental. Pode acontecer, por exemplo, que o electrão de valência de um átomo de sódio possa ser levado a níveis energéticos cada vez mais elevados até que, a 5,1 eV, o electrão se liberta



completamente e o átomo se ioniza. O íão recombina-se com um electrão livre que tem tendência a atingir rapidamente o estado fundamental, ou por etapas, ou de uma só vez. Neste último caso, há emissão de um único fotão UV com 5,1 eV de energia. Mais provavelmente o estado fundamental será atingido por uma série de saltos sucessivos, correspondendo cada um deles à emissão de um fotão menos energético.

Os electrões de valência, não emparelhados, em átomos isolados são a fonte de luz colorida, como se observa da análise dos espectros de riscas dos elementos. Quando estes átomos se combinam para formar moléculas, os electrões de valência são emparelhados ao estabelecer as ligações químicas responsáveis pela coesão e maior estabilidade do material. Daí resulta que os electrões ficam muito mais ligados e os níveis energéticos moleculares são mais elevados, com energias típicas do UV. As moléculas da atmosfera de azoto, oxigénio, dióxido de carbono e vapor de água têm precisamente esse tipo de ressonâncias electrónicas no UV.

Existem também películas fotográficas e microscópios sensíveis aos UV, telescópios orbitais e lasers ultravioletas.

#### 1.4. As radiações ultravioletas e o Ozono

As radiações ultravioletas têm uma relação forte com o ozono: o **bom ozono** e o **mau ozono**.

O ozono,  $O_3$ , é um gás azulado com um odor tão forte que pode ser detectado para concentrações tão baixas como 0,01 ppm. Forma-se junto de aparelhagem de alta tensão e quando de trovoadas em que se registem fortes descargas eléctricas, ficando um cheiro característico a lavado, devido à formação de pequenas quantidades de  $O_3$ . Pode ser sintetizado fazendo passar uma descarga eléctrica por oxigénio molecular  $O_2$ , mas uma forma alternativa de o preparar consiste em submeter oxigénio à radiação ultravioleta. Por isso, algumas lâmpadas esterilizadoras funcionam produzindo uma baixa concentração de ozono a partir da acção da luz ultravioleta sobre o oxigénio do ar.

Devido às suas propriedades bactericidas, introduz-se ar ozonizado no sistema de ventilação das redes de metropolitano e outros espaços confinados. O ozono é também usado para purificar água para beber e água de piscinas. Como é um oxidante muito forte, ataca quase tudo: árvores, fibras e tintas dos tecidos, borracha de pneus e tecido dos pulmões e vias respiratórias. Irrita os olhos, o nariz e a garganta, provoca a tosse. Para uma concentração de 0,5 ppm de ozono no ar, as actividades físicas das crianças e idosos, com problemas respiratórios, têm de ser reduzidas para evitar a inalação de ozono. A exposição a um nível de 1,00 ppm durante cerca de 10 minutos é perigosa para toda a gente.

Assim, dependendo da concentração, o ozono poderá ser benéfico ou maléfico.

Como o mais sério poluente do **smog**, temos o (mau) ozono.

O **smog** é o nevoeiro que asfixia as grandes cidades como resultado de reacções induzidas pela **luz solar**, numa mistura de óxidos da azoto, ozono e hidrocarbonetos por queimar. Os poluentes primários ( $NO_2$ , CO e hidrocarbonetos) são provenientes dos escapes dos automóveis ou das chaminés das fábricas.

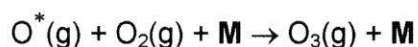
A reacção entre o azoto e o oxigénio atmosféricos, verificada a altas temperaturas dentro do motor dum automóvel, dá origem à formação de óxido nitroso, **NO**. Uma vez libertado para a atmosfera, o **NO** é rapidamente oxidado a dióxido de azoto, **NO<sub>2</sub>**.

A luz solar de  $\lambda < 400$  nm provoca a decomposição fotoquímica do dióxido de azoto:





O oxigénio atómico  $O^*$  (oxigénio no estado excitado) é uma espécie muito reactiva que pode iniciar várias reacções, uma das quais é a formação de  $O_3$ , na presença de uma substância inerte **M** como, por exemplo,  $N_2$ .



O papel de **M** é importante pois absorve parte da energia libertada nesta reacção exotérmica e evita, desse modo, a decomposição da molécula de ozono.

O ozono também pode ser formado através de uma série de reacções mais complexas envolvendo hidrocarbonetos que não sofreram combustão, aldeídos, óxidos de azoto e oxigénio. Um dos produtos destas reacções é o nitrato de peroxiacetil (**PAN** das iniciais do seu nome, em inglês, Peroxyacetyl Nitrate). O **PAN** é um gás lacrimogénio forte e causa dificuldades respiratórias.

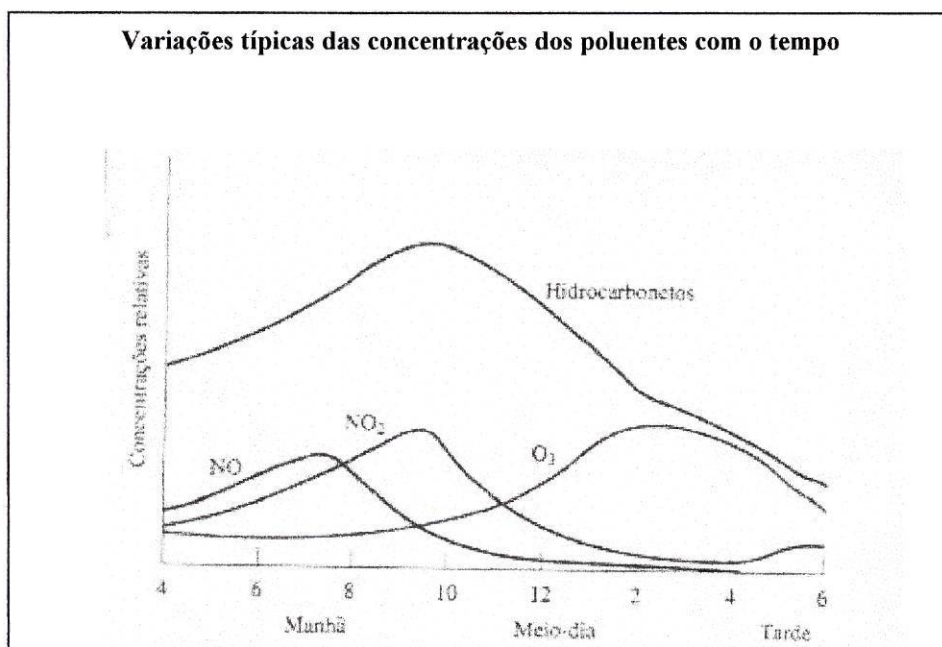


Figura 1.11 - Variação, numa grande cidade, das concentrações dos poluentes durante o dia

A figura mostra variações diárias típicas das concentrações de poluentes (primários e secundários). De madrugada, a concentração de NO e NO<sub>2</sub> é muito baixa. A concentração do ozono mantém-se baixa e aproximadamente constante durante as primeiras horas da manhã. À medida que o dia avança, vai aumentando a concentração de hidrocarbonetos não queimados e, portanto, as concentrações de NO e NO<sub>2</sub>. Depois do meio-dia e por efeito

da radiação UV solar sobre o  $\text{NO}_2$ , forma-se o  $\text{O}_3$ . As concentrações de  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{O}_3$  dependem, como é evidente, da situação do local, da intensidade do tráfego e das condições climatéricas. A presença destas substâncias na atmosfera é, em geral, acompanhada de nevoeiros. A oxidação dos hidrocarbonetos dá origem a outros compostos orgânicos menos voláteis que tendem a condensar formando pequenas gotas de líquido dispersas no ar (**aerossóis**). Os aerossóis dispersam a luz do Sol e reduzem a visibilidade.

Acontece, ainda, que os problemas são agravados pela "**inversão do ar**". Normalmente, a camada de ar perto da superfície da Terra aquece e sobe, permitindo que o ar fresco e menos poluído tome o seu lugar. Às vezes, contudo, uma camada de ar quente forma-se acima da camada do solo, obrigando o ar poluído a continuar em contacto com a Terra. Os poluentes, provenientes dos escapes dos automóveis ou das emissões industriais, vão-se concentrando, permanecendo, algumas vezes, durante dias.

Verifica-se felizmente que as cidades portuguesas com mais movimento são privilegiadas, devido à sua situação geográfica, em relação às suas congéneres europeias. O facto do Porto e Lisboa se situarem junto ao mar e ao rio facilita a circulação de ar e a consequente remoção de poluentes. Não temos problemas de **smog** semelhantes a Roma, Paris, Atenas ou os famosos "smogs" de Londres já ultrapassados.

Conhecidas as causas dos nevoeiros fotoquímicos, têm sido empreendidos esforços para reduzir os poluentes químicos primários. A maior parte dos automóveis está equipada com conversores catalíticos onde é feita a oxidação do  $\text{CO}$ ; os hidrocarbonetos que não sofreram combustão são transformados em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e dá-se a redução do  $\text{NO}$  e do  $\text{NO}_2$ , a  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$ . A existência de motores automóveis mais eficientes e de melhores sistemas de transportes públicos contribuirá seguramente para reduzir a poluição nas cidades maiores, causadora do nevoeiro fotoquímico. Em casos extremos, é mesmo necessário reduzir o tráfego em certas áreas, e em certas horas. Os especialistas concordam que a emissão de hidrocarbonetos deve ser significativamente reduzida, antes que o problema do ozono seja significativamente reduzido. Mesmo a perda de hidrocarbonetos nas bombas de abastecimento de gasolina e nos tanques de combustível tem de ser reduzida.

Os problemas provocados pela poluição do ar transcendem os que estão relacionados com a saúde humana. Os nevoeiros fecham aeroportos, provocam choques em cadeia nas auto-estradas. O ar poluído corroi metais, apodrece a madeira, e pode causar danos de grande extensão na vegetação e animais. Além dos efeitos directamente prejudiciais, há indícios de que o nevoeiro e a poluição do ar podem estar a destruir o delicado equilíbrio do ecossistema do Homem. O **smog** desempenha um papel importante ao influenciar o balanço de radiação pela Terra que, em última análise, determina a maior parte das variáveis climáticas. O **smog** reduz a intensidade da luz solar que nos chega,



baixa a temperatura média diária e a velocidade dos ventos, aumenta a humidade e ainda é suspeito de diminuir a pluviosidade.

Há, portanto, todas as razões para reduzir a formação deste **mau ozono**.

Por outro lado, há todas as razões para preservar o **bom ozono**, que constitui uma camada finíssima na estratosfera, que filtra as radiações UV demasiado energéticas (de pequeno comprimento de onda) que impediriam a vida na Terra.

### **O ciclo do ozono estratosférico (o bom ozono)**

A estratosfera, camada esférica que envolve a Terra entre as altitudes de 10 e 50km, contém um certo número de espécies químicas reactivas, em concentrações muito baixas e é atravessada pela radiação solar. Cerca de 7% desta radiação situa-se na região ultravioleta (UV) do espectro. Ultravioletas mais curtos, de comprimentos de onda abaixo de 242 nm, podem dissociar as moléculas de oxigénio



A radiação **UV** na região de 280 nm a 315 nm causa queimaduras solares e pode provocar cancro da pele. Felizmente para nós, quase toda a radiação UV abaixo de 320 nm é absorvida na estratosfera no **ciclo do ozono estratosférico**.

O ciclo consiste numa reacção química em cadeia. A reacção **1** inicia o ciclo e também contribui para a destruição de alguma radiação UV.

O ozono forma-se, como já foi referido, quando  $\text{O}^*$  colide com  $\text{O}_2$  na presença de uma partícula neutra, **M**, que pode ser uma molécula de oxigénio ou de azoto. Este é o primeiro passo do ciclo propriamente dito.



A função de **M** é absorver alguma da energia da colisão. De outra forma, as novas moléculas de ozono têm energia vibracional suficiente para se dissociarem, logo a seguir à sua formação. Mas o que é desejável é que seja a energia UV a quebrar as moléculas.

No segundo passo do ciclo, as moléculas de ozono absorvem energia UV e dissociam-se.





É de notar que o  $O^*$ , produto da segunda reacção do ciclo, é o reagente necessário para a primeira reacção do ciclo. A reacção 3 fornece assim o que é necessário à reacção 2. **As reacções 2 e 3 constituem uma reacção em cadeia** - o ciclo do ozono estratosférico - em que, em cada fase do ciclo, é absorvida alguma energia UV. Para cada  $O^*$  inicial, o ciclo pode repetir-se centenas de vezes até que outros acontecimentos, como um combinação provável de dois átomos de O transformando-se em  $O_2$ , terminem a cadeia.

Se adicionarmos as equações 2 e 3, o resultado global é simplesmente

### **Radiação UV → energia calorífica**

A conversão de radiação UV em energia calorífica é o efeito global do ciclo de ozono na estratosfera. A região onde o ciclo de ozono ocorre chama-se a **camada de ozono** ou **ozonoesfera**.

Existe uma pequena concentração global ou “nível” de ozono estratosférico porque os passos do ciclo não ocorrem a velocidades idênticas. O nível de ozono varia com a latitude, a altitude e a época do ano.

Se qualquer reacção consome  $O^*$ , para além da reacção de  $O^*$  com  $O_2$  (**reacção 2**), então o ciclo de ozono é quebrado e os meios para regenerar ozono novo diminuem. Quantidades crescentes de radiação UV irão atingir a superfície da Terra com consequências nefastas para a vida na Terra. Conduz a mutações genéticas e interfere com a fotossíntese nas plantas, reduzindo as colheitas e destruindo outras formas de vegetação. A radiação ainda diminui o crescimento do fitoplâncton que é o pilar da cadeia alimentar dos oceanos.

O cloro atómico é uma das muitas espécies capazes de se combinar com  $O^*$ , e os átomos de cloro têm, há várias décadas, vindo a ser indirectamente fornecidos à camada de ozono, consequência da proliferação do uso dos **clorofluorocarbonetos (CFC)**. A radiação UV rompe as ligações **C-Cl**, tornando os CFC fontes de cloro atómico.

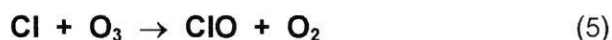
Desde meados da década de setenta, os cientistas têm-se preocupado com os efeitos nocivos de certos clorofluorocarbonetos sobre a camada de ozono. Os **CFC**, geralmente designados por **fréons**, foram sintetizados pela primeira vez nos anos trinta. Por serem facilmente liquefeitos, relativamente inertes, não tóxicos, não combustíveis e voláteis, estes compostos têm sido usados como fluidos de arrefecimento em frigoríficos e aparelhos de ar condicionado, como substitutos do dióxido de enxofre e do amoníaco líquidos, ambos muito tóxicos. Os CFC são também utilizados em grande quantidade no fabrico de produtos descartáveis feitos de espumas como sejam copos e pratos, em espumas isolantes, como propulsores de aerossóis em latas de “spray” e como solventes para limpar placas recém-soldadas de circuitos electrónicos. Tem-se usado e abusado dos CFC! A maior parte dos

CFC produzidos para uso comercial e industrial acabam, mais cedo ou mais tarde, por ser lançados na atmosfera com as consequências nefastas conhecidas.

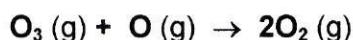
Por serem relativamente inertes, os CFC difundem-se, lentamente e sem qualquer modificação, até à estratosfera, onde a radiação UV de comprimento de onda entre 175 e 220nm causa a sua decomposição:



Os átomos de cloro reactivos que se formam sofrem as seguintes reacções:



O resultado global é a remoção efectiva de uma molécula de ozono da estratosfera:



Os átomos de oxigénio resultam da decomposição **fotoquímica** das moléculas de oxigénio e ozono, já descrita anteriormente. Mas o átomo de cloro desempenha o papel de **catalisador** no mecanismo reaccional considerado, porque não é consumido, podendo participar muitas vezes nestas reacções. Um átomo de cloro pode destruir mais de 100.000 moléculas de ozono antes de ser removido da atmosfera por outra reacção. A espécie **ClO** (monóxido de cloro) é um intermediário que é produzido na primeira reacção elementar e consumido na segunda. Foi precisamente a detecção de ClO na estratosfera, em observações atmosféricas realizadas pela NASA, que confirmaram o mecanismo de destruição do ozono.

### O “buraco” de ozono da Antártica.

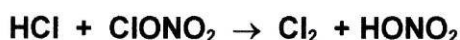
Os invernos polares, sem luz solar, são muito frios. Já se registaram temperaturas de -88 °C na Antártida e -50 °C no Ártico.

A diferença fundamental entre a região antártica e a ártica deve-se ao facto de a primeira ser um continente (tendo uma vez e meia a dimensão da Austrália) enquanto que a região ártica é formada essencialmente por mar; a sua superfície continental engloba as extremidades setentrionais da Europa, da Ásia e da América. A região antártica é muito mais fria que a região ártica já que a terra conserva menos calor que o mar. A grande massa da região ártica absorve muito calor no Verão, moderando o frio invernal.

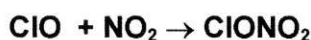


Desde os anos setenta, verifica-se um declínio do nível de ozono sobre a Antártida, durante cada primavera antártica (de setembro a novembro), atingindo os seus níveis mais baixos em outubro de cada ano. O resultado é que uma coluna da atmosfera com a dimensão do continente sobre a Antártica, o **buraco de ozono antártico**, se torna cada vez mais penetrável para a radiação IV. A explicação para este facto resulta da formação do chamado **vórtex antártico**, uma forma de vento circular, sobre o Polo Sul, durante o inverno antártico (de junho a agosto). A destruição do ozono é confinada praticamente a este vórtex.

Durante a escuridão total do inverno antártico, a temperatura estratosférica desce abaixo de  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Formam-se as **nuvens estratosféricas**, extensas e finas. São constituídas por cristais de água e ácido nítrico triidratado, que resultam da reacção da água com o dióxido de azoto. ( $\text{NO}_2$  ocorre quer naturalmente quer como produto antropogénico.) O cloro molecular,  $\text{Cl}_2$ , produto da reacção do nitrato de cloro ( $\text{ClONO}_2$ ) com  $\text{HCl}$ , acumula-se durante este tempo e é adsorvido pelos cristais das nuvens.



O  $\text{ClONO}_2$  forma-se quando  $\text{ClO}$  (formado na reacção 5) reage com  $\text{NO}_2$ .



O  $\text{HCl}$  forma-se quando o cloro atómico, proveniente do ciclo de destruição do ozono (equações 5 e 6), reage com o metano ( $\text{CH}_4$ ) para dar  $\text{CH}_3$  e  $\text{HCl}$ .

O metano, que ajuda a aumentar o buraco do ozono, é um gás poluente produzido naturalmente (nos arrozais e nos pântanos), nas explorações de gado e por fugas em *pipelines* ou libertado em jazidas de petróleo ou nas refinarias.

Quando o inverno antártico acaba e o Sol reaparece,  $\text{Cl}_2$  é libertado das nuvens e é dissociado pela radiação UV. Assim, **logo que a luz do Sol regressa e a primavera antártica começa, uma grande quantidade de átomos de cloro é libertada**. Eles vão destruir rapidamente o ozono (de acordo com as equações 5 e 6) e o buraco do ozono na Antártica aparece novamente. Em outubro de 1992, o nível de ozono desceu a valores anormalmente baixos.

Entre novembro e março, o **vórtex polar** desfaz-se e ar mais rico em ozono migra para a estratosfera antártica, vindo das médias latitudes. O resultado é uma diminuição global do nível de ozono estratosférico sobre o hemisfério sul. O México, a Austrália e a Nova Zelândia são os países mais afectados.

Já não existe qualquer dúvida sobre a contribuição nefasta dos CFC para a destruição da camada de ozono. Em 1978, os Estados Unidos foram o primeiro país a proibir os CFC como propulsores de "spray". Outros países foram-lhes seguindo o exemplo.



## 1.5. O Efeito de Estufa

A temperatura da Terra é grandemente determinada pela radiação que ela recebe do Sol. O Sol, como todos os corpos quentes, radia energia sobre a forma de ondas electromagnéticas.

A intensidade  $I$  da radiação emitida por qualquer corpo é uma função da temperatura desse corpo segundo a relação, conhecida por **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$I = e \sigma T^4$$

$I$  é a potência ( em  $W/m^2$ ) radiada por  $1 m^2$  de superfície do corpo que está à temperatura  $T$ .

$\sigma$  e  $e$  são constantes:

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

$e$  (emissividade do corpo radiante) ,  $e \leq 1$ :  $e=1$  para o corpo negro, radiador perfeito;  
 $e < 1$  para outros radiadores.

A expressão põe em evidência a forte dependência entre a potência radiada e a temperatura: um corpo a uma temperatura dupla radia 16 vezes mais energia, no mesmo intervalo de tempo.

A taxa de energia solar que atinge a Terra por unidade de superfície, **constante solar S**, tem o valor obtido experimentalmente de  **$1360 W/m^2$** .

O valor de **S** pode ser calculado, considerando que o Sol é um radiador perfeito e que a sua temperatura de superfície é de 6000K. A intensidade da radiação solar emitida pelo Sol será de  $7,35 \times 10^7 W/m^2$ . Considerando que o raio do Sol é aproximadamente  $6,96 \times 10^8 m$  e admitindo que a energia solar se reparte por uma superfície esférica de raio igual à distância média do Sol à Terra (  $1,495 \times 10^{11} m$  ), temos a intensidade solar à superfície da Terra:  $1590 W/m^2$  ( cerca de 20% mais do que o valor medido ).

Com a energia solar a radiar continuamente sobre a Terra, se esta não radiasse nenhuma energia, o nosso planeta tornar-se-ia cada vez mais quente. Para que a Terra (ou qualquer corpo) permaneça a uma temperatura de equilíbrio, a taxa de energia absorvida deve ser equilibrada pela taxa de energia radiada. A temperatura da Terra resulta do balanço entre a energia absorvida e a energia radiada.

A constante solar dá-nos a potência da radiação que vai incidir sobre cada unidade de superfície. Para determinar a radiação interceptada pela Terra, devemos multiplicar **S** pela área da projecção a duas dimensões da superfície da Terra. Esta projecção é um círculo cuja área é  $\pi \times (\text{raio da Terra})^2$ . Nem toda esta potência solar é absorvida pela

Terra. Medições feitas indicam que cerca de 30% da luz incidente é reflectida novamente para o espaço. Essa reflectividade, designada por **albedo A**, é expressa em percentagem de luz que é reflectida (30%). A fracção **(1-A)** é absorvida pela Terra.

Igualando a potência solar absorvida à potência radiada pela Terra, tem-se

$$\pi \times (\text{raio da Terra})^2 \times (1 - A) \times S = 4\pi \times (\text{raio da Terra})^2 \sigma (T_{\text{Terra}})^4$$

ou

$$(1 - A) \times S = 4 \sigma (T_{\text{Terra}})^4 ,$$

de onde vem para a temperatura  $T_{\text{Terra}}$  ,

$$T_{\text{Terra}} = [(1 - A)S / 4 \sigma]^{1/4} = 255 \text{ K} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esta temperatura coincide com a temperatura medida pelos satélites na parte mais exterior da atmosfera. É bastante baixa! Felizmente para nós, a temperatura média global à superfície da Terra é muito mais suportável com o seu valor de 298 K ou 15 °C.

A superfície da Terra tem-se mantido a esta temperatura habitável devido à presença de um manto de gases e partículas atmosféricos.

De facto, há certos gases constituintes da atmosfera que ajudam a conservar a superfície quente: são os **gases de estufa**, actualmente com tão "imerecida" má-fama.

Estes gases têm duas propriedades características: deixam passar com facilidade a radiação solar, de curtos comprimentos de onda, e absorvem muito intensamente a radiação de maiores comprimentos de onda, como a emitida pela Terra. A energia solar recebida pela Terra distribui-se ao longo de uma gama de comprimentos de onda entre 100 e 5 000 nm, embora grande parte desta energia se encontre concentrada na gama de 400 a 700 nm (região visível do espectro). Por outro lado, a energia térmica emitida pela superfície terrestre é caracterizada por comprimentos de onda superiores a 4 000 nm (região do IV) devido à muito menor temperatura média da superfície.

Assim, a radiação emitida pela Terra não passa para o exterior da atmosfera, é retida por esta. É um fenómeno semelhante ao que acontece nas estufas, daí o nome de **efeito de estufa**. O telhado de vidro de uma estufa transmite luz visível. No entanto, absorve uma parte da radiação IV reflectida a partir do interior da estufa, não a deixando passar para o exterior e retendo, assim, o calor. Os "gases de estufa" actuam como o telhado de vidro da estufa.



Antes do aparecimento do Homem sobre a Terra, já a atmosfera terrestre continha algum dióxido de carbono que, juntamente com vapor de água e outros poucos gases, fizeram o nosso planeta mais confortavelmente quente do que ele seria sem eles. Mas a nossa civilização está a lançar para a atmosfera quantidades exorbitantes de dióxido de carbono todos os anos, o que fez passar a sua concentração para 350 ppm, em volume (um aumento de 25% em relação à era pré-industrial), com a agravante de esse CO<sub>2</sub> se manter na atmosfera durante um período de 50 a 200 anos. A continuar a produzir CO<sub>2</sub> e outros gases de estufa ao mesmo ritmo, a concentração pode atingir nos próximos 50 anos, o dobro da existente antes da Revolução Industrial.

Com este panorama, os cientistas concordam que a Terra vai ficar cada vez mais quente. Contudo, as opiniões não são unânimes quanto à elevação da temperatura e ao tempo que levará a subir. A temperatura global parece ter subido de 0,3 a 0,6 °C nos últimos 100 anos, mas ninguém pode provar, com certeza, que foi o CO<sub>2</sub> (ou outros gases) a causa dessa elevação.

O clima é um sistema tão complicado que, para fazer previsões relativamente seguras, é preciso dispor de modelos muito elaborados. Os modelos de clima até agora desenvolvidos prevêem que o aumento para o dobro de CO<sub>2</sub> aumentará a temperatura da Terra entre 1,5 e 4,5 °C. A elevação de temperatura seria maior em algumas zonas do globo que noutras e seria possivelmente acompanhada por outros efeitos de clima, como variações de pluviosidade, aumento da incidência de furacões ou subida do nível das águas dos mares.

Ninguém sabe se a possível rapidez na mudança de clima pode ultrapassar a capacidade dos ecossistemas ou das instituições humanas para se adaptarem. Os esforços para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> implicam grandes investimentos da parte dos países desenvolvidos e não são compatíveis com a necessidade legítima de desenvolvimento tecnológico dos países pobres.

De qualquer forma, na sequência das Cimeiras realizadas no sentido de discutir a maneira de encarar o problema do Aquecimento Global do Planeta, alguns cientistas e os ecologistas têm defendido a adopção de medidas de prudência tendentes à redução de emissões de dióxido de carbono ou outros gases como os clorofluorocarbonetos, **CFC**, (também implicados na destruição da camada de ozono), o metano e o óxido nítrico. Se as recomendações forem seguidas e os protocolos assinados forem respeitados, pode ser que as coisas não fiquem tão feias como têm sido pintadas de modo a que as gerações vindouras possam gozar uma Terra melhor (ou pelo menos tão boa) como aquela que temos agora.



## Os gases de estufa

A energia solar recebida pela Terra distribui-se ao longo de uma gama de comprimentos de onda entre 100 e 5.000 nm, embora grande parte desta energia se encontre concentrada na gama de 400 a 700 nm (região visível do espectro), como já se referiu. Por outro lado, a energia térmica emitida pela superfície terrestre é caracterizada por comprimentos de onda superiores a 4 000 nm (região do IV) devido à muito menor temperatura média da superfície. A radiação IV reflectida pela superfície terrestre pode ser absorvida pelo vapor de água e pelo dióxido de carbono mas não pelo azoto ou pelo oxigénio. Isto deve-se a diferenças na frequência de vibração molecular, consequência das diferenças de estrutura das moléculas respectivas.

Todas as moléculas vibram mesmo quando se encontram a baixa temperatura. As energias associadas às vibrações moleculares estão quantificadas, de maneira semelhante ao que acontece com as energias electrónicas dos átomos e das moléculas. Para que a energia de vibração de uma molécula possa aumentar, esta tem de absorver um fotão (de energia adequada) na região do IV. Ao regressar ao nível inicial, vai emitir um fotão com a mesma frequência. Mas, para que a transição possa ocorrer, é necessário que o valor do seu momento dipolar varie no decurso da vibração. Se a molécula for homonuclear como o  $N_2$  e o  $O_2$ , não pode haver variação do momento dipolar, a molécula tem um momento dipolar nulo qualquer que seja a distância a que se encontram os dois átomos. Estas moléculas dizem-se inactivas no IV porque não podem absorver radiação IV. Por outro lado, todas as moléculas diatómicas heteronucleares são activas com IV; todas elas podem absorver radiação IV porque os seus momentos dipolares mudam constantemente à medida que os comprimentos de ligação variam no decorrer de uma vibração.

Uma molécula poliatômica pode vibrar de várias maneiras. A molécula de água, por exemplo, pode vibrar de três maneiras diferentes. Por ser polar, qualquer destas vibrações causa uma variação do momento dipolar porque há uma variação dos comprimentos de ligação. Assim sendo, a molécula de água é activa no IV. O dióxido de carbono tem geometria linear e é apolar. Pode vibrar de quatro formas diferentes e a **fig.1.12** mostra duas dessas formas:

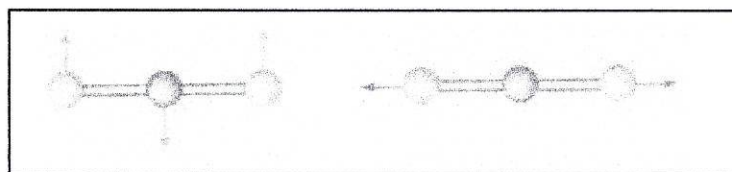
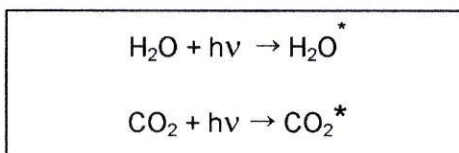


Figura 1.12 - Dois modos de vibração das moléculas de  $CO_2$

Numa dessas formas, os átomos terminais deslocam-se sempre simetricamente em relação ao centro de gravidade, não havendo assim criação de momento dipolar. Pelo contrário, no outro modo de vibração, o momento dipolar varia de zero até um valor máximo numa direcção e depois passa novamente por zero até alcançar o mesmo valor máximo quando mudar para a outra posição extrema. Deste modo, esta vibração é activa no IV.

Ao receber um fóton da região do IV, as moléculas de H<sub>2</sub>O ou as moléculas de CO<sub>2</sub> são excitadas a um nível de energia vibracional mais elevado:



O asterisco assinala uma molécula vibracionalmente excitada. Estas moléculas excitadas perdem rapidamente o seu excesso de energia, quer por colisão com outras moléculas quer por emissão espontânea de radiação. Parte desta radiação é emitida para o espaço exterior e parte dela regressa à superfície da Terra.

Embora a quantidade total de vapor de água na atmosfera não se tenha alterado significativamente ao longo do tempo, a concentração do dióxido de carbono tem vindo a aumentar constantemente desde o início da Revolução Industrial como resultado da queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão). Apesar de se verificarem oscilações sazonais da concentração de CO<sub>2</sub> causadas pelo consumo de dióxido de carbono pela fotossíntese nas estações de crescimento e pela sua acumulação durante os meses de Outono e Inverno, não há dúvidas que a tendência é para um aumento de CO<sub>2</sub>. Com um aumento, para o ano 2000, de 25% em relação aos níveis pré-industriais, alguns meteorologistas (os mais optimistas) prevêem uma subida da temperatura média da Terra de 1,5 a 4,5 °C, como já foi referido em 1.5.

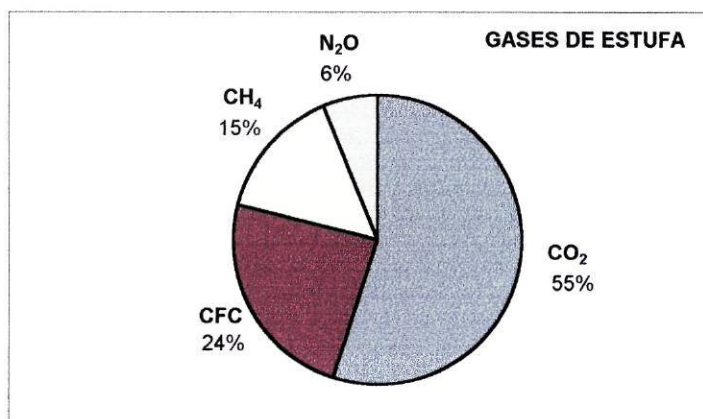


Figura 1.13- A abundância relativa dos principais gases de estufa

A juntar ao dióxido de carbono, aparecem outros “gases de estufa”: os **CFC**, o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e outros compostos voláteis.

Os CFC são cerca de 10.000 vezes mais eficazes em aprisionar calor que o  $\text{CO}_2$  enquanto que o metano é cerca de 500 vezes mais eficaz. Daí que, apesar de terem concentrações muito inferiores à do  $\text{CO}_2$ , a sua contribuição para o aquecimento global é bastante apreciável, como mostra o gráfico da **Fig.1.13**.



### **1.5.1. O efeito de estufa perto de nós ...e provocado ... para ser sentido**

É triste ter conhecimento de acidentes que acontecem, infelizmente com uma certa frequência nos meses de Verão, com animais e, pior ainda, com crianças de tenra idade que são deixadas dentro de carros fechados. De certeza que se verificaram circunstâncias como atrasos, distrações, que originaram os problemas. Por exemplo, um carro que, inicialmente estava à sombra, passou a estar sob a torreira do Sol.

Acredito também que, normalmente, uma pessoa não faz ideia da elevação de temperatura que se pode verificar numa situação dessas e as consequências que pode ter na desidratação de uma criança.

Uma notícia de um caso trágico, ocorrido na Sicília em Agosto de 1998, com um físico que deixou o filho de dois anos dentro do carro, fez-me pensar que era bom sabermos mais sobre determinados aspectos práticos que têm reflexo nas nossas vidas.

Isso veio exactamente na sequência de algumas experiências rudimentares em que pretendi estudar o efeito de estufa com material improvisado. Usei campânulas de cobrir queijo, frascos de vidro, caixas de plástico, mais ou menos transparentes. Usei vários tipos de termómetro, não de laboratório. Aproveitei, durante alguns dias, um belo Sol de Verão de que podia dispor entre as oito horas e as onze. Muito rudimentar e muito "repetitivo", fazer leituras de 10 em 10 minutos! E depois, fazer tabelas, fazer gráficos... Muito trabalho e pouco rigor!

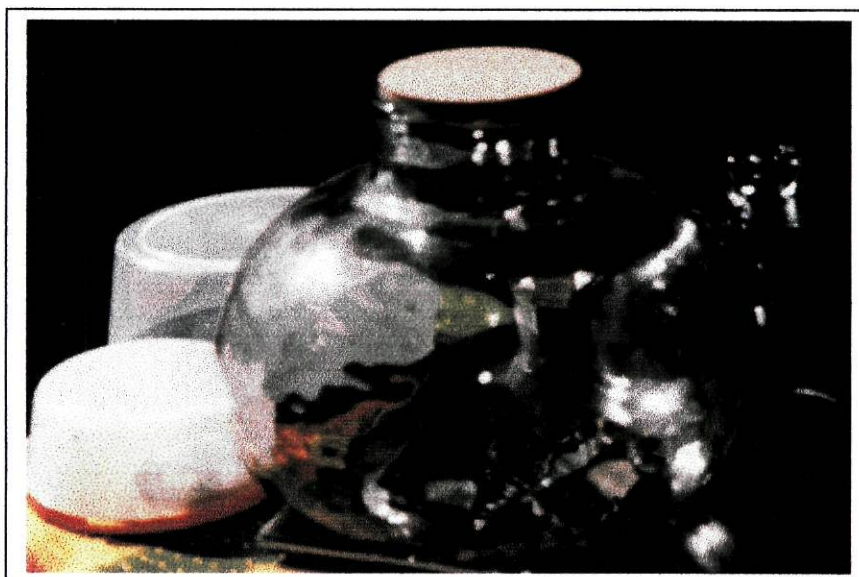


Figura 1.14. - Muitas estufas

O conjunto de vasos representado na Fig.1.14 foi exposto ao sol. Observou-se a elevação de temperatura no seu interior. Sendo de materiais diferentes (vidro e plástico), com dimensões diferentes (capacidade e espessura), é distinto o aquecimento nos vários recipientes. A temperatura interior inicial, em cada caso é idêntica (igual à temperatura exterior). De notar que, por efeito de estufa, chegou a haver um aumento de temperatura de 22,5 °C.

Colocando os vasos à sombra, passou a observar-se o arrefecimento no seu interior.

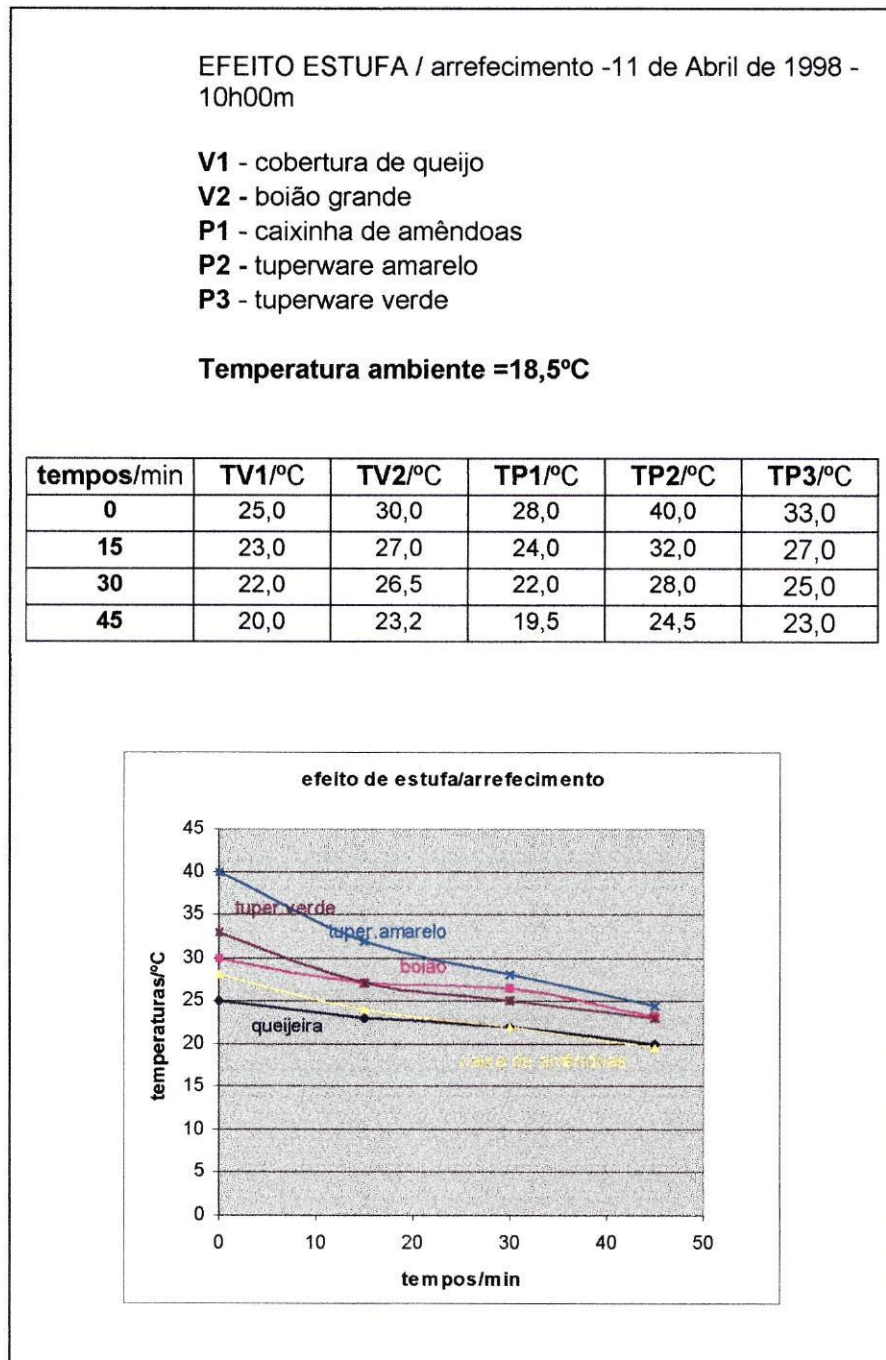


Figura 1.15 - Curvas de arrefecimento nas estufas

Verifica-se que os vasos onde a elevação de temperatura foi maior foram aqueles que arrefeceram mais depressa.

**EFEITO DE ESTUFA / 17 de Abril de 1998 - 8h00m**

Dois frascos idênticos, de vidro:

**V1-** sobre fundo preto

**V2-** sobre fundo branco

**Ta-** temperatura ambiente

**Tsol-** temp. ao Sol

**TV1-** temp. do frasco **V1**

**TV2-** temp. do frasco **V2**

**intervalo de tempo=10 min**

tempos/min	Ta/ °C	Tsol/°C	TV1/°C	TV2/°C
0	15,0	15,0	15,0	15,0
10	16,0	19,0	21,5	20,0
20	16,0	21,0	21,5	26,5
30	16,0	23,0	29,0	27,0
40	16,5	23,5	30,5	29,2
50	17,0	25,0	32,5	30,0
60	17,0	25,5	36,5	32,0
70	16,5	27,0	38,0	33,0
80	16,8	30,0	42,5	36,8
90	16,8	31,0	45,5	38,0
100	16,8	31,0	46,0	38,0
110	17,0	32,5	48,0	37,5

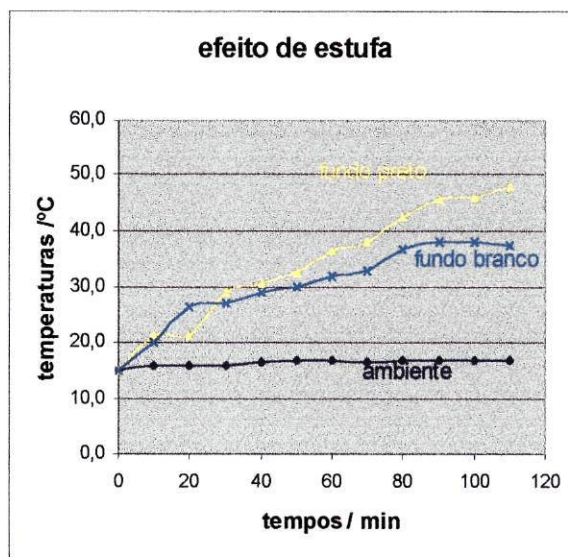


Figura 1.16 - Registos de aquecimento / fundo branco+fundo preto



A experiência que forneceu os dados da **fig. 1.16** consiste no estudo do "efeito de estufa" observado em dois balões idênticos, um colocado sobre um fundo branco e outro colocado sobre um fundo preto, ao sol.

A elevação de temperatura dentro do balão de fundo escuro verifica-se ser maior do que a que se observa no balão de fundo branco.

Na sequência da experiência anterior, procedeu-se ao arrefecimento dos balões, colocando-os à sombra: **é mais rápido o arrefecimento do balão de fundo preto**, como se observa dos dados seguintes:

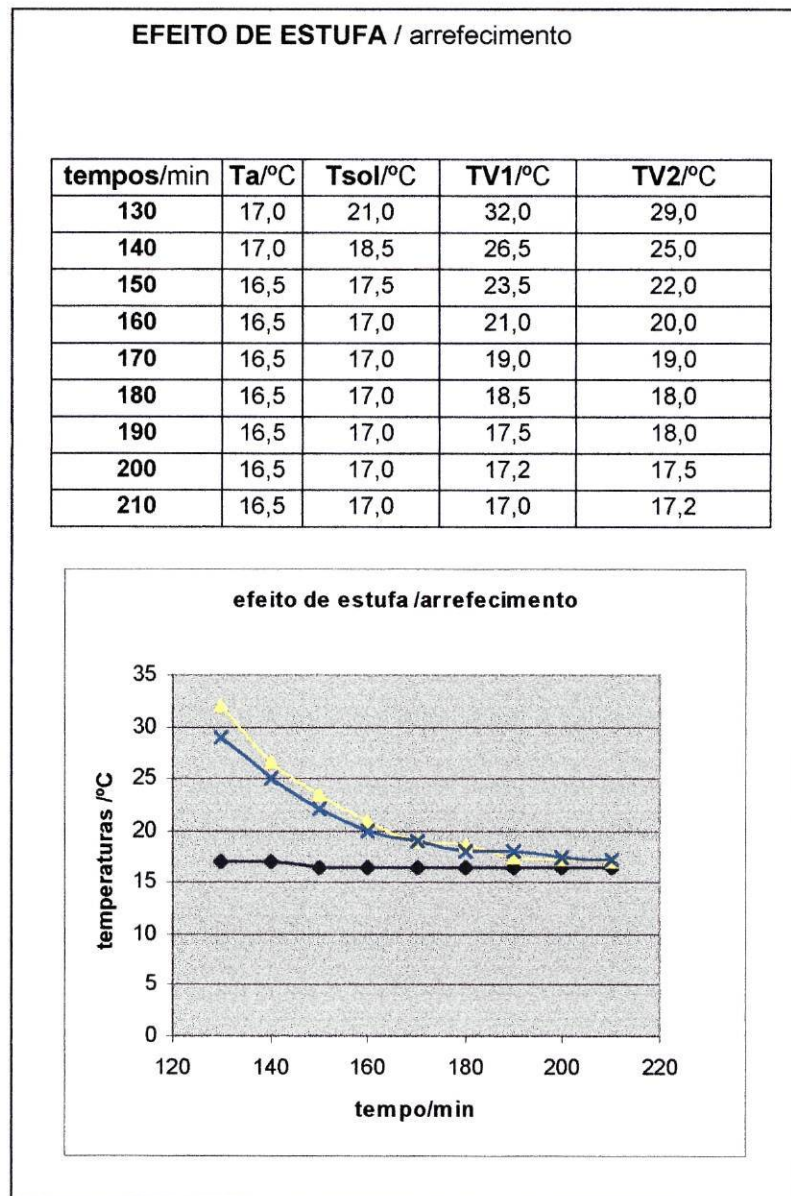


Figura 1.17 - Registos de arrefecimento / fundo branco+fundo preto

## 1.6. O Mundo preocupa-se

Embora todos os problemas ambientais tenham um impacto em grau variável fora das fronteiras dos países em que os problemas têm origem, a **depleção do ozono/ efeito estufa** têm consequências em todo o Mundo.

A tomada de consciência da severidade da situação e a implementação de acções correctivas por todos os países industrializados é essencial. É lógico, assim, que "**o buraco do ozono**" e o **efeito de estufa** tenham sido a motivação para a realização de encontros globais para discussão destes problemas ambientais.

Em 1987, os Estados Unidos e 23 outros países assinaram o Protocolo de Montreal sobre as substâncias que destroem a camada de ozono na estratosfera. Estes países prometeram reduzir a sua produção e importação de **CFC** e **halons** de 50% até 1999. Como resultou de pesquisas posteriores que a perda de ozono era mais grave do que a prevista, os signatários do Protocolo de Montreal procederam, em 1990, à revisão do tratado para pedir a eliminação total da produção dos **CFC** e importação para o ano 2000 e alargaram significativamente a lista de compostos apontados para o faseamento.

Em Novembro de 1992, o Protocolo de Montreal foi novamente revisto para proibir a produção dos **CFC** a começar em Janeiro de 1996. Os **HCFC** (hidroclorofluorocarbonetos) serão reduzidos a partir de 2010. Estes compostos foram introduzidos como substitutos temporários dos **CFC** nos sistemas de refrigeração e ar condicionado de grandes edifícios mas, embora quimicamente semelhantes, são menos estáveis e quebram-se mais depressa quando são libertados na atmosfera. Por esta razão, os **HCFC** são de longe menos causadores de dano na camada de ozono. Os **HFC** (hidrofluorocarbonetos) são também um substituto de transição para os **CFC** nos sistemas de ar condicionado dos automóveis e frigoríficos domésticos.

O Protocolo de Montreal também exige a reciclagem para reduzir a libertação na atmosfera dos químicos já existentes.

A implementação do Protocolo é, no entanto, da exclusiva responsabilidade individual dos países e não há nenhuma autoridade zeladora da sua aplicação.

Cientes de que o aquecimento da Terra se está já a verificar e de que todos temos, possivelmente, contribuído para isso, foi em **Quioto** que se reuniram delegados de todo o Mundo, em Dezembro de 1997, para discutir as medidas necessárias para limitar as emissões de gases de estufa. Várias posições colidiram nesta cimeira, em particular a intransigência inicial dos Estados Unidos e os interesses do resto do Planeta.

Com a Europa a apoiar 15% de cortes nas emissões pelos países desenvolvidos e defendendo que os países em vias de desenvolvimento ficassem fora do acordo até os



países ricos tomarem providências, a proposta dos Estados Unidos para uma estabilização dos níveis de 1990 em troca de novas obrigações dos países pobres teve fraco apoio.

Claro que todos os países chegaram à Cimeira com posições que reflectiam os seus próprios interesses. É que, se os benefícios resultantes dos cortes das emissões são significativos, os custos também os são. Não é de estranhar que as posições dos vários países sejam estabelecidas numa base de custo / benefício.

A Alemanha e a Inglaterra não tinham muito a perder ao apoiar uma redução drástica das emissões já que enfrentariam custos relativamente baixos na medida em que já vinham a reduzir as emissões desde 1990, o ano patamar a partir do qual o acordo seria estabelecido. Na Alemanha, isso aconteceu devido à integração da Alemanha de Leste em 1990 do que resultou o encerramento da maior parte da sua indústria, altamente poluente. No Reino Unido, a primeiro-ministro Margaret Thatcher conseguiu, após uma guerra com os mineiros, fechar a maior parte da indústria do carvão e começou uma "corrida para o gás" que reduziu as emissões britânicas depois de 1990.

Uma análise **custo / benefícios** também se justifica no caso de países que advogam a não-tomada de medidas - como a Austrália e os países produtores de petróleo do Médio Oriente - já que se defrontam com altos custos de que não adviriam benefícios políticos domésticos.

No caso dos países pobres, embora os custos para diminuir as suas emissões sejam baixos, também são pequenos os benefícios a curto-prazo. Os governos destes países têm normalmente prioridades mais imediatas, tais como alimentar e escolarizar as suas populações e construir uma indústria de base, que ultrapassam as preocupações ambientais.

Apesar do receio de não se conseguir um acordo final tendo partido de posições tão diversas, o Protocolo de Quioto conduziu ao estabelecimento de um corte de 7% das emissões.

Em Novembro de 1998, governantes de 180 países signatários da Convenção das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas reuniram-se em Buenos Aires para discutir a aplicação do Protocolo de Quioto na redução das emissões dos gases que contribuem para o efeito de estufa na atmosfera e para proceder à assinatura do Acordo.



## **2. AS TRANSFERÊNCIAS DE ENERGIA (COMO CALOR)**

### **O calor no dia-a-dia**

A vida quotidiana sugere-nos uma variedade imensa de perguntas associadas ao que conhecemos sobre calor.

1. Porque é que, num dia de Inverno, a porta metálica dum carro se sente mais fria que o vidro da janela, embora estejam ambos à mesma temperatura?

2. Onde é mais agradável sentarmo-nos, num dia frio de Inverno: num banco de jardim metálico (de alumínio) ou num de madeira?

3. Porque é que uma sopa espessa se mantém quente mais tempo que uma sopa rala (pouco consistente)?

4. Porque é que uma fogueira é mais viva quando as achas se dispõem sobre uma grelha?

5. Porque é que uma forma de bolos preta aquece mais rapidamente no forno que uma forma brilhante ou metalizada?

6. Porque é que se pode meter a mão num forno quente durante algum tempo sem nos queimarmos e nos queimamos imediatamente se tocarmos em qualquer corpo metálico dentro do forno?

7. Porque é que se aquecem recipientes com água dentro do forno para cozer em banho-maria, por exemplo, pudins ou “soufflés”?

8. Porque é que a maior parte dos frigoríficos têm o congelador na parte superior?

9. Porque é que os termómetros clínicos modernos podem medir a temperatura quase instantaneamente detectando a radiação emitida pela superfície interior do ouvido?

10. Porque é que, embora estando à mesma temperatura um chão de tijoleira e um chão alcatifado, os nossos pés descalços sentem o de tijoleira mais frio?

11. Como é que uma camada de gordura debaixo da pele ajuda os animais a manter-se quentes?

12. Sentimos mais frio quando está vento, mesmo que a temperatura do vento seja a mesma do ar parado. Porquê?

13. Os jornais informam-nos: “O Space Shuttle, ao reentrar na atmosfera terrestre, desenvolve, à sua superfície, temperaturas enormes provocadas por atrito. A sua superfície é revestida por uma camada espessa de material cerâmico poroso.” Como é que este revestimento poroso mantém o vai-vem frio?

Se estas são só algumas das perguntas com que nos deparamos todos os dias, justifica que se faça um estudo sobre as transferências de energia sob a forma de calor, entre os corpos.

Acontece ainda que nos debatemos com dois tipos de problemas.

O **primeiro** ocorre quando queremos "**conservar calor**" (linguagem corrente) dentro de uma casa, de uma sala, de um recipiente com alimentos, por exemplo. Neste caso, a transferência de energia térmica para o exterior deve ser a menor possível e convém que seja evitada. Temos um problema de isolamento a resolver.

O **segundo** ocorre quando interessa que as transferências de energia térmica para o exterior sejam tão grandes quanto possível. Isso acontece em todas as máquinas com reservatórios de calor onde um fluido absorve e rejeita calor, como é o caso do radiador de um automóvel.

Em qualquer situação, sempre que há transferência de energia térmica entre um sistema e o meio exterior, isso acontece porque **existe uma diferença de temperaturas** entre o sistema e qualquer parte do meio exterior. Esta é a **definição de calor**:

**CALOR é a energia transferida de um sistema para o exterior devida única e exclusivamente a uma diferença de temperatura entre esse sistema e o exterior.**

Nesta transferência de energia não há interferência de forças macroscópicas mas só forças entre partículas que têm por efeito levar ao equilíbrio de temperatura dos corpos em presença.

É importante assinalar que **a matéria não possui calor**: possui energia térmica. As partículas que constituem a matéria possuem energia cinética molecular e, possivelmente, energia potencial, mas não calor. Calor é energia em trânsito, de um corpo a temperatura mais alta para outro(s) a temperatura mais baixa.

Um sistema possui **energia interna**. A energia interna é o somatório de todas as energias dentro de um sistema. A adicionar à energia cinética de translação das partículas em constante movimento, há outros tipos de energia: a energia cinética de rotação das moléculas e a energia cinética de vibração devido ao movimento interno dos átomos dentro das moléculas e ainda a energia potencial devida às interações entre as moléculas. Portanto, um sistema tem energia interna.

Quando há transferência de energia para o sistema ou do sistema para o exterior, a energia interna do sistema varia. Assim, se o sistema absorve calor, a sua energia interna aumenta, a menos que se verifique uma mudança de estado (por exemplo, gelo que funde



ou água que se evapora). Esse aumento de energia interna traduz-se por uma maior agitação das suas moléculas (com uma maior energia cinética molecular média) a que corresponde uma temperatura mais elevada.

O fluxo de calor faz-se, livremente, de um corpo a temperatura mais alta para outro a temperatura mais baixa mas não necessariamente de um corpo com maior energia interna para outro com menor energia interna. A água quente de uma taça contém mais energia interna que uma moedinha ao rubro; se a moeda for mergulhada na água, o calor passa da moeda para água.

Portanto, todos os corpos entre os quais se verifica transferência de energia térmica tendem a alcançar uma temperatura comum. Esta igualização das temperaturas pode ser alcançada por quatro processos: **radiação**, **condução**, **convecção** e **mudança de fase**.

Os quatro processos básicos de transferência de calor a considerar ocorrem:

1. por **radiação** que se verifica sem necessidade de suporte material;
2. por **condução** em sólidos ou líquidos e gases em repouso;
3. por **convecção** em líquidos ou gases em movimento;
4. por **mudança de fase** (por exemplo, na condensação e na congelação há libertação de calor e, nas mudanças inversas, há absorção de calor).

Embora estudados separadamente, convém ter presente que estes fenómenos, em situações concretas, podem produzir-se simultaneamente.



## **2.1. A Radiação**

### **2.1.1. O espectro contínuo**

Quando se aquece uma haste de ferro ou se liga o disco de um fogão eléctrico sente-se a emissão de radiação infravermelha mesmo que a sua temperatura não seja suficiente para emitir luz visível em quantidades apreciáveis. Esta radiação infravermelha pode detectar-se colocando a mão na proximidade do ferro porque a nossa pele é sensível a estas radiações caloríficas; também se pode utilizar uma película especial, sensível ao IV que permite fotografar o corpo numa sala totalmente às escuras. Ao aumentar a temperatura do ferro, a radiação emitida vai-se tornando visível. Entre 500°C e 550 °C, emite luz visível em quantidades apreciáveis, de comprimentos de onda à volta de 750 nm (vermelho); diz-se então que o ferro está **ao rubro**. Se se aumentar ainda a temperatura, vai sendo emitida radiação de comprimentos de onda cada vez mais curtos e a cor muda, passando pelo laranja, pelo amarelo até chegar ao branco. Dizemos que o ferro atingiu o **rubro branco**.

O que se verifica para o ferro, em termos de radiação, verifica-se também para qualquer sólido ou líquido incandescente. Fazendo-se passar a radiação através de um prisma ou rede de difracção adequados, obtém-se um **espectro contínuo**, incluindo as zonas dos UV e dos IV a que os nossos olhos não são sensíveis.

Vê-se, portanto, que um corpo não precisa de estar tão quente que seja luminoso para radiar energia; todos os objectos radiam energia continuamente, qualquer que seja a sua temperatura, embora as frequências da radiação emitida dependam da temperatura. À temperatura ambiente, a maior parte da radiação situa-se no IV e, assim, é invisível (para os nossos olhos).

A capacidade de um corpo para radiar está perfeitamente relacionada com a sua capacidade para absorver radiação. Assim será de esperar já que um corpo, a temperatura constante, está **em equilíbrio térmico** com o exterior e deve absorver energia deste à mesma razão que ele emite energia.

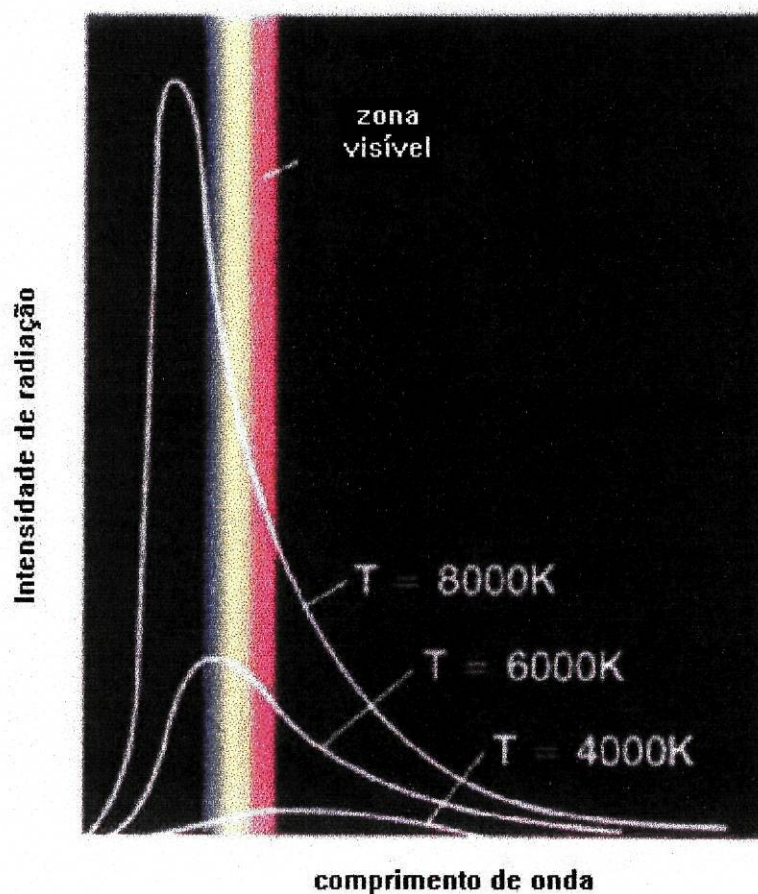


Figura 2.1 - Distribuição da energia na radiação emitida por um sólido a 4 temperaturas diferentes

À distribuição da energia na radiação emitida por um corpo, a uma dada temperatura, corresponde uma curva típica associada aos diferentes comprimentos de onda da radiação emitida. Para um sólido a uma temperatura igual à da superfície do Sol (6000 K), o máximo da curva, na parte visível do espectro, corresponde à região do verde. É esta distribuição de energia que os nossos olhos interpretam como luz branca. No que se refere à energia total emitida, a maior parte situa-se no infravermelho.

Na **fig. 2.1**, aparecem outras duas características que têm em comum os sólidos e os líquidos. Ao aumentar a temperatura, aumenta a energia associada com cada zona de comprimentos de onda, como seria de esperar; mas o que é mais surpreendente é que o máximo da curva de distribuição se desloca para comprimentos de onda cada vez mais curtos à medida que a temperatura aumenta.

Verifica-se que a radiação emitida por todos os sólidos e líquidos é muito semelhante, independentemente da composição química. Isso sugeriu que se estabelecesse uma teoria única, aplicável a todos. Acontece, porém, que a radiação emitida por unidade de tempo, além de depender da temperatura, ainda depende da natureza da



superfície do corpo. Para uma mesma temperatura, um corpo sólido pintado de negro opaco emite (e também absorve) bastante mais energia radiante por segundo do que se estivesse coberto com pintura de alumínio. Ainda, se a superfície é rugosa, é **melhor absorvente** (pior reflector) e **melhor emissor** do que se estivesse polido.

Seria conveniente considerar um corpo que absorvesse todo o tipo de radiação a incidir sobre ele, independentemente da frequência. Seria o “**emissor**” ideal a emitir sempre com a máxima eficiência possível, a qualquer temperatura, e fácil de construir para fins experimentais. Esse corpo teórico é o **corpo negro**.

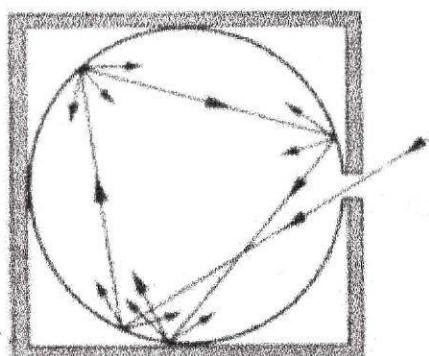


Figura 2.2- O corpo negro

### 2.1.2. A radiação do corpo negro

O **corpo negro** é um corpo ideal de que podemos ter uma aproximação, no laboratório, dispondo de um corpo oco com um pequeno orifício que dá acesso ao seu interior. Qualquer radiação, que vinda do exterior, penetre na abertura, difunde-se no seu interior e é absorvida gradualmente nas sucessivas reflexões que sofre no interior, de modo que a radiação que sai para o exterior é desprezável.

A **abertura** actua como um absorvente perfeito .

Ao colocar este dispositivo num forno, as paredes interiores da cavidade estão continuamente a radiar e a parte da energia radiada que sai é a **radiação do corpo negro**.

Experimentalmente, teremos, portanto, uma amostra de radiação do corpo negro examinando a que emerge do orifício da cavidade. O corpo negro tem uma intensidade de radiação (energia emitida por unidade de tempo e de superfície) tanto maior quanto maior for a sua temperatura. O comprimento de onda a que corresponde a intensidade máxima varia na razão inversa da temperatura.



## Duas leis clássicas para a radiação do corpo negro

A descoberta do **corpo negro** ( uma cavidade que emite radiação como a **superfície negra ideal** ) tornou possível a verificação experimental das leis para esta radiação.

**1. Lei de Stefan – Boltzmann (1879)** : a energia radiada por um corpo, por unidade de tempo e por unidade de superfície,  $I$ , cresce com a quarta potência da temperatura:

$$I_{\text{rad}} = e \sigma T^4$$

com  $\sigma$  (constante de Stefan) =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  .

O parâmetro  $e$ , emissividade , que toma valores entre **0** e **1**, traduz a dependência de  $I$  da natureza da superfície. Para uma superfície completamente reflectora,  $e=0$ , o corpo só reflecte ( não emite e não absorve ). Para uma superfície negra,  $e=1$ , o corpo só emite e só absorve, não reflecte. Um corpo com  $e=1$  é um corpo negro. Em geral,  $e$  pode depender de  $\lambda$ . Um corpo negro ideal é negro não só na zona do visível, mas também para todo o espectro: não reflecte nenhum comprimento de onda.

Se dois corpos semelhantes, à mesma temperatura, estão em equilíbrio térmico de radiação, a energia emitida é igual à energia absorvida. Logo, a energia absorvida exprime-se por

$$I_{\text{abs}} = e \sigma T^4$$

sendo  $T$  a temperatura da fonte que a emitiu.

**2. Lei de Wien ( 1893 )** : O comprimento de onda a que corresponde a intensidade máxima,  $\lambda_{\text{máx}}$  , varia inversamente com a temperatura:

$$\lambda_{\text{máx}} T = B$$

com  $B = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$

A expressão anterior permite determinar a temperatura aproximada da superfície de um emissor, tal como o nosso Sol. As observações feitas ao nível do mar indicam um valor de  $\lambda_{\text{máx}}$  para a luz solar da ordem de 500 nm (na região do verde extremo do espectro visível). A equação prevê que a temperatura  $T$  da superfície radiante do Sol será de 5000 K. Contudo, como parte da radiação do Sol é absorvida pela atmosfera da Terra

(principalmente nos comprimentos de onda curtos), o valor calculado de  $\lambda_{\text{máx}}$  é maior do que o real pelo que a temperatura é calculada por defeito. Outra causa de erro deve-se ao facto do Sol não ser uma superfície negra ideal à qual se possa aplicar a lei, com toda a precisão.

### 2.1.3. Interpretação do espectro do corpo negro

Como se justifica a forma característica do espectro do corpo negro?

O problema foi analisado nos fins do séc. XIX por Lord Rayleigh e James Jeans.

Rayleigh e Jeans consideraram um **corpo negro** como uma cavidade cheia de radiação à temperatura **T**. Como as paredes da cavidade são consideradas perfeitamente reflectoras, a radiação deve consistir de ondas electromagnéticas estacionárias.

Podemos obter ondas estacionárias com uma corda fixa nos extremos.

Para que um nodo ocorra em cada parede (extremo), a distância de parede a parede, em qualquer direcção, deve ser igual a um número inteiro de semi-comprimentos de onda.

Generalizando a três dimensões, se a cavidade é um cubo de aresta **L**, esta condição quer dizer que, para as ondas estacionárias nas direcções **x**, **y** e **z**, respectivamente, os possíveis comprimentos de onda  $\lambda$  são tais que

$$L = n_x \cdot \lambda / 2, \text{ com } n_x = 1, 2, 3, \dots$$

$$L = n_y \cdot \lambda / 2, \text{ com } n_y = 1, 2, 3, \dots$$

$$L = n_z \cdot \lambda / 2, \text{ com } n_z = 1, 2, 3, \dots$$

Para uma onda estacionária, em qualquer direcção arbitrária, deve ser verdade que  $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = (2L/\lambda)^2$  em que  $n_x = 0, 1, 2, \dots$   $n_y = 0, 1, 2, \dots$   $n_z = 0, 1, 2, \dots$  de modo que a onda tenha um nodo em cada extremidade.  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  não podem anular-se simultaneamente (não haveria onda) mas é possível que um ou dois dos **n** seja nulo.

Para contar o número de ondas estacionárias  $g(\lambda) d\lambda$  dentro da cavidade cujos comprimentos de onda estão entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ , o que se tem de fazer é contar o número de conjuntos de valores de  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  compatíveis com os valores do comprimento de onda no intervalo  $[\lambda$  e  $\lambda + d\lambda]$ .

Se imaginarmos um **espaço dos n** cujos eixos coordenados sejam  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$ , cada ponto neste espaço corresponde a um conjunto permitido de valores  $(j_x, j_y, j_z)$  e, assim, a uma onda estacionária.

Se **n** é um vector definido a partir da origem para  $(n_x, n_y, n_z)$ , a sua grandeza é  $n = (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)^{1/2}$ . O número total de comprimentos de onda entre  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$  é o mesmo que o número de pontos no **espaço dos n** cuja distância à origem estão entre **n** e **n+dn**.



O volume de uma camada esférica de raio  $n$  e espessura  $dn$ , é  $4\pi n^2 dn$  interessando apenas o octante dos  $n$  positivos. Além disso, para cada onda estacionária contada desta maneira, há duas direcções perpendiculares de polarização.

Assim, o número de ondas estacionárias presentes na cavidade é

$$g(n)dn = (2) (1/8) (4\pi n^2 dn) = \pi n^2 dn$$

Como nos interessa o número de ondas estacionárias em função da frequência,

$$g(\nu) d\nu = \pi (2L\nu/c)^2 (2L/c) d\nu = (8\pi L^3 \nu^2/c^3) d\nu .$$

O volume da cavidade é  $L^3$ , o que quer dizer que o número de ondas estacionárias por unidade de volume é

$$G(\nu)d\nu = (8\pi\nu^2/c^3) d\nu$$

A equação é independente do volume e da forma da cavidade, embora a dedução seja mais fácil considerando a cavidade cúbica. Como era de esperar, quanto maior for a frequência menor é o comprimento de onda e, portanto, maior o número de possíveis ondas estacionárias.

Para calcular a energia média por onda estacionária, considera - se o **Teorema da equipartição da energia** : a energia média  $E_m$  por grau de liberdade de uma entidade (por exemplo, a molécula de um gás ideal) em equilíbrio térmico, à temperatura  $T$ , é

$$E_m = (1/2) k_B T$$

$$k_B \text{ (constante de Boltzmann)} = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

A energia cinética de translação de uma molécula de gás é igual a  $(3/2) k_B T$ .

Um oscilador harmónico unidimensional tem dois graus de liberdade, um que corresponde à energia cinética e outro que corresponde à energia potencial. Como cada onda estacionária numa cavidade tem origem num oscilador na parede da cavidade, a onda está associada a dois graus de liberdade e, portanto, terá uma energia média

$$\varepsilon = 2 (1/2) k_B T.$$

A energia total é

$$u(\nu)d\nu = \varepsilon G(\nu)d\nu = (8\pi k_B T \nu^2/c^3) d\nu$$

- fórmula de Rayleigh-Jeans

Portanto, a taxa de radiação é proporcional a esta densidade de energia para frequências entre  $\nu$  e  $\nu+d\nu$ .

A **fórmula de Rayleigh-Jeans** contém tudo o que a Física Clássica pode dizer acerca do **espectro do corpo negro**.



Analisando a expressão, verifica-se que, à medida que a frequência aumenta para a banda do UV do espectro, esta fórmula prevê que a densidade de energia aumenta com  $\nu^2$ . No limite de frequências infinitamente altas,  $u(\nu)d\nu$  tenderia para infinito. Na realidade, a densidade de energia (e a taxa de radiação) cai para zero quando  $\nu$  tende para infinito. A esta discrepância chamou-se **catástrofe do ultravioleta**.

Esta falha da Física Clássica levou **Max Planck** em 1900 a descobrir que só se considerasse uma emissão de luz como um fenómeno quântico é que se poderia chegar a uma expressão de  $u(\nu)d\nu$  que estivesse de acordo com as observações experimentais.

Classicamente, para uma dada frequência  $\nu$ , a energia das ondas estacionárias ou dos osciladores variava de modo contínuo. Planck considerou duas hipóteses:

**1. Um oscilador só pode possuir determinadas energias.** Estas energias permitidas são múltiplos inteiros de uma quantidade  $h\nu$  em que **h** é uma nova constante universal – a **constante de Planck** – e  $\nu$  é a frequência do oscilador. Assim, a energia **E** de um oscilador em qualquer momento pode ser **0,  $h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$**  e, em geral,  **$nh\nu$** , em que **n** é um número inteiro. Resumindo,  **$E = nh\nu$** , em que  **$h\nu$**  se chama **quantum de energia** correspondente à frequência  $\nu$ .

**Um oscilador radia somente quando passa de um valor permitido da sua energia para outro próximo inferior**, e a perda de energia  $\Delta E$  que experimenta é emitida como um pulso de radiação electromagnética de energia  $h\nu$ .

Planck usou a **lei de distribuição de Maxwell-Boltzmann** para determinar que o número de electrões com uma energia  $\epsilon$ , à temperatura **T**, é proporcional a  $e^{-\epsilon/k_B T}$ . Neste caso, a energia média por oscilador (e também por onda estacionária na cavidade) é

$$\epsilon = (h\nu) / (e^{h\nu/k_B T} - 1)$$

em vez de  $\epsilon = k_B T$  (equipartição de energia que Rayleigh e Jeans usaram).

A fórmula de **Planck para a radiação** será:

$$u(\nu)d\nu = \epsilon G(\nu)d\nu = (8 \pi h/c^3) (\nu^3 / (e^{h\nu/k_B T} - 1)) d\nu$$

que concorda com as observações experimentais.

Do ponto de vista dos conhecimentos actuais, a fórmula de Planck é incorrecta. Sabe-se que os osciladores nas paredes da cavidade têm energias  $\epsilon_n = (n+1/2) h\nu$  e não  $h\nu$ . Mesmo a 0K, a energia mínima não é nula: é  **$(1/2) h\nu$** .

O processo adequado para dedução da fórmula deve considerar as ondas electromagnéticas numa cavidade como um gás de fotões a que se aplica a estatística de

**Bose-Einstein**, já que o spin de um fóton é 1. O número médio de fótons  $g(\nu)$  em cada estado de energia  $\varepsilon = h\nu$  é dado pela **função de distribuição de Bose-Einstein**:

$$g(\nu) = 1 / (e^{h\nu / k_B T} - 1)$$

A equação que dá o número de ondas estacionárias de frequência  $\nu$  por unidade de volume numa cavidade ainda é válida para o número de estados quânticos de frequência  $\nu$  já que os fótons também têm duas direcções de polarização que correspondem a duas orientações de spin. A densidade de energia dos fótons numa cavidade é, portanto:

$$u(\nu)d\nu = h\nu G(\nu)d\nu = (8 \pi h/c^3) ((\nu^3 / (e^{h\nu / k_B T} - 1))) d\nu$$

Qualquer corpo de matéria condensada radia energia de acordo com a expressão anterior. Para que um corpo emita radiação não é necessário que esteja suficientemente quente para que se veja a brilhar na região do visível. A radiação de um corpo à temperatura ambiente situa-se principalmente na zona infravermelha do espectro a que a nossa vista não é sensível. Por essa razão o interior de uma estufa é mais quente do que o exterior porque a luz solar pode entrar através dos seus vidros mas a radiação infravermelha libertada no interior não pode escapar através deles.

É um facto observado que o espectro do corpo negro apresenta um máximo de densidade de energia para um comprimento de onda característico da temperatura.

A transformada da expressão de  $u(\nu)d\nu$ , escrita em função do comprimento de onda, permite determinar  $\lambda$  máximo quando  $du(\lambda) / d\lambda = 0$ . Obtém-se a expressão

$$hc / (kT \lambda_{\text{máx}}) = 4,965$$

que pode assumir a forma

$$\lambda_{\text{máx}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$$

que constitui a **lei do deslocamento de Wien** já referida em 2.1.3.. Ela exprime quantitativamente o facto empírico de o máximo, no espectro do corpo negro, se deslocar progressivamente para comprimentos de onda mais curtos (frequências mais altas), quando a temperatura aumenta.

Outro resultado que se pode obter da expressão de  $u(\nu)d\nu$  é a densidade total da energia dentro de uma cavidade. Corresponde ao integral da densidade de energia para todas as frequências (de  $\nu = 0$  até  $\nu = \infty$ ).

$$u = \int u(\nu)d\nu = (8 \pi^5 k_B^4 / 15 c^3 h^3) T^4 = a T^4$$

em que  $a$  é uma constante universal. A densidade de energia total é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta das paredes da cavidade. Portanto, a potência radiada por unidade de área, ou seja a intensidade  $I$ , é também **proporcional a  $T^4$  (lei de Stefan-Boltzmann)**:

$$I = e \sigma T^4$$

A emissividade  $e$  depende, como já foi referido anteriormente, da natureza da superfície radiante e varia entre **0**, para um reflector perfeito que não radia nada, e **1**, para um corpo negro. Alguns valores típicos de  $e$ : 0,07 para o aço polido, 0,60 para cobre ou latão oxidado e 0,97 para uma pintura negra mate, para a luz visível.



## 2.1.4 EXPERIÊNCIAS DE RADIAÇÃO

### Observação do espectro de um sólido incandescente

A cor de um corpo quente e o espectro contínuo emitido depende da sua temperatura. A temperaturas ordinárias, a emissão é invisível porque os nossos olhos não são sensíveis às radiações emitidas. À medida que a temperatura aumenta, há emissão de calor e nós podemos sentir a emissão dessa radiação térmica. A temperaturas ainda mais elevadas, atingindo-se o nível das radiações visíveis, podemos observar esta emissão, começando por ver-se o corpo incandescente ao rubro sombrio, depois ao rubro vermelho e, para temperaturas suficientemente elevadas, pode atingir o rubro branco.

Consideremos, por exemplo, o filamento de uma lâmpada de incandescência. O espectro contínuo de todos os sólidos incandescentes é semelhante. O espectro de cor alarga-se do vermelho ao azul e violeta, à medida que a temperatura do corpo aumenta. Isto é, à sucessão, ordenada, das cores espectrais corresponde uma sucessão crescente - do vermelho para o violeta - dos valores energéticos das radiações emitidas, em consonância com a **relação de Planck**:

$$\varepsilon = n h \nu$$

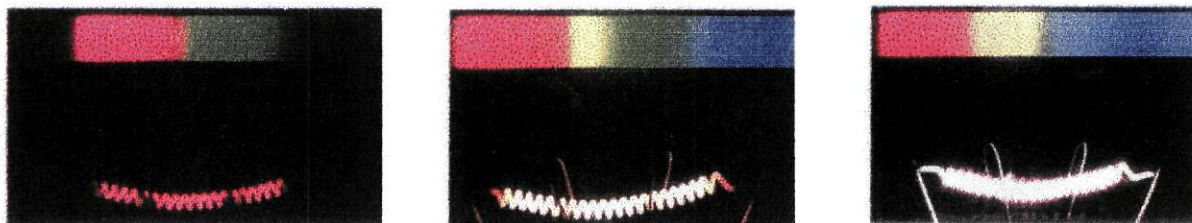


Figura 2.3 - O espectro desloca-se para o azul ...

## **Com carvão incandescente**

### **Material:**

Carvão

Pinça de suporte para o carvão

Bico de Bunsen

Espectroscópio de bolso

Maçarico de boca

### **Modo de proceder:**

Na sala **às escuras**, aquece-se um pedaço de carvão com a chama do bico de Bunsen até uma parte se tornar incandescente. Observa-se, com um espectrómetro de bolso, o espectro emitido: é **vermelho, amarelo e laranja** (os dois numa extensão reduzida, praticamente uma risca) e **verde**.

Activa-se a incandescência soprando a brasa com um maçarico de boca (ou o equivalente: um tubo de vidro com a extremidade afilada). Observa-se o espectro a deslocar-se. Começa a observar-se uma faixa mais larga de **amarelo e laranja**. Se o fôlego for suficiente, pode observar-se o **azul** (ou mesmo o **violeta**).

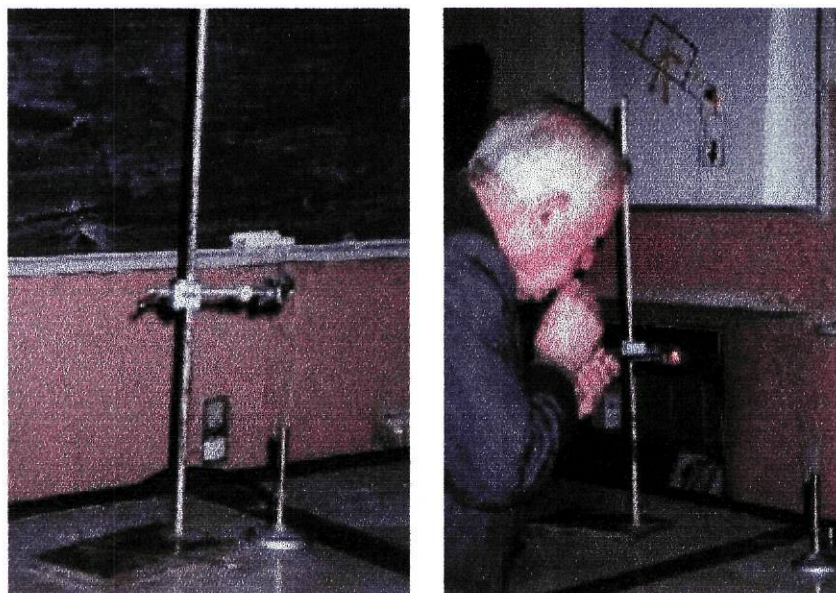


Figura 2.4 - O espectro do carvão incandescente

Esta experiência, a ser realizada por grupos de três alunos que, rotativamente, activam a combustão do carvão, observam o espectro e registam as cores observadas, evidencia a associação cor-energia.



## O radiômetro solar (ou de Crookes)

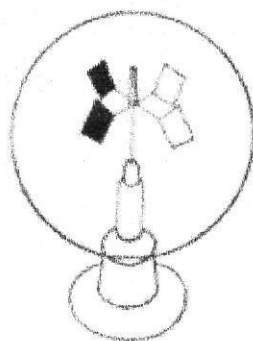


Figura 2.5 - O radiômetro solar

O radiômetro solar é constituído por uma ampola de vidro na qual se fez um vácuo parcial. Está munido de quatro pás solidárias, espelhadas de um lado e negras do outro, que rodam em torno de um eixo.

Quando se aproxima o dispositivo de uma fonte luminosa, observa-se uma rotação das pás.

A radiação luminosa tem dois efeitos contrários sobre o movimento das pás do radiômetro:

O **primeiro** põe em jogo a pressão de radiação que é duas vezes maior nas faces espelhadas (reflexão da luz) que nas faces escuras (absorção da luz). Daí resulta um **recuo das faces claras** - ganha o "empurrão" da pressão da radiação sobre as faces claras. O momento transmitido pelos fótons de luz que fazem ricochete e chocam com o lado espelhado é duas vezes o que é transmitido pelos fótons absorvidos que chocam com o lado escuro.

Há um **segundo** efeito que mascara o anterior, é devido à presença de moléculas gasosas - o vácuo da ampola é parcial, da ordem de  $10^{-2}$  mm de Hg. O livre percurso médio das moléculas do gás a esta pressão é da ordem do tamanho do radiômetro, o que permite uma transferência de momento particularmente eficiente entre as moléculas e as pás. Quando o dispositivo é exposto a uma luz intensa, as moléculas são mais excitadas sobre

as faces escuras, relativamente quentes, que sobre as faces claras. As moléculas são reemitidas com uma velocidade maior sobre as faces escuras que sobre as claras. Resulta um **recuo das placas escuras**.

É, portanto, este efeito de **recuo das placas escuras** que é preponderante para intensidades luminosas vulgares e para vazios grosseiros.

O primeiro efeito é desprezável: embora os fótons transportem muita energia, eles transportam pouco momento em comparação com o momento das moléculas de gás.

De facto, a razão entre o momento e a energia dos fótons é igual a  $1/c$  (onde  $c$  é a velocidade da luz), enquanto que para as moléculas de velocidade  $v$ , muito menor que  $c$ , a razão é  $2/v$ .

**Os bons emissores são *mesmo* bons absorventes?**

**Os maus emissores são *mesmo* maus absorventes?**

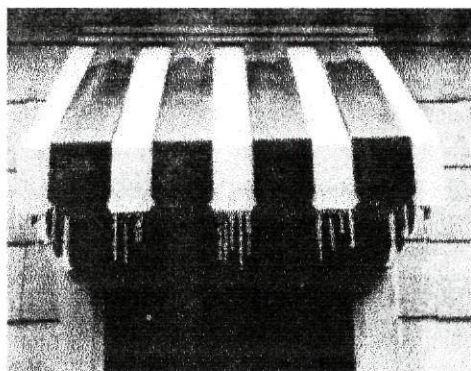


Figura 2.6 - Descongelação "fraccionada"

A fotografia do toldo com faixas brancas e pretas põe em evidência o poder absorvente das superfícies, para a radiação solar. As faixas brancas apresentam pingentes de gelo.

A água que escorre pelo toldo, às temperaturas muito baixas a que esta situação pode ocorrer, congela nas faixas brancas mas não congela nas faixas pretas porque, absorvendo estas mais radiação, a temperatura atingida por estas é mais alta. Para tempo rigorosamente frio, até se pode verificar formação de gelo em toda a superfície mas, havendo absorção de radiação com maior intensidade nas faixas negras, é nestas zonas que a descongelação acontece primeiro.

Num dia de sol, sobre a neve, também se pode observar o seguinte: Quando, sobre um manto de neve, caem folhas de diferentes cores (amarelas, verdes, castanhas mais ou menos escuras) são as folhas mais escuras que se afundam mais rapidamente na neve.

Análogo é o fenómeno que acontece ao verificarmos, com espanto, a reprodução do desenho duma toalha de praia (tipo tabuleiro de xadrez ou bandeira do Boavista), sobre uma mesa onde se tinha posto a secar, ao sol, num dia de calor. **É uma surpresa ao levantar a toalha!** Claro que a toalha está meio seca: os quadrados pretos estão bem secos e a mesa por baixo deles também; os outros quadrados estão molhados e a mesa tem as suas posições marcadas por gotinhas de água.

Normalmente, não nos vestimos de escuro no Verão porque sentiríamos mais o calor, vestimo-nos antes de cores claras. E o contrário verifica-se no Inverno. Estamos a aplicar, empiricamente, os conhecimentos da Física: **os bons absorventes são bons emissores.**

Isto explica-se:



Imaginemos que se suspendem, no interior de um recinto com as paredes mantidas a temperatura constante  $T_1$  (por acção de uma fonte de calor), sucessivamente, vários objectos pequenos, a temperatura  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ), os corpos vão alcançar sempre a temperatura  $T_1$  das paredes, independentemente da temperatura inicial e da natureza da superfície de cada corpo (polido reflectora, rugosa enegrecida, ...). O corpo radia para as paredes. Se, no entanto,  $T_2 < T_1$ , o intercâmbio global de radiação produz-se a partir das paredes, para o corpo. Portanto, quando ambos atingem o equilíbrio térmico, a intensidade da radiação que transita do corpo para as paredes e, em sentido contrário, das paredes para o corpo, deve ser igual. Parte da energia que as paredes radiam para o corpo reflecte-se e parte é absorvida. Quando se atingiu o equilíbrio à temperatura  $T_1$ , tanto o corpo como as paredes devem radiar na mesma proporção em que absorvem. Ou seja, **se um corpo absorve com facilidade**, deve ser também **um bom emissor** (e reciprocamente). Como a quantidade de radiação que tem origem nas paredes vai incidir sobre cada um dos corpos que se coloca no interior do recinto e é, por unidade de tempo, sempre a mesma, o corpo que absorve mal deve reflectir bem. Portanto, **os bons reflectores são maus emissores**.

A comprovação experimental destes factos foi realizada pela primeira vez por Sir John **Leslie**, em 1804, com (o primeiro) **cuco de Leslie**.

O **cuco de Leslie** é uma caixa cúbica metálica que se pode encher com água quente e cujas faces laterais apresentam um revestimento diferente de modo que as suas propriedades emissivas possam ser comparadas: uma pintada de preto, uma pintada de branco, outra polida e outra despolida.

Enche-se o cuco com água a ferver e, com termómetros colocados a igual distância das diferentes faces, mede-se a temperatura. A temperatura é máxima em frente à face preta e mínima em frente à face polida. Para espanto do observador desprevenido, a temperatura indicada pelo termómetro situado à frente da face branca é bastante próxima daquela que é indicada pelo termómetro à frente da face preta. É certo que não é fácil garantir a distância igual dos termómetros às respectivas faces ... Mas, por mais que se repita para evitar o "erro", chega-se à mesma conclusão: as outras temperaturas concordam, qualitativamente, com os valores dos poderes absorventes (ou poderes emissores) das superfícies, para o mesmo material; para a face branca, há uma discrepância.

Com um cuco de Leslie de construção muito recente, de um kit de laboratório da **PASCO**, deixa de haver dúvidas.

As faces são aquecidas interiormente com uma lâmpada de incandescência de 100W que pode elevar a temperatura das paredes a 120 °C. Estando estas munidas de um **termistor**, é possível conhecer, em cada instante, a temperatura das faces e verificar ainda quando o equilíbrio térmico foi atingido.

A radiação emitida é detectada por um **sensor de radiação**, através duma termopilha em miniatura que produz uma d.d.p. proporcional à intensidade da radiação. A concepção da forma do sensor assegura que as medições podem ser feitas a distâncias rigorosamente iguais para todas as faces.

Realizando-se as medições adequadas, verifica-se que, por emissividade decrescente, temos as superfícies **negra, branca, alumínio mate e alumínio polido**. Esta ordem é independente da temperatura.

Para a gama de temperaturas utilizadas (até 120 °C), a razão entre as emissões das várias faces é quase constante, com as seguintes percentagens (o **negro** é definido **100%**) :

<b>Tipo de superfície</b>	<b>Emissão (%)</b>
negro	100
branco	96,86
Al mate	20,23
Al polido	7,38

Confirma-se o que não era esperado: o negro e o branco não são muito diferentes, em termos de emissão (e absorção), para o tipo de radiação que estamos a utilizar.

Dispondo do cubo e do sensor de radiação, pode-se investigar ainda os materiais que bloqueiam a radiação, intercalando-os entre a face preta, por exemplo, e o detector. Todos os materiais bloqueiam em certa medida a passagem da radiação, mas há grandes diferenças na maneira como o fazem. Não há dúvida que folha de alumínio, espuma e vidro bloqueiam. Água, já vimos que absorve. O ar é transparente para a radiação.

E quanto à discrepância relativa à face branca? Ela não existe se fizermos uma reserva ao afirmar que os bons emissores são bons absorventes:

**Os bons emissores são bons absorventes só para o mesmo tipo de radiação! A emissão (absorção) das superfícies é selectiva: depende do  $\lambda$ .**

É certo que, normalmente, pensamos em branco, preto e ... cores para a radiação visível. A radiação térmica está noutra gama de comprimentos de onda.



Assim, tem todo o sentido comparar duas características das superfícies: a **absorvidade solar**,  $\alpha_s$ , e a sua **emissividade**,  $e$ , à temperatura ambiente.

<b>superfície</b>	$\alpha_s$	<b>e</b>
Al polido	0,09	0,03
Al anodizado	0,14	0,84
Cu polido	0,18	0,03
Cu despolido	0,65	0,75
Inox polido	0,37	0,60
Inox mate	0,50	0,21
Cimento	0,60	0,88
Asfalto	0,90	0,90
Mármore branco	0,46	0,95
Telha vermelha	0,63	0,93
Pintura preta	0,97	0,97
Pintura branca	0,14	0,93
Neve	0,28	0,97
Pele branca	0,62	0,97
Pele negra	0,97	0,97
Papel branco	0,27	0,83
Madeira	0,59	0,90

Portanto, estamos a tratar de uma aparente discrepância: as emissividades da pintura negra e da pintura branca são semelhantes, com valores, respectivamente, de 0,97 e 0,93,.

A neve é indiscutivelmente branca (para a luz visível!) e, por isso, uma folha que caia sobre ela, ao receber a luz do Sol, vai-se enterrando na neve tanto mais profundamente quanto mais escura for. Mas façamos uma afirmação "polémica": a neve é negra ... para a radiação infravermelha!

Dizer que "**a raça negra suporta mais facilmente o calor devido ao grande poder emissivo da pele dos negros ...**" como se pode ler num Tratado de Física dos primeiros anos deste século, é pura incorrecção que reforçaria, possivelmente, as "diferenças" que justificavam as atitudes racistas da época.



## 2.2. A condução térmica

### 2.2.1. Fluxo de calor por condução

Como o calor passa, espontaneamente, dos corpos mais quentes para os corpos mais frios, haverá uma transferência de energia térmica pois que se estabelece um gradiente de temperatura.

Temos uma relação **causa / efeito** em que o gradiente de temperatura actua como causa do fluxo de calor de maneira semelhante ao que acontece, em electricidade, quando um gradiente de potencial provoca uma corrente eléctrica. Acontecem ainda outras situações idênticas, na Física.

Nestes casos, **o efeito** é linearmente proporcional à **causa**, a menos que esta seja demasiado intensa.

A constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de fluxo calorífico por unidade de área,  $\Phi$ , e o gradiente de temperatura,  $dT/dx$ , é a **condutividade térmica, k**.

Para uma direcção  $x$  (já que as grandezas relacionadas são vectoriais), verifica-se a relação

$$\Phi_x = - k \cdot dT/dx$$

$\Phi_x$  é a taxa a que o calor flui através da unidade de área, normal à direcção do eixo dos  $xx$ . O sinal **menos** indica que o calor flui no sentido das temperaturas decrescentes, portanto, com  $dT/dx$  negativo. No Sistema Internacional,  $k$  expressa-se em  $J / (m.K)$ .

A definição de condutividade térmica é exactamente semelhante à de condutividade eléctrica  $\sigma$  que é a constante de proporcionalidade na relação entre a densidade de corrente  $j$  ( $A/m^2$ ) e o gradiente de potencial  $dV/dx$ :

$$j_x = - \sigma \cdot dV/dx = \sigma \cdot E_x$$

Vejamos o que distingue o mecanismo de transferência de calor nos **sólidos isolantes** e nos **sólidos condutores**.

Comecemos por considerar esse mecanismo para os sólidos isolantes.

Se aquecermos um sólido isolante, a agitação térmica dos átomos aumenta mantendo-se, contudo, na sua posição por forças que os ligam aos seus vizinhos e só podem oscilar, mais ou menos fracamente, em torno da posição que ocupam nos nós da rede cristalina. Em consequência da interacção com os átomos vizinhos, cada átomo não pode oscilar individualmente mas as suas oscilações interactuam e coordenam-se com todos os átomos do sólido. Estas oscilações coordenadas da rede não se localizam no espaço mas propagam-se como uma onda no sólido.

É exactamente deste modo que o som se propaga e, por isso, podemos tentar "visualizar" (mentalmente) os movimentos térmicos a progredir, a partir da região aquecida, sob a forma de ondas sonoras (como as ondas da pedra que cai no lago). Só que não conseguimos "ouvir" aquelas ondas com uma frequência típica de  $10^{13}$ Hz. Também sabemos que o calor não se propaga a distâncias macroscópicas com a velocidade do som (estávamos sempre a queimar-nos!) porque estas ondas colidem muito frequentemente umas com as outras e com os átomos do sólido. O seu livre percurso médio (a distância média entre duas colisões sucessivas) é só de alguns nanómetros.

A energia térmica então difunde-se através do material. Qualquer coisa de semelhante ao que aconteceria se uma pequena quantidade de  $H_2$  fosse introduzida na extremidade de um tubo com ar: embora as velocidades médias das moléculas de  $H_2$  sejam da ordem de 2000m/s, como sofrem muitas colisões no seu trajecto, levariam muito tempo a chegar à outra extremidade do tubo.

A energia das oscilações de cada átomo de um sólido está quantificada, segundo Einstein. À semelhança do que acontece com as ondas electromagnéticas - um electrão quando passa de um estado energético bem definido  $E_1$  para outro bem definido  $E_2$ , emite ou absorve um **quantum de energia** chamado **fotão**, isto é, radiação de frequência  $\nu$  tal que  $E_1 - E_2 = h\nu$ , em que  $h$  é a constante de Planck - também a uma vibração de frequência própria  $\nu$  corresponde um **quantum de energia** vibratória chamado **fonão** com a energia  $h\nu$ .

A propagação das vibrações deixa de ser considerada como onda elástica e passa a fazer-se por um conjunto de "corpúsculos": **os fonões**. Sendo assim, o valor da condutividade térmica num sólido cristalino não-metálico é proporcional:

1. ao número de fonões presentes, que aumenta rapidamente com a temperatura;
2. à velocidade dos fonões, que é igual à velocidade das ondas sonoras num sólido, variando só ligeiramente com a temperatura;
3. ao livre percurso de cada fonão até colidir com alguma imperfeição do cristal.

A variação do livre percurso médio, com a temperatura - de um sólido não-metálico para outro - condiciona as condutividades térmicas dos sólidos isolantes. Às temperaturas comuns, os sólidos estão abastecidos generosamente de fonões já que há pulsos de vibrações atómicas em todas as direcções. À medida que a temperatura do sólido aumenta, o número de fonões aumenta, contudo a condutividade térmica pelos fonões diminui, porque cada fonão interfere com o movimento dos outros, sendo a diminuição do livre percurso médio mais rápida que o aumento do número de fonões.

Nos **condutores metálicos**, a condução térmica é devida principalmente aos **electrões livres**, portadores de carga que, estando ligados fracamente aos átomos, se



podem mover facilmente através da rede cristalina. Os electrões livres do metal não pertencem aos átomos individuais mas ao sólido como um todo. Sob a acção de um gradiente de temperatura, os electrões mais energéticos nas regiões mais quentes fluem para as regiões mais frias, transferindo assim energia cinética entre as regiões a diferentes temperaturas.

Os bons condutores de electricidade são também bons condutores de calor. Os trabalhos experimentais de Wiedermann e Franz mostraram que a razão entre as condutividades térmica e eléctrica é a mesma para todos os metais, à mesma temperatura. Isto levou os cientistas a concluir que há um mesmo agente responsável pela transferência de calor e pela transferência de carga.

Os electrões, movendo-se entre os iões, têm uma energia cinética média determinada pela temperatura absoluta do condutor. Os electrões podem ser considerados com o comportamento de moléculas de gás. Segundo este modelo (**modelo de gás electrónico**), cada electrão tem uma energia térmica de  $3k_B T/2$ , em que  $k_B$  é a constante de Boltzmann ( $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ).

A condução eléctrica nos metais pode ser explicada neste modelo pelo arrastamento dos electrões livres sob a influência de um campo eléctrico ou gradiente de potencial.

Quando se estabelece um gradiente de temperatura ao longo de uma barra metálica, uma vez que a energia dos electrões depende da temperatura, os electrões da extremidade mais quente têm uma energia maior do que os da extremidade mais fria. Os electrões difundem-se através do metal da extremidade mais quente para a extremidade mais fria, transferindo energia.

Retomando a análise da condutividade térmica nos metais, há ainda a considerar, além da contribuição electrónica já referida, a contribuição devida ao efeito da vibração dos iões da rede cristalina.

O número de fonões é tanto maior quanto maior for a temperatura. O transporte de fonões da extremidade quente de uma haste metálica para a extremidade fria permite explicar a parte da condutividade térmica que não é devida à contribuição electrónica.



### 2.2.2. A condutividade térmica

Se há fluxo de calor entre uma região a temperatura mais alta e uma região a temperatura mais baixa, ao estabelecer um gradiente de temperatura (isto é, a temperatura varia com a posição) num material, espera-se que se verifique fluxo de calor.

A taxa de condução térmica através dum meio depende da **geometria** do meio, da sua **espessura**, do **material** do meio e da **diferença de temperatura** através do meio.

Experimentalmente, verifica-se que, se as duas superfícies de área **A** de uma parede plana de espessura **L** são mantidas às temperaturas **T1** e **T2**, a **potência térmica transferida** através da parede, é dada por

$$P = k \cdot A \cdot (T_2 - T_1) / L$$

em que **k** é uma característica do material da parede e tem o nome de **coeficiente de condutividade térmica** ou **termocondutividade**.

Em certos casos (em que **k** ou **A**, por exemplo, não podem ser considerados constantes), considera-se o limite para uma espessura elementar **dx** do objecto. A expressão passa a ser **P = - k . A . dT/dx** (*equação da condução do calor de Fourier*) em que **dT/dx** é o gradiente de temperatura e em que o sinal negativo indica que o calor se propaga no sentido contrário ao do gradiente.

Material	k (W/m.K)
prata	429
cobre	401
ferro	80
aço inox	41
mercúrio(l)	0,78
gelo	0,78
água(l)	0,56
pele humana	0,37
gordura animal	0,21
vidro	0,84
tijolo	0,72
madeira	0,08 - 0,16
cortiça	0,042
ar(g)	0,026

A tabela anterior indica diferentes valores de **coeficientes de condutividade térmica**, à temperatura ambiente:

A condutividade térmica do **cobre** puro é igual a **401 W/m.K**, à temperatura ambiente, o que quer dizer que uma parede de cobre com a espessura de 1 m conduzirá o calor, através da parede, à razão de 401 W por cada m<sup>2</sup> de superfície e por cada grau Celsius de diferença de temperatura.

Materiais como o cobre e a prata, que são bons condutores eléctricos, têm um valor de **k elevado**, deixam passar rapidamente o calor e, portanto, são também **bons condutores térmicos**. A maior parte dos metais entram nesta categoria, embora haja diferenças bastante importantes entre as suas condutividades térmicas; isso constata-se ao pegar em duas colheres, uma de prata e outra de inox (ou uma de alumínio e outra de inox), mergulhadas numa chávena de chá quente. As substâncias para as quais **k** apresenta um **valor reduzido** são **fracos condutores térmicos** mas são **bons isolantes**. A partir da grandeza relativa de **k**, podem-se explicar fenómenos tão simples como a diferença de sensações térmicas causadas por um pavimento em tijoleira e por um tapete, sentindo mais frio nos pés, no caso do primeiro, já que é melhor condutor do calor que o segundo, à mesma temperatura ambiente. De facto, as fibras têxteis não deixam passar rapidamente o calor transmitido pelos pés de forma que o próprio tapete aquece rapidamente. A tijoleira, pelo contrário, absorve mais calor, porque a transmite rapidamente e, assim, os pés arrefecem: a temperatura dos pés baixa.

Os gases encontram-se entre os condutores térmicos mais pobres. Os isoladores de calor ocupam uma posição intermédia e as suas propriedades são devidas ao facto de serem muito porosos. O esqueleto de um material isolante, que pode ser orgânico ou inorgânico, fornece a necessária força estrutural e reduz a transferência de calor por radiação e por convecção devido ao ar que enche os poros

### **2.2.3. A condução radial**

O estudo da condução do calor através de tubos tem grande importância, logo a seguir à condução através de paredes planas.

Se imaginarmos uma porção cilíndrica de espessura infinitesimal cortada de um tubo de comprimento  $L$  e de raio  $r$ , concêntrica com ele, podemos escrever, de acordo com a equação referida anteriormente, que o fluxo de calor através do tubo infinitesimal será igual a

$$P = -k \cdot 2\pi r \cdot L \cdot dT/dr$$

Se o fluxo de calor é estacionário, é o mesmo para todos os raios e temos a equação diferencial para o gradiente da temperatura. As variáveis  $T$  e  $r$  podem ser separadas e temos, por integração

$$T = P/(k \cdot 2\pi \cdot L) \cdot \ln r + C$$

onde se verifica que a temperatura decresce logarithmicamente com a distância ao centro do tubo.

Se a temperatura  $T_i$  da superfície interna de raio  $r_i$  for conhecida, assim como a temperatura  $T_e$  para uma distância ao centro igual a  $r_e$ , temos

$$P = k \cdot 2\pi \cdot L \cdot (T_e - T_i) / \ln(r_e/r_i)$$



## 2.2.4. Experiências de condução do calor

### Uma cruz trimetálica

A cruz trimetálica é um dispositivo que permite pôr em evidência a condução térmica pelos metais de uma forma atractiva e rápida.

A cruz tem a coluna de ferro e os braços de cobre e alumínio (ou cobre e latão). Nas extremidades, há pequenas ranhuras que são úteis para fixar distâncias ao centro da cruz.

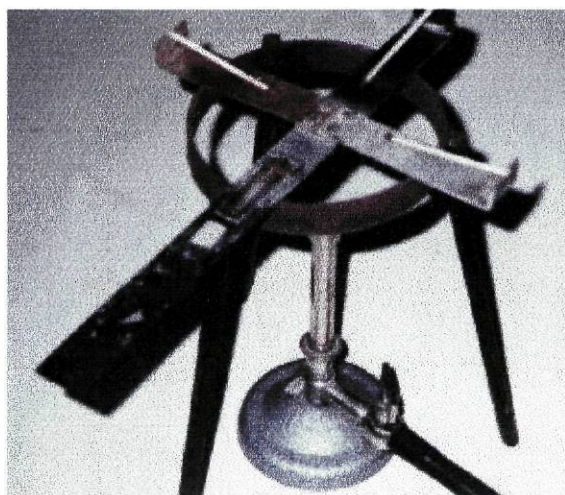


Figura 2.7 - Cruz trimetálica

### **Material:**

Cruz

Bico de Bunsen

Tripé

Triângulo (apoio) de cerâmica

Fósforos

**Modo de proceder:**

Apoia-se a cruz trimetálica sobre o tripé com a zona de cruzamento dos dois ramos bem centrada sobre o tripé. Dispõem-se **quatro** fósforos com a cabeça voltada para dentro e os pés apoiados nas ranhuras - três à mesma distância da fonte de calor e um mais afastado.

Acende-se o bico de Bunsen e regula-se a chama que só deve aquecer uma zona reduzida da lâmina da cruz.

Passado algum tempo, inflamam-se quase em simultâneo os fósforos dos braços (Cu e Al ou Cu e latão), passado um intervalo de tempo maior o fósforo do Fe mais perto da chama e, bastante depois, o fósforo do Fe mais afastado da chama.

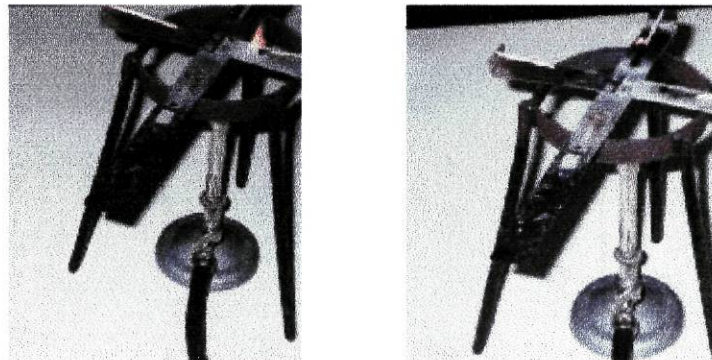


Figura 2.7

(1) o 1º fósforo a acender-se

(2) o 3º fósforo a acender-se

### Dispositivo para comparar materiais como condutores térmicos

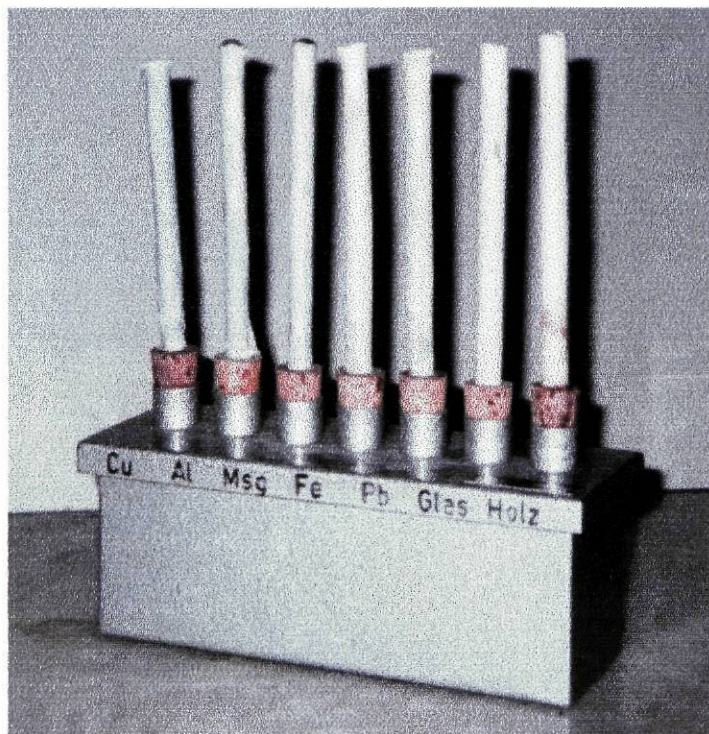


Figura 2.8 - Dispositivo para comparação de condutividades térmicas

O dispositivo representado na **fig. 2.8** é constituído por uma tina metálica paralelepédica, fechada por uma tampa atravessada por hastes de vários materiais, envolvidas por papel termocrómico.

Inicialmente, com a tina vazia ou com água à temperatura ambiente, o papel nas várias hastes apresenta-se igualmente branco.

Enche-se a tina com água quente e cobre-se com a tampa respectiva. As extremidades inferiores das hastes ficam mergulhadas na água. O papel termocrómico (sensível, por exemplo, a temperaturas superiores a 40 °C) evidencia a condutividade decrescente dos diferentes materiais através do aparecimento de cor sobre as diferentes hastes.



### Com fitas termossensíveis

De maneira simples, pode improvisar-se uma experiência que permite comparar a condutividade de dois ou mais metais. Basta dispor de lâminas estreitas dos metais de cerca de 20 cm de comprimento, dobradas numa das extremidades de modo a que se possam manter na vertical. A cada uma, cola-se uma fita termossensível que dá indicação da temperatura. Essas fitas são termómetros de aquário.

No fundo de um recipiente onde se vai colocar água quente, apoiam-se as lâminas, sem mergulhar as fitas.

As temperaturas iniciais são iguais: a temperatura ambiente é de 16 °C.

Mergulhadas as hastes, começa a observar-se um diferencial de temperaturas (na figura, 22 °C contra 26 °C).

Ganha a "corrida" o metal melhor condutor.

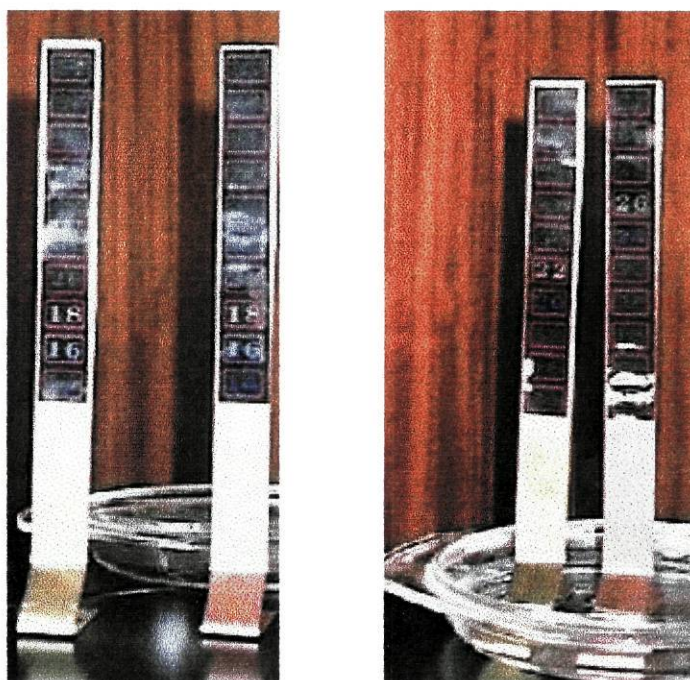


Figura 2.9 - Comparação das condutividades do cobre e do latão

## **2.3. A convecção**

### **2.3.1. Fluxo de calor por convecção**

O calor pode ser transferido de uma região para outra de um fluido (líquido ou gás) por **correntes de convecção**.

Mesmo se os líquidos e os gases não são geralmente bons condutores de calor, eles transmitem-no rapidamente por convecção.

A **convecção** é o processo pelo qual o calor se propaga graças a um movimento de massa de um lugar para outro.

Enquanto que, na condução, as moléculas percorrem distâncias muito pequenas até chocarem umas com as outras, na convecção elas deslocam-se grandes distâncias.

Exemplos de convecção na vida de todos os dias são imensos e até explicam coisas tão triviais como manchas escuras nos tectos, por cima de cilindros de água quente ou sobre candeeiros.

Quando se põe água a ferver numa panela formam-se correntes de convecção. A água que aquece, no fundo do recipiente, sobe por causa da diminuição da sua massa volúmica e é substituída por água mais fria vinda de cima que vai aquecer ...e o processo vai-se repetindo. Para visualizar essas correntes basta adicionar à água, por exemplo, uns feijões.

O ar, por cima de um aquecedor, aquece, dilata-se e sobe.

Os sistemas de aquecimento central utilizados em imóveis funcionam com base no mesmo princípio. Os sistemas mais antigos de água e ar quente funcionam por acção da gravidade ( **convecção natural** ) ; os mais recentes, utilizam bombas para fazer circular o fluido quente (**convecção forçada**).

Os ventos, que têm influência sobre as correntes marinhas, frias ou quentes, como a Corrente do Golfo, constituem exemplos de convecção natural a grande escala.

Aliás as condições meteorológicas resultam, em geral, de correntes de ar de convecção. As variações de temperatura da atmosfera, no dia-a-dia, resultam da circulação de ar quente ou frio (dependendo da sua origem) sobre grandes sistemas de alta e baixa pressão (as frentes) que se deslocam sobre as regiões.

Acontece, ainda, que algumas partes da superfície da Terra absorvem calor do Sol mais facilmente que outras e, conseqüentemente, o ar que está próximo da superfície é aquecido de uma maneira desigual e formam-se correntes de convecção. Isto é evidente à beira-mar. Durante o dia, a costa aquece mais facilmente que a água; o ar que cobre a costa/a praia é empurrado ( nós dizemos que sobe ) pelo ar mais frio que vem do mar, ocupando o seu lugar. O resultado é **a brisa do mar**. À noite, acontece precisamente o



contrário: a costa arrefece mais depressa que a água e, então, o ar mais quente está sobre o mar.

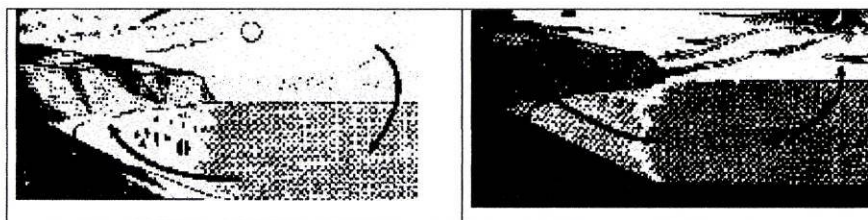


Figura 2.10 - Correntes de convecção junto à costa: (1) de dia e (2) de noite

**Se se acender uma fogueira na praia, pode observar-se que o fumo é arrastado para dentro durante o dia e para o mar durante a noite.**

É um facto que, **na convecção, um fluido sobe porque se expande e, como se expande, arrefece.**

Analisemos, com algum detalhe, as duas situações:

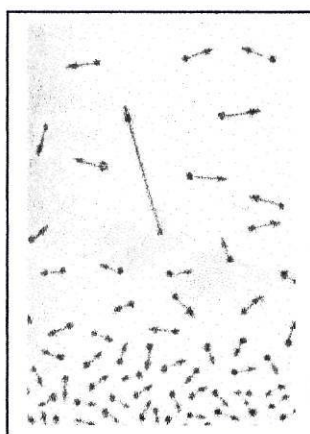


Figura 2.11

**Porque é que as moléculas mais rápidas sobem no ar?** (Figura 2.11)

Por questões de impulsão, percebemos porque o ar quente sobe. Como se expande, torna-se menos denso que o ar frio que o rodeia e é empurrado para cima como um balão. Mas o ar quente ascendente vai arrefecendo, atinge a densidade do ar envolvente e deixa de subir.

**Qualquer molécula que tem velocidade média superior às que a rodeiam tem tendência a subir.** Vejamos porquê. Considerando uma porção razoavelmente extensa de moléculas gasosas idênticas, verifica-se que, por efeito da gravidade, há mais moléculas



em baixo que em cima; o gás é mais denso junto ao solo. Se a região considerada tem uma temperatura uniforme, todas as moléculas têm a mesma energia cinética média e a mesma celeridade média. Então, cada molécula tem exactamente a mesma tendência para migrar para cima, para baixo, para os lados naquela região. Visualizando, **no seio do gás, uma partícula mais rápida**, ela colide com outras moléculas e obrigada afastar-se em todas as direcções. Mas, quando se move para cima, ela é desviada do seu caminho menos vezes do que quando se move para baixo, porque o número de moléculas com que tem possibilidades de colidir é menor. Portanto, quando a molécula se move para cima percorre uma distância maior antes de colidir do que quando se move para baixo. A molécula tem **uma porta aberta** para cima por onde a molécula se escapa no seu movimento ao acaso.

Moléculas rápidas são moléculas leves. À mesma temperatura, todas as moléculas têm a mesma energia cinética média. A velocidade média depende da massa; para a mesma energia cinética, as moléculas de menor massa têm velocidades mais altas. Um bom exemplo é o hélio cujas moléculas têm uma velocidade consideravelmente maior que a das moléculas de oxigénio e azoto, suas vizinhas mais pesadas. Assim, o hélio vai-se encaminhando para a parte superior da atmosfera e vai-se escapando...até ao espaço exterior. Isso explica o facto de, embora sendo o sétimo entre os gases mais comuns na atmosfera terrestre, não exista normalmente na baixa atmosfera.

### **Porque é que o ar quente arrefece?** (Figura 2.12)

O ar quente que sobe, como acontece com um balão, expande-se. Isto é devido ao facto da pressão atmosférica ser cada vez menor à medida que a altitude aumenta. Quando o ar se expande, arrefece, como é fácil de ver com a experiência seguinte que se pode fazer agora mesmo:

**Com a boca aberta, sopremos sobre a mão. Sentimos um bafo quente. Vamos repetir mas apertando os lábios de modo a obrigar o ar a sair por um orifício pequeno. O ar expande-se quando sai da boca. E sentimos o bafo consideravelmente mais fresco.**

O ar arrefece ao expandir-se. Exactamente o contrário do que acontece quando é comprimido. Ao usar uma bomba de ar de bicicleta, o ar e a bomba aquecem.

Outro exemplo convincente do arrefecimento com a expansão pode obter-se ao observar o vapor que sai da válvula de uma panela de pressão. À saída da válvula, o vapor é invisível e é preciso cuidado para não o sentir porque, se isso acontecer, é provável ficar com uma queimadura. A uma certa altura acima da saída, já se vê uma nuvem de "vapor" que, na realidade, é vapor de água condensado. Resultou do efeito de arrefecimento

conjugado da expansão e da mistura rápida com ar mais frio. Nessa posição, já não é perigoso sentir com a mão a temperatura do fluido que sobe.

Podemos compreender o arrefecimento do ar que se expande pensando nas moléculas de ar como minúsculas bolas de pingpong que chocam umas contra as outras. Uma bola ganha velocidade quando choca com outra de maior velocidade que se aproxima.

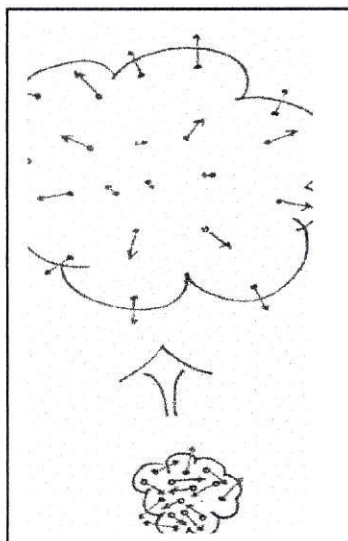


Figura 2.12

Mas quando ela choca com outra que se afasta, a sua velocidade após o choque é menor. Como uma bola de pingpong que se aproxima de uma raquete: ela ganha velocidade quando choca com uma raquete que se aproxima, mas perde velocidade quando choca com a raquete que se afasta. A mesma ideia aplica-se a uma região de ar que se está a expandir; as moléculas, em média, colidem com mais moléculas que se afastam do que se aproximam. Portanto, no ar que se expande, a velocidade média das moléculas diminui, a temperatura é menor, o que está de acordo com o facto do ar arrefecer.

Mas há diminuição da energia do sistema. Para onde foi essa energia? Vai-se transformar no trabalho feito sobre o exterior já que o ar que se expande vai ocupar um volume maior.



### 2.3.2. Experiência de convecção

A transmissão do calor nos fluídos efectiva-se com o movimento das partículas desse fluído, conhecido por **correntes de convecção**.

Para pôr em evidência estas correntes num líquido, pode utilizar-se o dispositivo que a figura representa: um tubo de vidro dobrado em rectângulo, formando um circuito fechado, com uma abertura que dá acesso ao seu interior, a fim de introduzir os materiais - líquidos ou sólidos - que permitam visualizar as correntes de convecção:

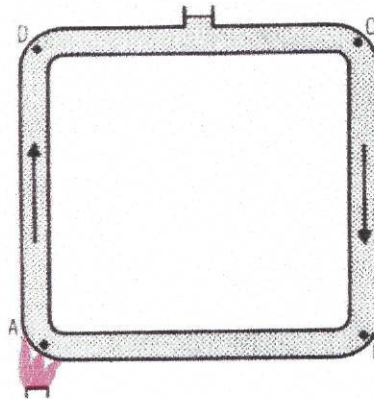


Figura 2.13 - Dispositivo para observação de correntes de convecção

Instalado o dispositivo de vidro num suporte apropriado de tal forma que os ramos AB e CD do tubo de vidro fiquem a níveis diferentes, aquece-se, no ponto A, o líquido (por exemplo, água) nele contido. Observa-se, de início, a circulação da água - no sentido ascendente no ramo AD e descendente no ramo BC - pelo movimento das bolhinhas de ar que se libertam da água aquecida. Para uma melhor visualização das correntes de convecção, junta-se à água, por exemplo, serrim de madeira que vai ser arrastado nestas correntes ou umas gotas de solução aquosa de permanganato de potássio (ou outro líquido corado).

A formação das correntes de convecção deve-se ao facto de a massa volúmica,  $\rho$ , da água fria no ramo BC ser superior à massa volúmica,  $\rho'$ , da água quente no ramo AD. Portanto, os pontos A e B, que supomos ao mesmo nível, estão a pressões diferentes, não podendo haver equilíbrio estático do fluído, pelo que haverá um movimento de fluído no sentido do ponto A, de menor pressão. A pressão exercida pela água fria em B é superior à pressão exercida pela água quente em A, de que resulta uma diferença de pressão igual a

$$p_A - p_B = (\rho - \rho') g h$$

que provoca o movimento, no sentido referido.



### 2.3.3. Tratamento matemático da convecção

O tratamento matemático da convecção é muito complicado e não existe nenhuma equação simples para a convecção, como há para a radiação e a condução. Isso é devido ao facto de que a energia transferida através de uma superfície a uma dada temperatura, em contacto com um fluido a diferente temperatura, depende de circunstâncias várias:

1. da geometria da superfície ;
2. da direcção em que se realiza a convecção;
3. do fluido em contacto com a superfície que sofre a convecção ser líquido ou gás;
4. da densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica do fluido;
5. da velocidade do fluido ( suficientemente pequena para produzir regime laminar ou bastante grande para originar um regime turbulento).

A energia transferida por convecção por uma dada superfície na unidade de tempo ( $dQ/dt$ ) exprime-se por:

$$dQ/dt = h A \Delta T,$$

em que **A** é a área da superfície,  $\Delta T$  é a diferença de temperaturas entre a superfície e a massa principal (suficientemente longe da superfície) do fluido e **h** é o **coeficiente de convecção**.

Os valores numéricos de **h** constam de tabelas e gráficos específicos para vários tipos normalizados de dispositivos e foram determinados por via experimental.

A expressão anterior pode escrever-se:

$$dQ/dt = h_{\text{combinado}} A \Delta T.$$

$h_{\text{combinado}}$  pressupõe a ocorrência simultânea de vários processos de transferência de calor.

Assim, a transferência total de calor é determinada adicionando as contribuições dos vários mecanismos. Daí resulta a definição de um **coeficiente de transferência de calor combinado**.

A radiação é usualmente significativa em relação à condução ou convecção natural, mas desprezável relativamente à convecção forçada.

A expressão considerada é análoga à que traduz **a lei do arrefecimento de Newton**.

## 2.4. Lei de arrefecimento de Newton

A transferência de calor desempenha um papel crucial na vida de todos os dias.

Não temos consciência disso, mas usamos sempre os princípios de transferência de calor quando procuramos conforto térmico. Isolamos os nossos corpos, vestindo casacos fortes, no Inverno e minimizamos o ganho de calor por radiação indo para a sombra, no Verão. Aceleramos o arrefecimento dos alimentos quentes, soprando sobre eles e conservamo-los quentes, em tempo frio, embrulhando-os, por exemplo, em jornais. Portanto, estamos constantemente a usar transferências de calor, inconscientemente, sem dar por isso. Até um **chefe** (de cozinha) precisa de ter uma compreensão intuitiva do mecanismo da transferência de calor para cozinhar os seus pratos no ponto justo.

Usa-se um sistema de aquecimento central para manter as divisões das habitações a temperaturas confortáveis (por exemplo, salas de estar e quartos a 21 °C), compensando, assim, as perdas de calor através das janelas, paredes, tectos, chão e portas. É preciso aquecer o ar de ventilação, o ar fresco que vai renovando o ar viciado. É má ideia, no Inverno, calafetar todas as frinchas que deixem "entrar frio".

Mas a perda de calor de um prédio pode ser minimizada, numa boa construção, isolando o telhado, usando janelas duplas e enchendo os vãos entre as paredes com materiais isolantes apropriados.

A adaptação dos animais às condições que lhe são próprias também constitui um exemplo deste mecanismo. Em tempo frio, os animais (ovelhas, pinguins,...) agrupam-se, encostados, para evitar a perda de calor; mesmo isolados, enroscam-se (gatos, cães) para diminuir a área da superfície exposta. Os elefantes usam a grande superfície das suas orelhas como radiadores de calor. No tempo quente, há um maior fluxo de sangue às orelhas que os elefantes abanam para aumentar a perda de calor do corpo. De maneira semelhante, os cães usam a sua língua comprida que agitam para se sentirem mais confortáveis nos dias muito quentes.

Convém, portanto, aprender sobre o que usamos na prática para fazer um uso eficaz e inteligente da energia. A aplicação prática, na engenharia, destes mecanismos da transferência de calor, e a sua compreensão, está a tornar-se cada dia mais importante e desempenha um papel enorme no **design** de veículos, edifícios e pontes, aparelhos electrónicos, frigoríficos, entre outras coisas.



Há quase 300 anos, Newton observou que um corpo quente arrefece de maneira que a diferença entre a temperatura do corpo e a temperatura ambiente decresce exponencialmente. Isto é, se esta diferença de temperatura se reduz a metade do valor inicial num certo intervalo de tempo, então num intervalo de tempo duplo a diferença será um quarto do valor inicial, num intervalo de tempo triplo será um oitavo, e assim por diante.

Portanto, quando um corpo arrefece, a sua temperatura diminui com o tempo, o corpo vai perdendo energia para a vizinhança por transferência de calor. Se os dois estão à mesma temperatura, a transferência de calor é zero; quanto maior a temperatura, maior é a taxa de transferência de calor. O decréscimo exponencial de temperatura observado por Newton implica que, em qualquer instante, a taxa de transferência de calor é proporcional à sua diferença de temperatura: num dado intervalo de tempo (um segundo, por exemplo) o corpo arrefece; no próximo intervalo de tempo com a mesma duração, ele arrefece menos porque a sua temperatura durante este intervalo é menor que durante o intervalo de tempo precedente; e assim para cada intervalo de tempo posterior...

Assim, o arrefecimento de um corpo, desde que não ocorram grandes diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente, seja qual for o processo de transferência de calor envolvido (radiação, condução ou convecção) ou a combinação de vários, segue a mesma lei: a taxa de transferência de calor do corpo para a vizinhança (com o tempo) é proporcional à diferença de temperaturas entre as duas regiões (**lei do arrefecimento de Newton**).

Isto é,

$$dQ/dt = - K ( T - T_a )$$

em que **T** é a temperatura do corpo e **T<sub>a</sub>** a temperatura do ambiente.

**K** depende das condições da vizinhança (condutividade do meio, coeficiente de convecção, ... ) e da área de transferência **S**.

Uma transferência infinitesimal de calor **dQ** do corpo para o exterior provoca uma diminuição infinitesimal de temperatura **dT**. Para um corpo de massa **m**, com capacidade calorífica mássica **c**, a relação entre as duas quantidades é :

$$dQ = m . c . dT$$

Considerando a temperatura ambiente **T<sub>a</sub>** constante, a equação anterior pode ser escrita

$$dQ = m . c . d( T - T_a )$$



A quantidade  $dQ$  pode ser eliminada entre as duas equações:

$$K ( T - T_a ) dt = - m . c . d( T - T_a )$$

$$d( T - T_a ) / ( T - T_a ) = - ( K / m . c ) . dt$$

Para diferenças finitas de temperatura, obtém-se, integrando esta equação diferencial,

$$T - T_a = ( T_0 - T_a ) . e^{- ( K / m . c ) t}$$

em que  $T_0$  é a temperatura inicial do corpo (ou temperatura máxima).

Designa-se por **constante de tempo**  $\tau$  o quociente  $(m.c)/K$ . Arrefece mais rapidamente o sistema que tiver menor constante de tempo.

Considerando o caso particular da **radiação**, a taxa de transferência de calor de um corpo à temperatura  $T$  para a vizinhança à temperatura  $T_a$  é proporcional a  $( T^4 - T_a^4 )$  já que a potência emitida por qualquer corpo à temperatura  $T$  é dada por  $P = e \sigma T^4$ .

Assim podemos escrever

$[ ( T - T_a ) + T_a ]^4 - T_a^4$  que se transforma em  $T_a^4 \{ [ 1 + ( T - T_a ) / T_a ]^4 - 1 \}$  quando  $T_a^4$  é posto em evidência.

Como  $( T - T_a ) / T_a$  é muito menor que 1, se a diferença de temperaturas não for muito elevada,  $[ 1 + ( T - T_a ) / T_a ]^4 \approx 1 + 4( T - T_a ) / T_a$ .

**Então, a taxa de perda de calor é proporcional a  $4 T_a^3 ( T - T_a )$  o que está de acordo com a lei do arrefecimento de Newton.**

## **2.5. Transferências de energia térmica por mudança de fase**

Ao fornecer continuamente calor a um sólido (ou a um líquido), o sólido (ou o líquido) eventualmente mudarão de fase. A fusão dos sólidos e a vaporização dos líquidos exigem o fornecimento de energia.

Inversamente, uma substância ao mudar de fase no sentido *gás* ⇒ *líquido* ⇒ *sólido* fornece energia ao exterior.

A evaporação é um processo de arrefecimento. Para não haver dúvidas, basta colocar umas gotas de álcool sobre a palma da mão. O arrefecimento seria ainda mais sensível se, em vez de álcool, usássemos éter, que é mais volátil. Por isso, se usa éter em "spray" como anestésico.

A condensação de um gás é um fenómeno de aquecimento.

Os processos de evaporação e de condensação de um fluido são a base de funcionamento do ciclo de arrefecimento de um frigorífico.

Um líquido de baixo ponto de ebulição ( um dos novos agentes refrigerantes que já substituem os fréons nocivos para o ambiente) é bombeado para a unidade de refrigeração onde passa ao estado gasoso. Para se vaporizar, ele teve de retirar energia térmica aos alimentos contidos no respectivo compartimento. O gás que recebeu energia é encaminhado para fora da unidade de refrigeração pelos tubos de condensação que se encontram na parte traseira do frigorífico. Através desses tubos, a energia térmica é libertada para o ar ao mesmo tempo que o gás se condensa e regenera o líquido. Um motor bombeia novamente o fluido através do sistema onde vai sofrer o processo cíclico de vaporização e condensação.

É fácil notar o aquecimento que se verifica junto aos tubos de condensação. Esse aquecimento é ainda mais sensível em espaços onde se concentram várias máquinas refrigerantes (por exemplo, arcas frigoríficas) como acontece em lojas de congelados.

Um aparelho de ar condicionado emprega os mesmos princípios e bombeia energia térmica de um lado - unidade de refrigeração - para outro lado - para o exterior. Quando o sentido do fluxo de calor é invertido, o aparelho de ar condicionado passa a funcionar como uma bomba de calor.

Os desumificadores que usamos, no Inverno, nas nossas casas, amenizam o ambiente à sua volta.

Ainda no Inverno, num dia muito frio, se começar a chover ou a cair neve, sente-se uma elevação da temperatura.

Pelo contrário, o arrefecimento provocado pela vaporização é usado pelos animais para evitar o sobreaquecimento do corpo em ambientes a temperaturas altas. Uns, transpiram: cobrem a pele com água que se evapora. Outros, aqueles que têm o corpo coberto de pelo, como não podem transpirar porque há pouca circulação de ar perto da pele, arfam e agitam a língua: a evaporação tem lugar nas suas bocas e no tracto respiratório, até aos pulmões, o que retira energia térmica aos seus corpos.

Em condições normais, a perda de calor do corpo humano devido à evaporação é de cerca de 14% da perda total. A transpiração não se nota, apesar de corresponder à perda de 600g de água por dia. Quando o esforço é intenso ou o tempo muito quente, a evaporação da transpiração que se vê torna-se o mecanismo mais importante através do qual o corpo perde calor.



## 2.6. Visualização de transferências de calor

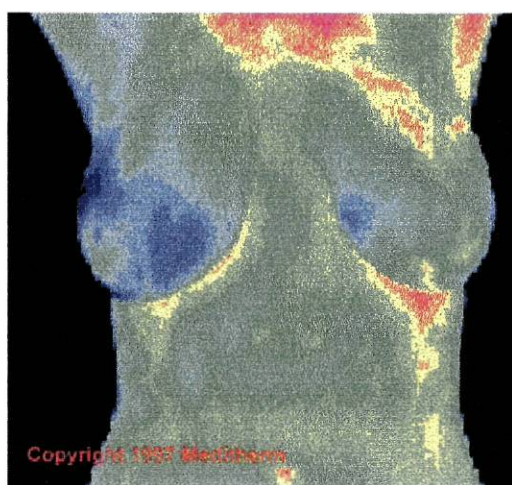
Há técnicas que permitem visualizar as transferências de calor.

O corpo humano, normalmente a uma temperatura à volta de 37 °C, bastante superior à temperatura ambiente nos climas temperados, está constantemente a libertar calor para o ambiente.

Em condições normais, sem estar a desenvolver uma actividade física, uma pessoa perde calor, em média, à razão de 100 J por segundo. Esta potência de 100 W está repartida por cerca de 60 W para a radiação, cerca de 30 W para a convecção e cerca de 10 W para a evaporação.

A **termografia** é uma técnica que, aplicada ao corpo humano, mede a quantidade de radiação IV que cada pequena porção de pele de uma pessoa emite e apresenta esta informação de uma forma ilustrada com vários tons de cinzento ou diferentes cores num **termograma**. A temperatura da pele varia de ponto para ponto e, em consequência disso, a energia radiada também varia. A termografia é o processo de detectar esta radiação e convertê-la em valores de temperatura. Esta técnica é útil no diagnóstico de doenças como cancro da mama e da tiróide ou lesões dos sistemas nervoso e esquelético - muscular.

A pele sobre um tumor é mais quente que à sua volta ou por causa da maior vascularização dos tecidos ou porque, nessa zona, se manifesta um metabolismo mais intenso. Uma diferença pequena na temperatura da pele vai-se traduzir numa diferença significativa na emissão de radiação. Basta lembrar que a energia emitida por segundo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta da superfície radiante.



a) dos seios



b) das mãos

Figura 2.14 - Termografia

Para visualizar correntes de convecção usa-se um processo fotográfico: a **técnica de Schlieren**.

Correntes de ar envolvendo um corpo quente são fotografadas em detalhe e analisadas.

A figura seguinte permite visualizar a camada convectiva ao redor do corpo de uma menina de 11 anos. O fluxo de convecção foi gerado pelo facto da pele estar a uma temperatura mais elevada que o ar circundante.

Pode ser útil conhecer o que se passa à volta do corpo em termos de correntes convectivas no estudo do **design** de roupas especiais (por exemplo, em fatos de cirurgiões) ou de ambientes como incubadoras para bebés prematuros.



Figura 2.15 - Visualização do fluxo de calor por convecção

As técnicas mencionadas têm aplicação a nível da indústria ou estudos ambientais.

A termografia pode ser utilizada para detectar bolsas de calor em cidades e estudar o isolamento das habitações, por exemplo.

### 3. EXPERIÊNCIAS DE TRANSFERÊNCIAS DE ENERGIA

#### 3.1. Sistemas de Aquisição Automática e Tratamento de Dados

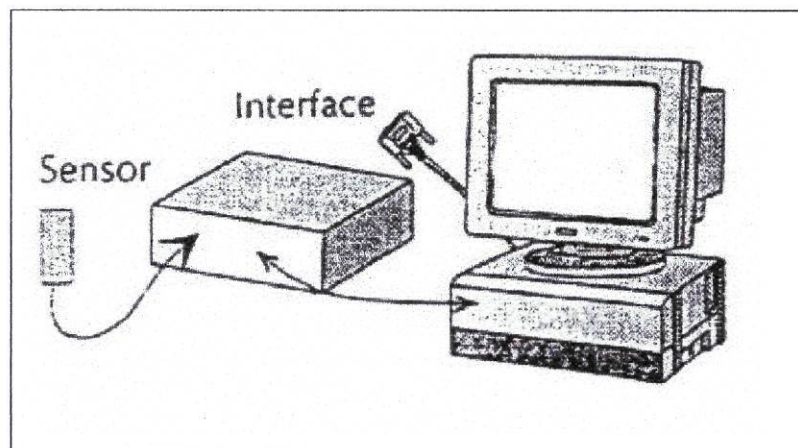


Figura 3.1 - SATD (Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados)

Nos trabalhos experimentais que se seguem (para o estudo do **efeito de estufa** e no estudo de **curvas de arrefecimento**) foram utilizados Sistemas de Aquisição Automática e Tratamento de Dados (**Data-Logging**).

Estes equipamentos são constituídos por um **computador** que tem instalado o **software** adequado para adquirir, através da respectiva **interface**, os dados, lidos por **sensores** ou **termopares**. É papel da interface fazer a tradução dos dados analógicos, fornecidos pelos sensores ou pelos termopares, em dados digitais que, uma vez no computador, podem ser tratados e manipulados.



Nas várias experiências, os sistemas utilizados foram de dois tipos, constituídos por:

1. Uma **interface científica** IEE com software elaborado em ASCII. Os dados obtidos em tabela fornecem a variação com o tempo de d.d.p. detectadas por termopares diferenciais e medidas por multímetros. Os dados são importados de ASCII para ORIGIN onde podem ser tratados (ou copiados para EXCEL e tratados com este programa). O sistema acompanha o registo com a visualização do gráfico.
2. Uma **interface** DDWIN que fornece os dados em ambiente Windows. Durante o tempo de registo, os dados são registados em tabelas e gráficos e acompanha-se a evolução dos acontecimentos por visualização do(s) gráfico(s).
3. O sistema dispõe ainda de uma interface autónoma (**EMU**) que possibilita a aquisição de dados "no campo" e posterior **download** no computador. Essa mobilidade é preciosa.

A possibilidade de acesso a este tipo de equipamento traduz-se em dispor de várias vantagens:

**O sistema armazena grandes quantidades de informação por períodos de tempo variáveis, de uma forma autónoma.** Assim, fica a recolher dados na ausência do utilizador (durante períodos mais ou menos longos - de dia e/ou de noite), evita tarefas repetitivas (por exemplo, fazer leituras de 10 em 10 minutos) e permite ao utilizador dedicar-se a outras actividades, e torna possível o estudo de fenómenos muito lentos ou muito rápidos que, de outro modo, seriam de observação difícil ou impossível.

**Os dados armazenados podem ser extraídos sob várias formas (tabelas, gráficos)** com a possibilidade de tratamento posterior.

**O sistema trabalha em tempo real** o que permite um acompanhamento e interpretação imediata dos fenómenos observados.

**Permite o registo simultâneo de diversas variáveis.**

Como resultado de o trabalho decorrer rapidamente, **proporciona a possibilidade da repetição de experiências para outras condições iniciais.**

### 3.1.1 EFEITO DE ESTUFA dentro de um automóvel

Usando uma **Unidade Independente de Aquisição de Dados e sensores de temperatura ( 2 ), de luz ( 1 ) e de humidade ( 1 )** , procedeu-se ao registo da variação com o tempo das respectivas grandezas.

#### CARRO1:

Temperatura interior - a vermelho

Temperatura exterior - a azul

Humidade relativa - a verde

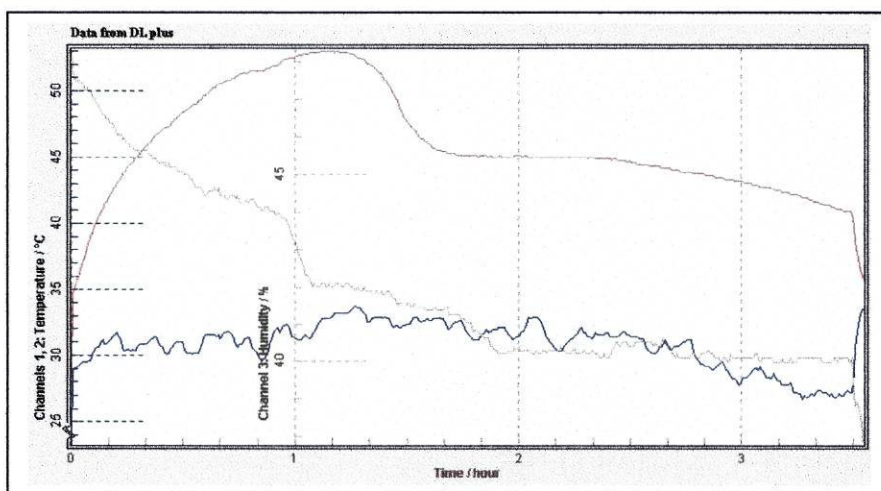


Figura 3.2 - Registo iniciado às 15 horas de um dia de sol ( 21JUL98)

Para uma humidade absoluta constante (não havia dentro do veículo fontes de vapor de água), a humidade relativa diminuiu quando a temperatura interior aumentou e, quando a temperatura se manteve constante, a humidade relativa manteve-se sensivelmente constante.

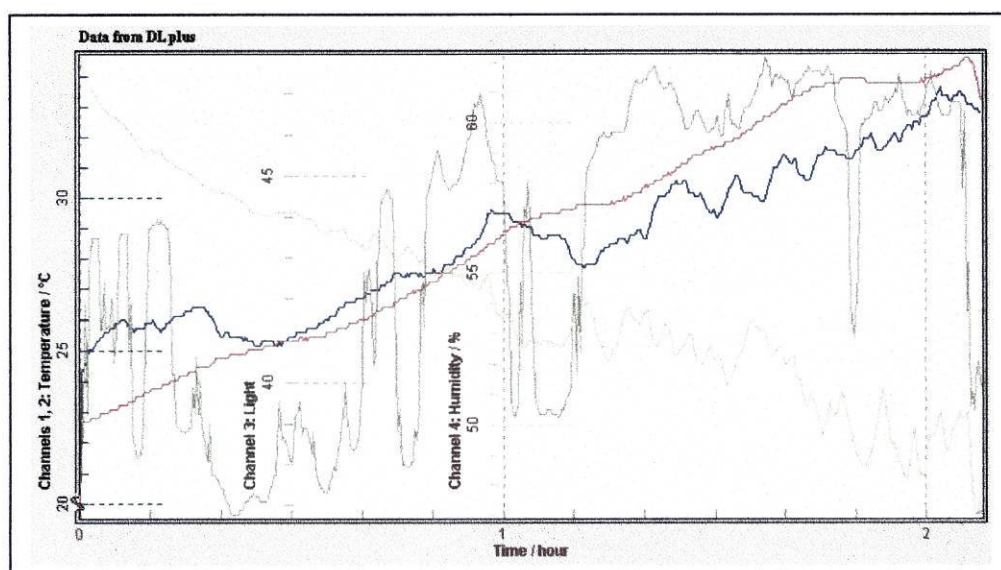
A variação máxima de temperatura foi de 20°C ( 53 - 33) e houve um aumento de 13°C ( 45 - 32 ) que se manteve durante mais de uma hora.

Durante o intervalo de tempo em que o equipamento esteve a funcionar não houve alteração da intensidade luminosa.

## CARRO2:

Foram introduzidos no automóvel vários vasos com plantas para estudar o efeito da concentração do vapor de água sobre o aumento de temperatura característico do efeito de estufa.

A intensidade luminosa não se manteve uniforme (o Sol foi encobrindo e abrindo), como registou (a verde) o sensor de luz.



O estado higrométrico (humidade relativa) foi diminuindo, tal como em **CARRO1**, o que inviabilizou o espírito desta experiência.

Podem, no entanto, tirar-se as seguintes conclusões:

1. a temperatura exterior é sensível à variação da intensidade luminosa;
2. a temperatura interior vai sempre aumentando em consequência da emissão de radiação IV proveniente dos corpos aquecidos, no interior do carro, que são retidos pelos vidros;
3. em termos de variação de temperatura, não houve um aumento demasiado acentuado mas as condições atmosféricas não eram favoráveis.



**CARRO3:**

A experiência foi realizada num dia de sol ( 26JUL98 ), das 10horas às 13horas, com várias plantas ( para formar vapor de água ).

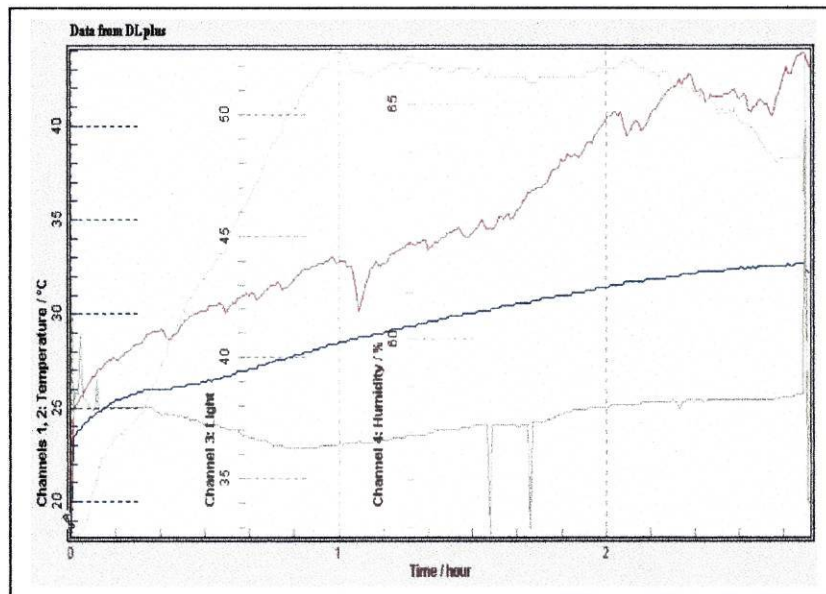


Figura 3.4 - Registo DDWIN num dia de sol, iniciado às 10 horas

Pode-se concluir dos registos:

1. A humidade manteve-se praticamente constante.
2. A temperatura exterior aumentou.
3. Houve uma variação máxima da temperatura de 13°C ( 44 - 31) que teria ainda tendência a aumentar.
4. A humidade relativa aumentou até à temperatura interior de 33°C e estabilizou até 40°C. Neste intervalo de temperaturas, pode concluir-se também do aumento de massa de vapor de água. A partir desta temperatura, a humidade relativa diminuiu mas nada se pode concluir sobre a variação da humidade absoluta.

### 3.1.2 Efeito de estufa em frascos com revestimentos diferentes

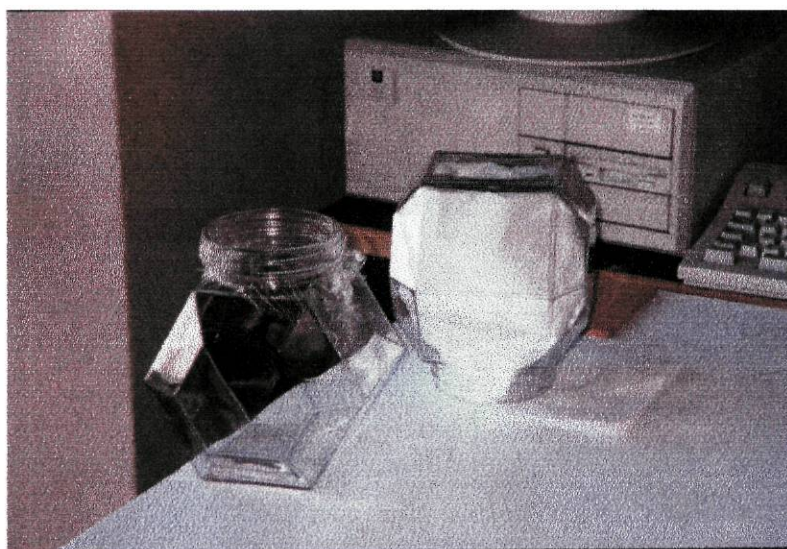


Figura 3.5 - Efeito de estufa em frascos com revestimentos diferentes

Utilizando dois frascos iguais com revestimentos diferentes expostos à radiação solar, mediram-se com dois termopares as diferenças de potencial correspondentes às temperaturas no interior de cada frasco.

7JULHO98 - Um frasco tem um revestimento preto e o outro frasco revestimento branco.

13JULHO98 - Um frasco forrado a branco e o outro a película metalizada.

15JULHO98 - Um frasco tem revestimento branco e o outro, vazio, foi suspenso, no ar.

A partir dos registos automáticos de d.d.p. e correspondentes tempos, em ASCII, obteve-se a variação de temperatura (correspondente à d.d.p.) no tempo que, a seguir, se representa:

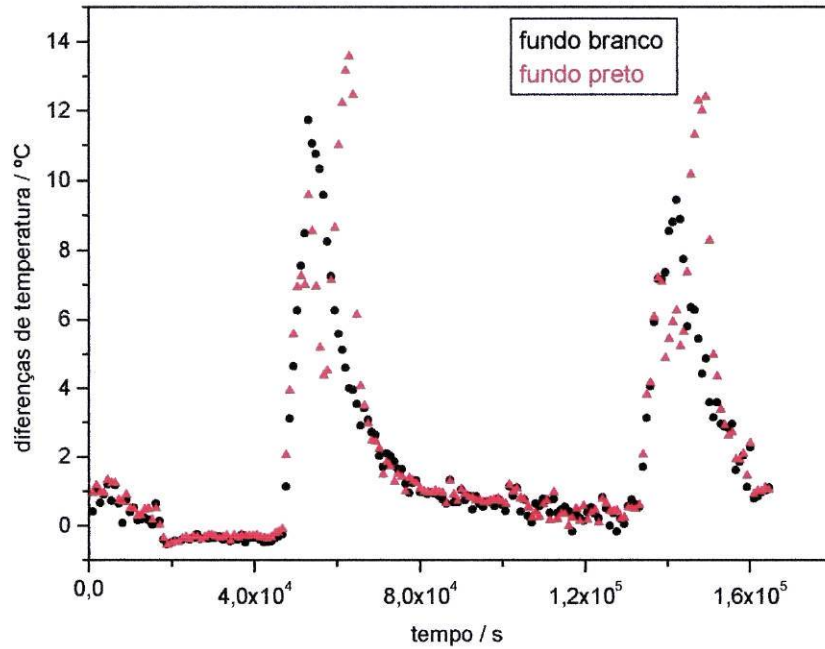


Figura 3.6 - Aquecimento dentro de vasos com fundos diferentes (preto + branco)

Observa-se, neste caso, em que os revestimentos dos frascos são **preto e branco**, respectivamente, que nos dois dias que ele durou, foi o **frasco de fundo preto que aqueceu mais**. No 1º dia, verifica-se uma diferença máxima de temperaturas de 2,0 °C e, no 2º dia, uma diferença máxima de temperaturas de 3,0 °C.



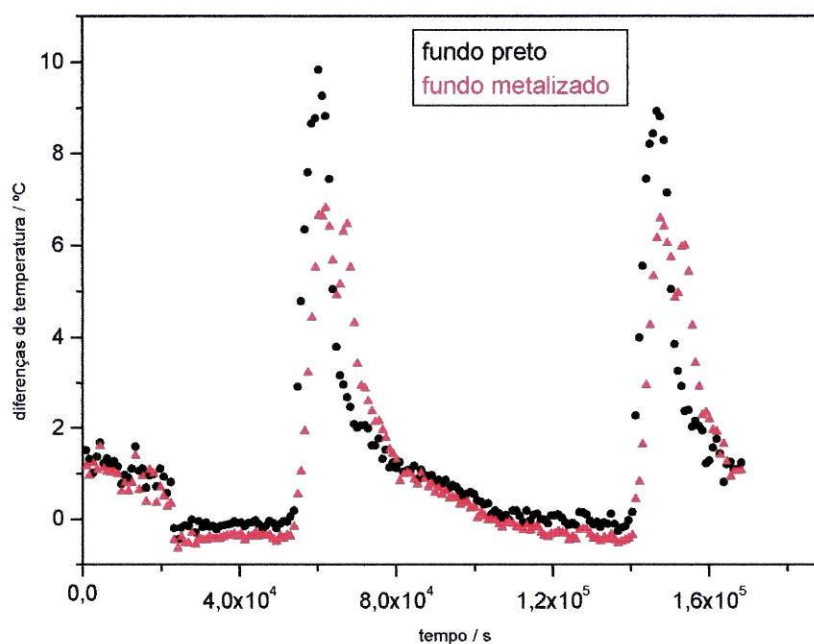


Figura 3.7 - Aquecimento dentro de vasos com fundos diferentes (branco + metalizado)

Observa-se, neste registo, em que um frasco tem um fundo branco e o outro, um fundo reflector metálico, que há um aquecimento mais acentuado no caso do fundo branco. O primeiro frasco atingiu, no 1º dia, uma temperatura máxima superior em 3,0 °C à do frasco com revestimento metalizado e, no 2º dia, a diferença de temperaturas máxima foi de 2,0 °C.

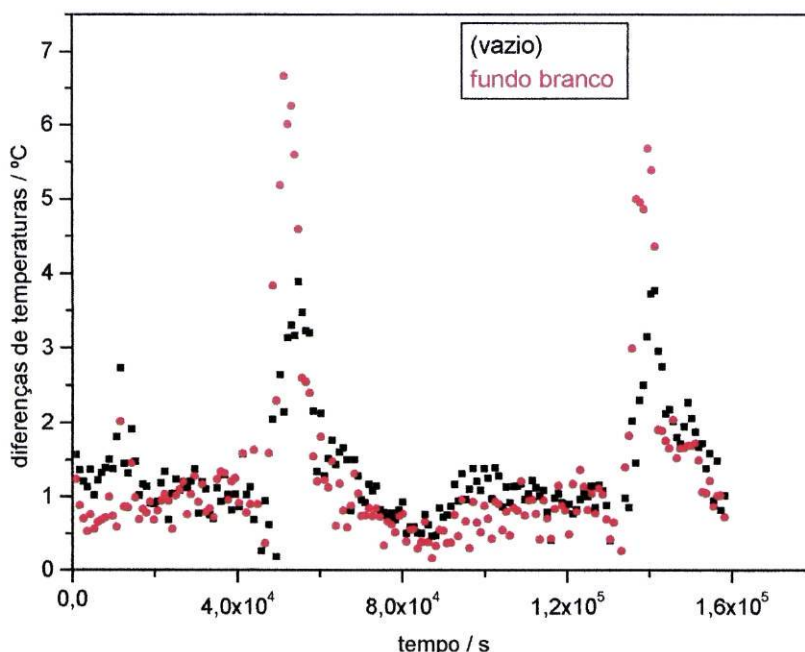


Figura 3.8 - Arrefecimento em vasos idênticos (um vazio + um forrado a branco)

Neste 3º registo, com um frasco forrado de branco e um frasco sem revestimento, suspenso no ar ( para não haver contacto com o apoio) e fechado por meio de película transparente, observa-se o aquecimento no interior dos dois frascos. Seria de esperar que o vidro, sendo transparente para a radiação visível, não aquecesse? As diferenças máximas das temperaturas no interior dos frascos, com revestimento branco e sem revestimento, foram, respectivamente, de 2,8 °C, no 1º dia, e de 1,9 °C, no 2º dia.

**Conclusão:** Comparando os frascos dois a dois, verifica-se que o interior preto provoca um aquecimento maior que o interior branco, que o interior branco provoca um aquecimento maior que o interior metalizado reflector e que há ainda uma diferença entre os máximos de temperatura dentro dos frascos, um com interior branco e o outro sem revestimento. Atendendo ao diferente comportamento da natureza das superfícies em termos de absorção de radiação visível, assim seria de esperar. O aquecimento do frasco vazio é de esperar ser o menor.

Há um factor que, nas experiências, não foi controlado. A intensidade de radiação solar variou, de dia para dia, e, portanto, só se podem tirar conclusões para registos em que se comparam revestimentos dois a dois. Fazer uma observação simultânea seria conveniente mas implicaria a necessidade de mais aparelhos de medida e outro software.

### 3.1.3. Efeito de estufa num modelo de estufa

Usou-se uma estufa hemisférica construída de plexiglass, com uma face lateral amovível, com pequenos orifícios para permitir a entrada dos sensores e dos termopares.



Figura 3.9 - Estufa vazia

#### 1º registo:

1. Determinou-se a diferença de temperaturas entre o interior e o exterior, através do registo, durante cerca de 3 dias (a começar às 18 horas), das diferenças de potencial entre as junções de termopares - Fig. 3. 10



Foram usados termopares de **Cu/constantan** de sensibilidade igual a  $0,040 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ .

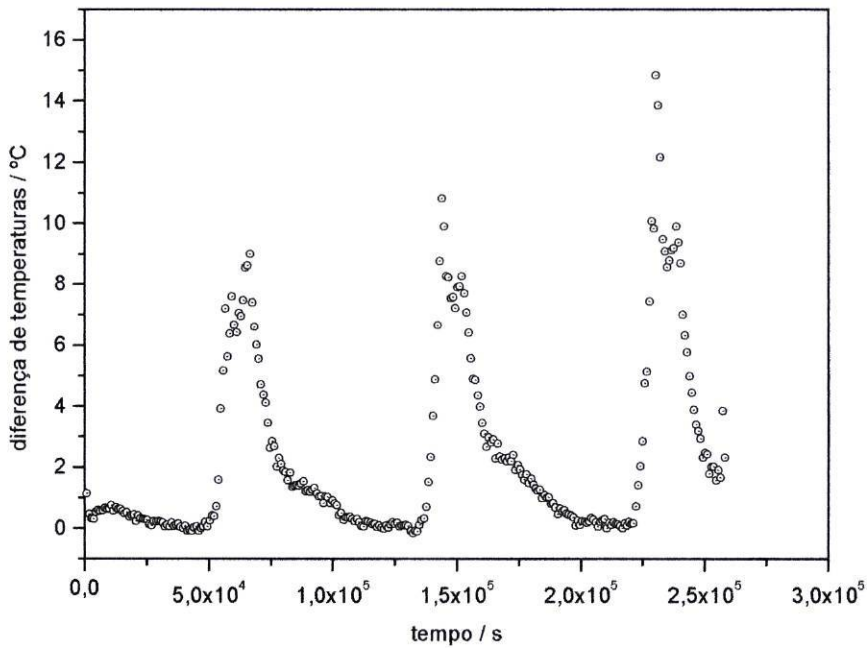


Figura 3.10 - Aquecimento dentro da Estufa / 22 JUNHO 98

## 2. Simultaneamente usaram-se sensores:

De temperatura interior - a azul

De temperatura exterior - a vermelho

De intensidade luminosa - a verde

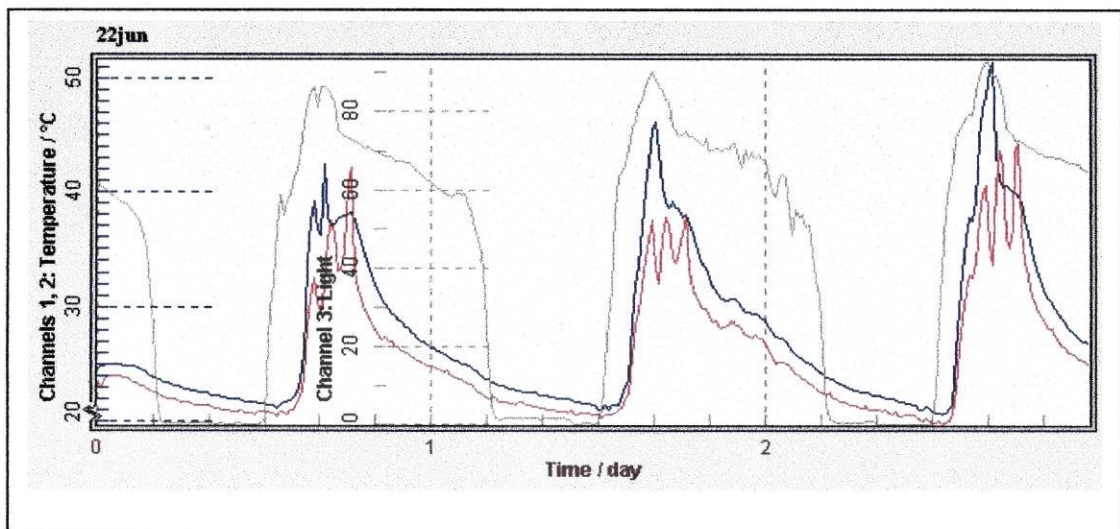


Figura 3.11 - Registro DDWIN com sensores / 22JUNHO 98

**2º registo:**

Iniciou-se o registo simultâneo de diferenças de potencial, com termopares, e de temperaturas e intensidades luminosas, com os sensores.

Os termopares fizeram registos durante cerca de 4 dias (a começar às 15 horas).

Os registos dos sensores correspondem a 20 horas.

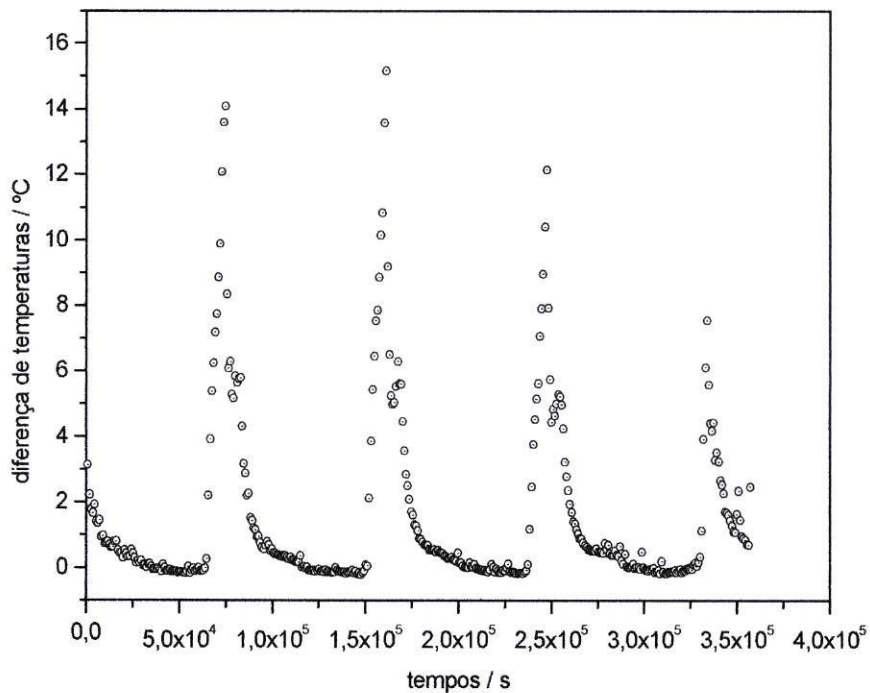


Figura 3.12 - Aquecimento dentro da Estufa (2ª experiência)

Os vários registos põem em evidência a repetição periódica dos aquecimentos e arrefecimentos dentro da estufa com máximos cerca das 14 horas:

No 1º dia, temos um máximo para a diferença de temperaturas interior/exterior de 14,25 °C; no 2º dia, de 15,5 °C, no 3º dia, de 12,25 °C e no 4º dia, de 7,5 °C.

A estufa esteve exposta à radiação solar, com uma intensidade luminosa elevada nos primeiros dias de céu descoberto e que foi diminuindo até ao último dia em que o céu encobriu.

1. **Curvas de arrefecimento** Tentou-se analisar as curvas de arrefecimento utilizando a lei de arrefecimento de Newton. Contudo, a análise em toda a gama de temperaturas não foi viável visto a temperatura do meio exterior não ser constante. O estudo só faria sentido se se tivesse em consideração vários regimes, cada um deles correspondente a pequenos intervalos de temperatura.
2. Em simultâneo, procedeu-se ao registo com sensores:

de temperatura exterior - a vermelho  
de temperatura interior - a azul  
de intensidade luminosa - a verde

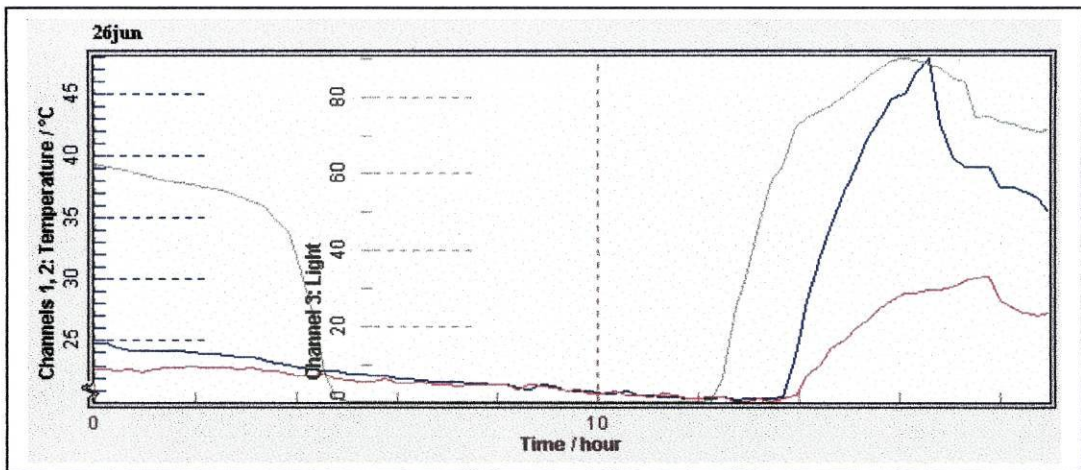


Figura 3.13 - Registo DDWIN na Estufa

Verifica-se a relação entre a intensidade luminosa e o aquecimento e o arrefecimento.

A temperatura interior é superior à temperatura exterior devido ao efeito de estufa. O máximo de intensidade luminosa corresponde ao máximo de temperatura no interior da estufa.



**3º registo:**

Para estudar o efeito da humidade no aquecimento dentro da estufa, colocou-se dentro dela um vaso com uma planta e um copo com água.



Figura 3.14 - Estufa com plantas

Procedeu-se ao registo das temperaturas interior e exterior, da intensidade luminosa e da humidade relativa, com os sensores:

Temperatura interior - a azul

Temperatura exterior - a vermelho

Intensidade luminosa - a verde

Humidade relativa - a castanho

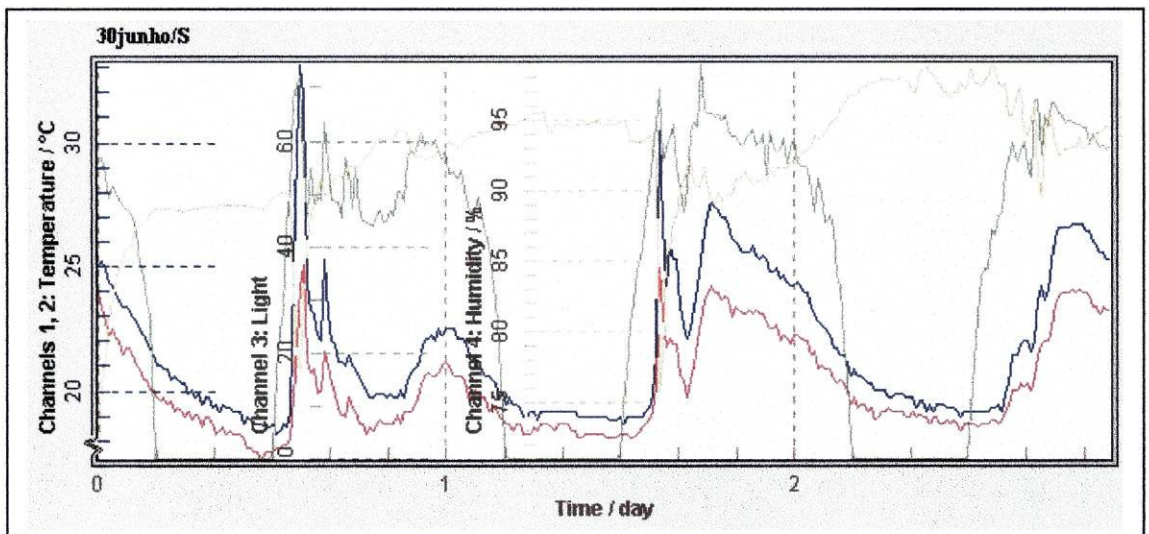


Figura 3.15 - Registo DDWIN com sensores na estufa com plantas

A experiência não foi conclusiva.

A humidade relativa depende da temperatura e, por isso, não é possível acompanhar o aumento da humidade absoluta e, assim, tirar conclusões sobre o efeito de humidade absoluta na elevação da temperatura no interior da estufa.

Este estudo só seria possível dispondo de duas estufas idênticas, uma sem plantas que transpirem e sem água que se evapore (mas com os respectivos contentores) e outra com plantas e com a água.

### 3.1.4 Efeito de "rebanho" no arrefecimento

Como todos temos verificado, os animais têm comportamentos que lhes permitem evitar perdas de calor, no tempo frio, e facilitar essas perdas, no tempo quente.

Assim, "rebanho" será, no sentido próprio, o agrupamento de ovelhas ou, no sentido mais geral, por ser semelhante para o estudo, o agrupamento de pinguins. Estes, numa atitude muito social, vão-se envolvendo uns aos outros e, para que "um lugar ao sol" caiba a todos, o conjunto vai rodando em relação ao Sol, durante o dia, e o lugar do centro (o melhor) vai sendo ocupado equitativamente pelos diferentes indivíduos.

Para comparar a rapidez de arrefecimento de **um indivíduo isolado** e de **um indivíduo em rebanho**, usa - se **um tubo de ensaio** (cheio de água quente e no ar) e **um tubo rodeado de outros seis tubos de ensaio** (cheios de água quente e no ar).

Com dois sensores de temperatura, acompanha - se o arrefecimento.

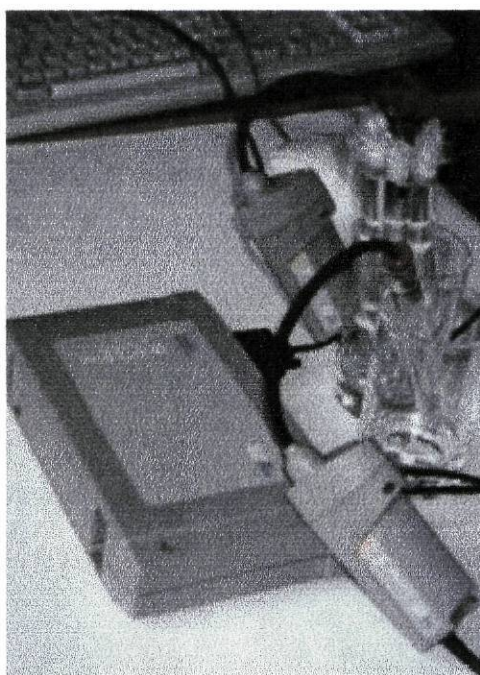


Figura 3.16 - Medição das temperaturas num tubo só e num tubo "em rebanho"

Fizeram-se 3 experiências com o mesmo conjunto de tubos, à temperatura ambiente de 20 °C, sendo diferente a temperatura inicial da água nos tubos.



Numa 1ª experiência (**Arrefecimento / rebanho1**), foram obtidos os registos seguintes:

1 tubo

(1) + 6 tubos

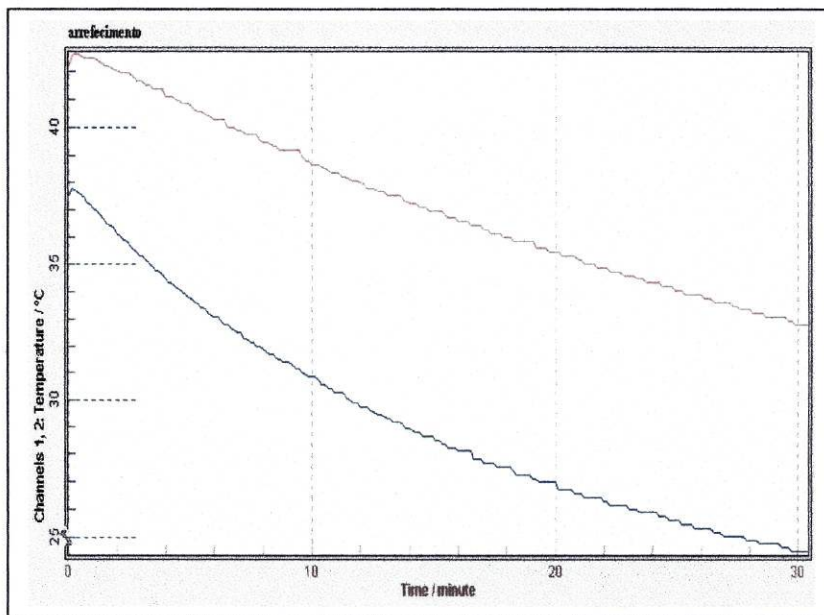


Fig. 3.17 - Registo DDWIN do arrefecimento em "rebanho 1"

Não sendo fácil conseguir uma temperatura idêntica nos dois tubos, esse facto não vai, no entanto, afectar a constante de tempo  $\tau$  como se verifica facilmente recorrendo à lei de arrefecimento de Newton que será retomada a seguir à apresentação desta série de três experiências.

O gráfico anterior é visualizado em tempo real. Da análise deste gráfico, já é fácil concluir que é o **tubo de ensaio isolado** que perde calor mais rapidamente.

Os dados, registados em tabela, serão tratados em EXCEL para estudar, nas duas situações, as velocidades de arrefecimento.

No gráfico seguinte, encontra-se representada a variação logarítmica das diferenças de temperaturas ( $T - T_a$ ) com o tempo.

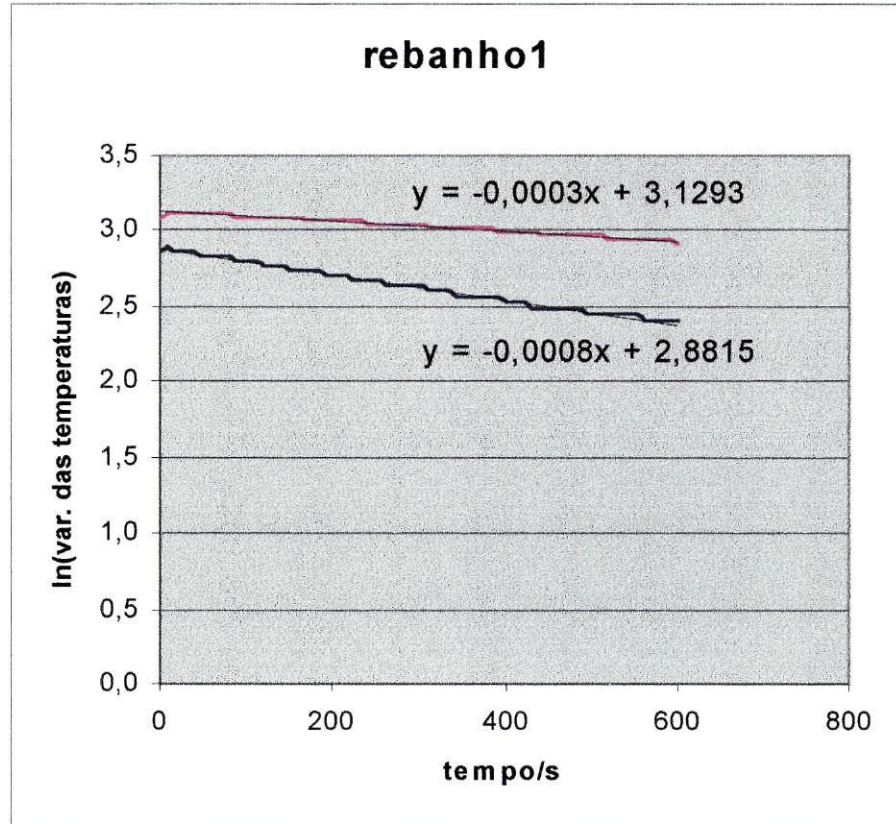


Figura 3.18 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo

Portanto,

para o tubo isolado, temos  $\ln(T-T_a) = -0,0008t + 2,88$

e para o tubo rodeado por outros, temos  $\ln(T-T_a) = -0,0003t + 3,13$ .

Verifica-se, assim, que o arrefecimento é mais rápido para os indivíduos isolados, fora do rebanho.

Numa 2ª experiência (**Arrefecimento / rebanho2**), registaram-se os seguintes valores:

1 tubo

(1) + 6 tubos

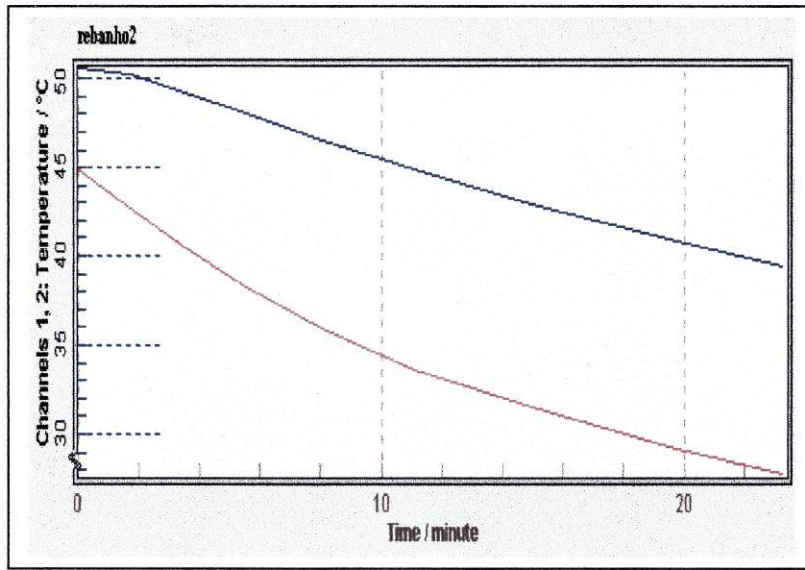


Fig. 3.19 - Registo DDWIN do arrefecimento em "rebanho 2"

Neste caso, os tubos encontravam - se a temperaturas iniciais superiores às das experiências anteriores, mantendo-se a temperatura exterior igual a 20°C.

Os dados registados pelo DDWIN em tabelas vão ser tratados em EXCEL do que resultou a tabela e o gráfico seguintes:



**Arrefecimento /rebanho2**

Temperatura ambiente = 20°C

tempos/s	Temp7/°C	T7-Ta	ln(T7-Ta)	Temp1/°C	T1-Ta	ln( T1-Ta)
0	50,5	30,5	3,42	45,0	25,0	3,22
103	50,5	30,5	3,42	42,5	22,5	3,11
210	49,0	29,0	3,37	40,5	20,5	3,02
333	48,0	28,0	3,33	38,0	18,0	2,89
484	46,5	26,5	3,28	36,0	16,0	2,77
666	45,0	25,0	3,22	33,5	13,5	2,60
912	43,0	23,0	3,14	31,5	11,5	2,44
1188	41,0	21,0	3,04	29,0	9,0	2,20
1397	39,5	19,5	2,97	28,0	8,0	2,08

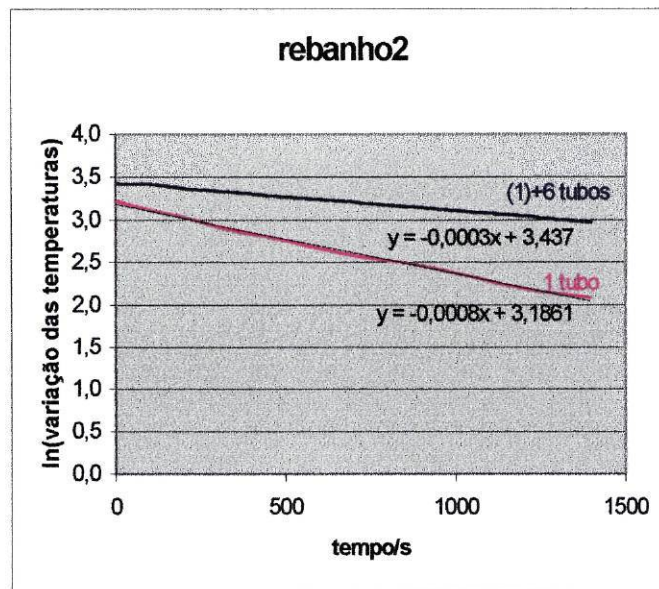


Figura 3.20 - Tabela e gráfico de "rebanho 2"

Observa-se concordância entre a experiência 1 e a experiência 2: os declives das rectas, nos gráficos em que se observa a variação logarítmica das diferenças de temperatura ( $T-T_a$ ) com o tempo, são iguais.

**3ª Experiência:**

A temperatura ambiente manteve -se igual a 24 °C.

1 tubo

1+ 6 tubos

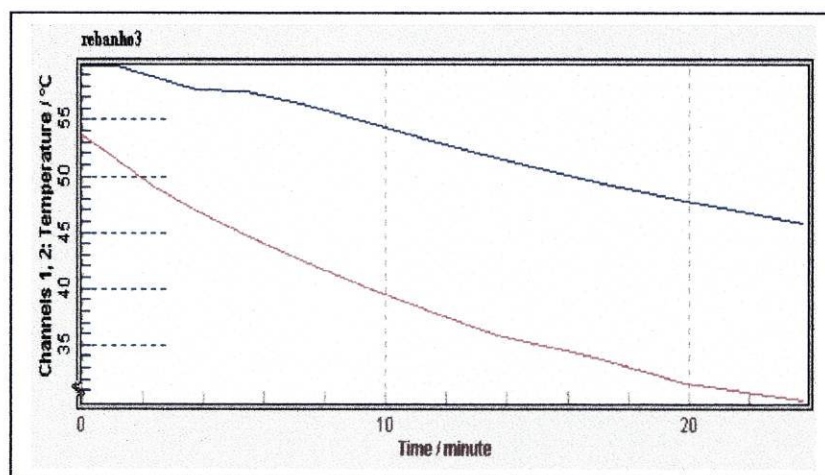


Figura 3.21 - Registro DDWIN do arrefecimento em "rebanho 3"

Os dados registados vão ser tratados em EXCEL.

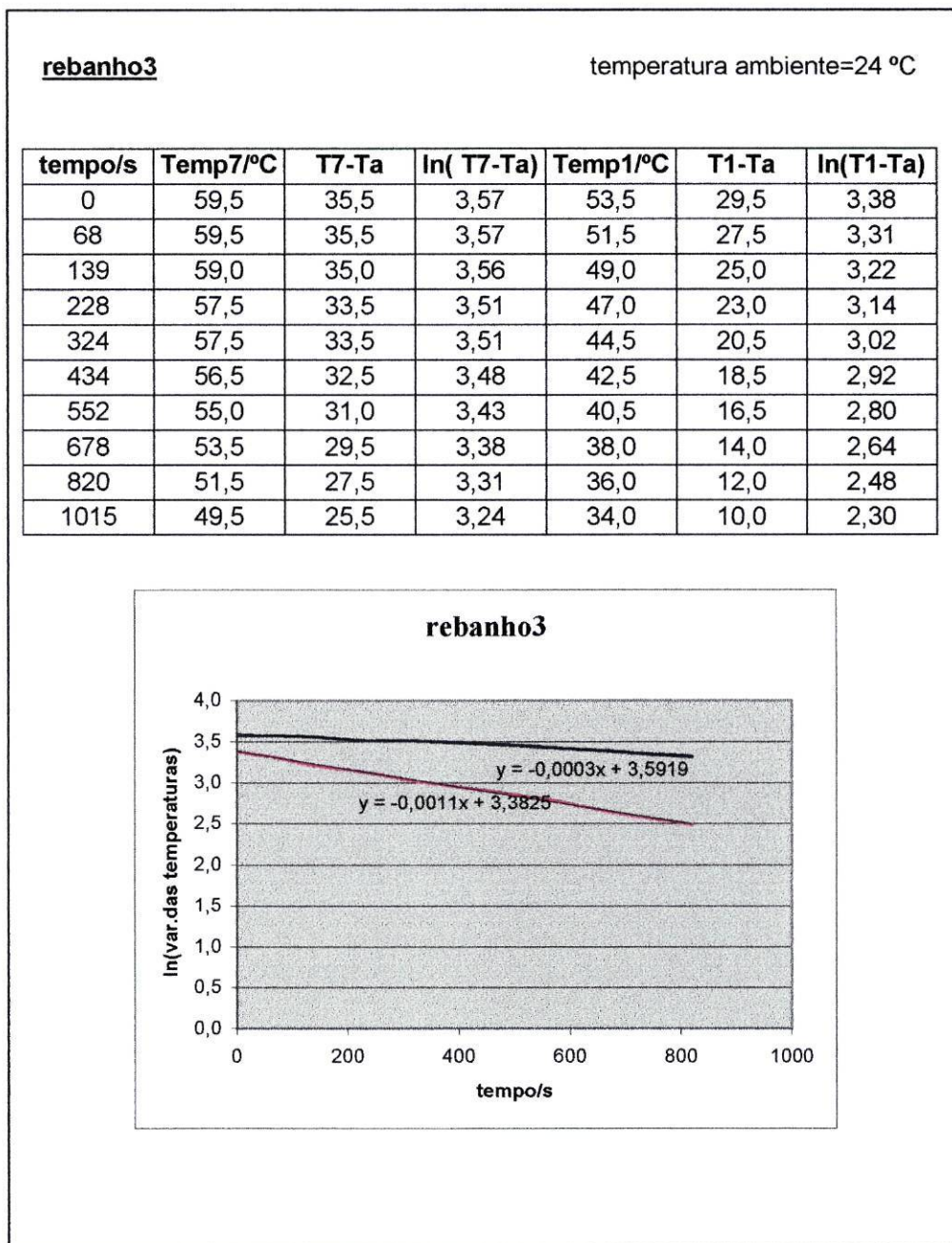


Figura 3.22 - Tabela e gráfico de "rebanho 3"



## Conclusões sobre as curvas de arrefecimento

Se  $T - T_a = (T_0 - T_a) e^{-t/\tau}$  em que  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $T_0$  é a temperatura inicial (máxima) do corpo e  $\tau$  é o tempo necessário para que a diferença entre a temperatura do corpo e a temperatura ambiente se reduza a  $(1/e) = 0,368$  da diferença inicial de temperaturas - designada por **constante de tempo**.

$$\ln(T - T_a) = \ln(T_0 - T_a) - t/\tau$$

$\tau = (m \cdot c)/K$  onde  $m$  é a massa do sistema,  $c$  é a capacidade calorífica específica e  $K$  é a constante que depende da superfície do corpo e do processo de arrefecimento.

**ln (variação das temperaturas)** é uma **função linear do tempo**.

A constante de tempo de arrefecimento é igual ao inverso do declive da recta ajustada.

Para os conjuntos (**um+seis tubos**),

$$\ln(\text{variações das temperaturas}) = - 0,0003t + \text{constante}$$

O valor da constante,  $\ln(T_0 - T_a)$ , varia de experiência para experiência uma vez que a temperatura inicial para cada experiência não é a mesma, embora a temperatura ambiente seja sensivelmente a mesma.

Para **um tubo isolado**, temos

$$\ln(\text{variações das temperaturas}) = - 0,0008t + \text{constante}$$

para "rebanho1" e "rebanho 2"

$$\ln(\text{variações das temperaturas}) = - 0,00011t + \text{constante}$$

para "rebanho3".

Justifica-se a discordância do declive de "rebanho 3", diferente dos declives de "rebanho1" e "rebanho2", pela temperatura inicial bastante mais elevada em relação à temperatura ambiente do que nos outros casos: 29,5 °C contra 17,5 °C e 25,0 °C, respectivamente.

Sendo as **lei de arrefecimento de Newton** empírica, a sua aplicabilidade costuma restringir-se a uma diferença de 20 °C. A identificação da **lei da radiação** (considerada anteriormente) também só é válida para pequenas diferenças de temperatura, não superior a uma dezena de graus.

Sendo o valor do declive das rectas  $\ln(\Delta T) = f(\text{tempo})$  igual a **-0,0003** para (**um+seis**) tubos e **- 0,0008** para **um** tubo isolado, fica em evidência o facto de um tubo interior, protegido pelo "calor" dos que o rodeiam, arrefecer mais lentamente.

### **3.1.5. Simulação do arrefecimento do corpo humano na água**

Ninguém tem dúvidas que um corpo (mesmo o nosso) mergulhado em água sofre um arrefecimento mais rápido do que quando se encontra no ar. Podemos passar um dia pouco vestidos (para não dizer despidos) quando a temperatura ambiente anda pelos 20 °C sem nos sentirmos desconfortáveis, desde que não haja correntes de ar. Mas o melhor é não tentar fazer o mesmo em água, à mesma temperatura.

Adequadamente vestidos, não achamos uma temperatura do ar de 10° C demasiado fria. Mas se cairmos na água a essa temperatura, não devemos esperar viver muito tempo (uma hora ou duas, no máximo) a menos que se receba socorro rapidamente.

É evidente que há diferenças entre o que se passa com um tubo de ensaio (ou um frasco) cheio de água quente e o que se passa com o corpo humano (ou o dos outros animais) que não é um objecto passivo: gera-se energia dentro dele por processos metabólicos. Mas isso não é suficiente para compensar as taxas muito elevadas de transferência de calor na água. Uma pessoa cuja temperatura interna cai muito abaixo de 27°C não tem muitas probabilidades de sobreviver à experiência.

No recente filme TITANIC, os protagonistas passam grande parte da cena do naufrágio submersos até à cintura nas águas do Oceano (possivelmente o Pacífico). Como em todos os filmes espectaculares, recorre-se a truques e efeitos que desafiam as leis da Física. Neste caso, "se uma pessoa submersa numa água que esteja a 10 °C sofre uma baixa de temperatura corporal de dois graus em duas horas e, sendo esta é inferior a 30 °C, perde-se a consciência e morre-se afogado. No caso do Atlântico Norte (no meio de icebergues), será impossível sobreviver muito mais que cinco minutos." (*QUO* p.82 n°40 JAN99)

#### **Arrefecimento da água a 52,0 °C de um tubo de ensaio mergulhado em água a 19,0 °C**

##### **1ª Experiência:**

Utilizou-se um sensor de temperatura introduzido no tubo de ensaio, cheio de água quente, mergulhado na água de uma tina, à temperatura ambiente.

Obteve-se o registo que se segue:



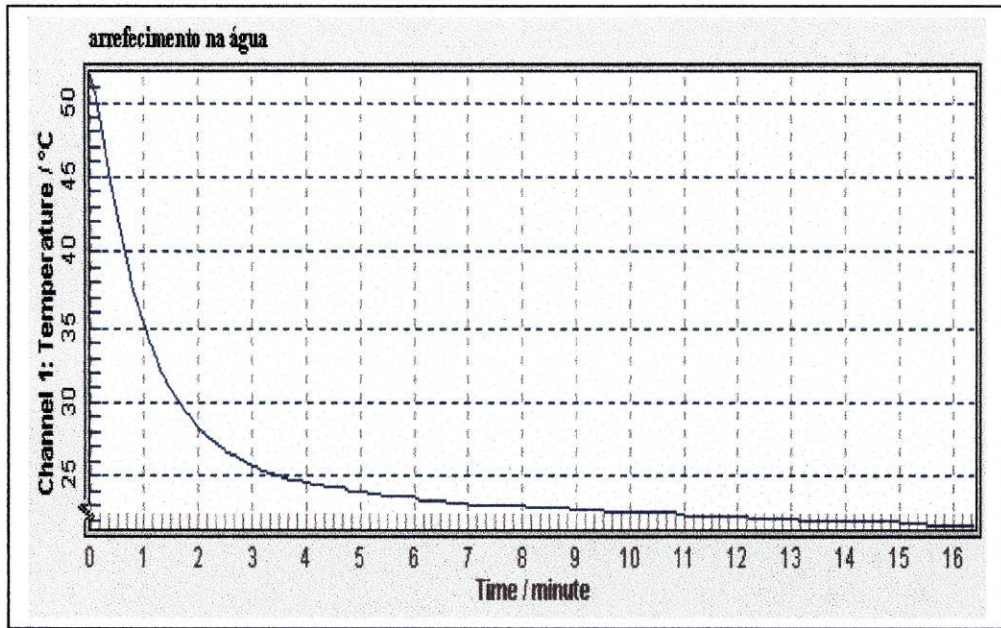


Figura 3.23 - Registo DDWIN no arrefecimento na água

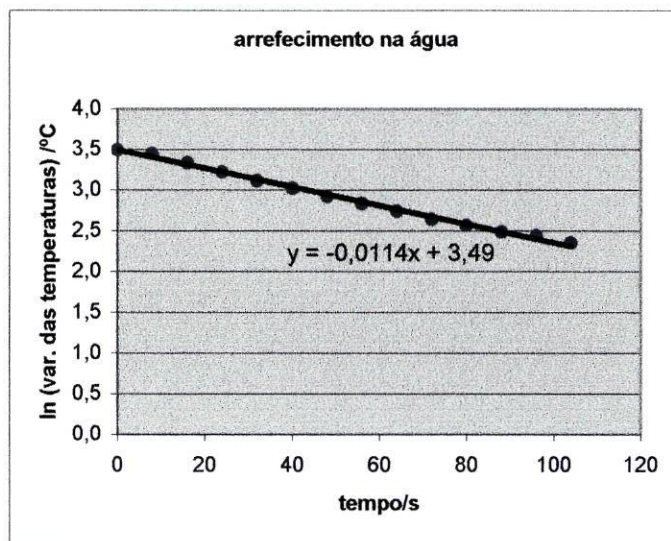


Figura 3.24 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo



## **Análise dos resultados**

Usou-se, para comparação, o arrefecimento do tubo isolado, estudado no "efeito de rebanho".

Comparando o declive das rectas correspondentes à **variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo**, declive esse que é, em módulo, igual ao inverso da constante de tempo do sistema considerado, pode concluir-se sobre as propriedades do ar como **isolador**.

O declive da recta que corresponde ao arrefecimento do **tubo isolado** no ar, é igual a  **$-0,0008 \text{ s}^{-1}$** . Neste caso, para o arrefecimento do **tubo isolado** na água, o declive é igual a  **$-0,0114 \text{ s}^{-1}$** .

Na experiência seguinte (pág.122), em que a temperatura inicial do tubo é mais baixa, o declive é igual a  **$-0,0048 \text{ s}^{-1}$** , a que corresponde um tempo de arrefecimento cerca de **seis vezes menor** que no caso de o **tubo isolado** arrefecer no ar. Continua a poder concluir-se que a água será um melhor condutor que o ar.

De facto, as condutividades térmicas do **ar** e da **água** são iguais a, respectivamente,  **$0,026$  e  $0,56 \text{ W / m.K}$** .

Seria de esperar os mesmos valores para as constantes de tempo para o arrefecimento dos tubos com a mesma massa de água (temperatura inicial  $T_0$  respectivamente de  $52 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mergulhados em água à temperatura  $T_a = 19,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , atendendo à lei de arrefecimento de Newton.

$$T - T_a = (T_0 - T_a) e^{-(K / mc).t}$$
$$\ln (T - T_a) = \ln (T_0 - T_a) - (K / mc).t$$
$$\tau = mc / K$$

As diferenças observadas estão relacionadas, como já se referiu, com as diferentes gamas de temperaturas ( $52 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $19,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $19,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a que se está a aplicar a lei de arrefecimento de Newton.

Ao estudar as curvas de arrefecimento, deve-se ter presente que a transferência de calor não se faz só por condução mas também por convecção e por radiação.

## 2ª Experiência:

Regista-se o arrefecimento da água de um tubo de ensaio mergulhado numa tina com água à temperatura ambiente.

A temperatura inicial do tubo é igual a 28 °C.

A temperatura ambiente é igual a 19 °C.

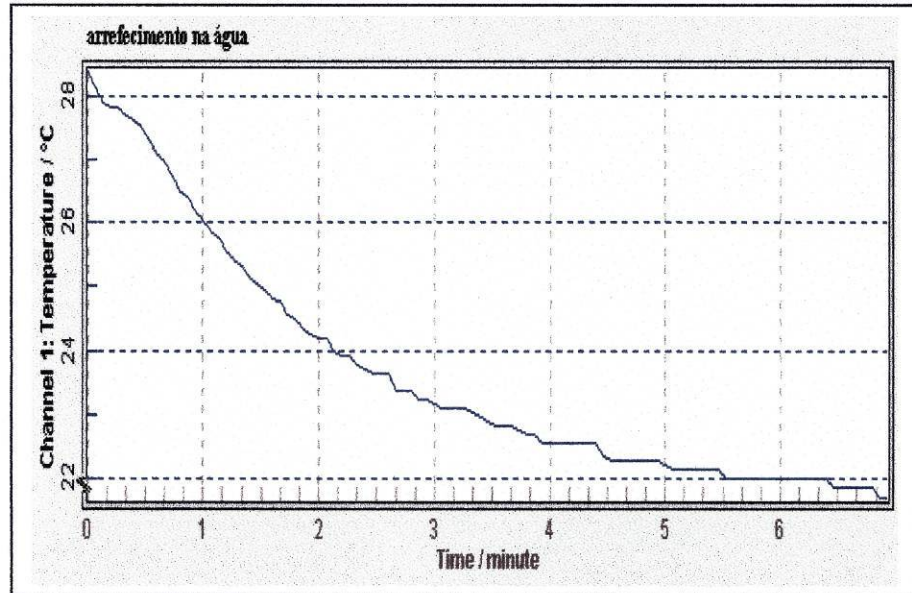


Figura 3.25 - Registo DDWIN do arrefecimento em água ( 2ªexperiência)

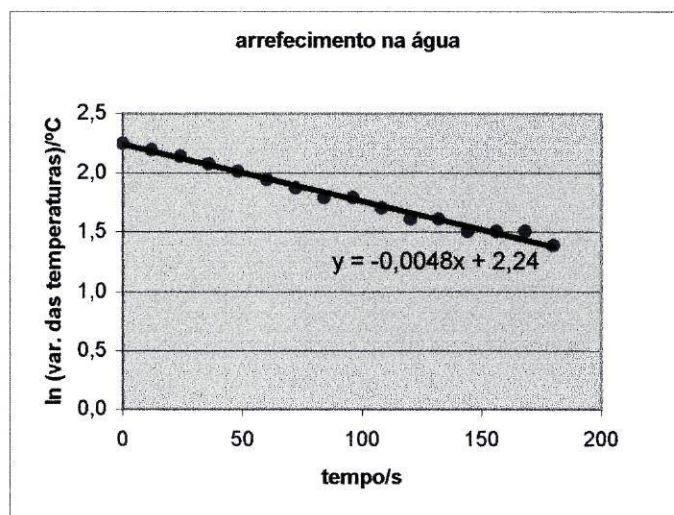


Figura 3.26 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo

### 3.1.6. Arrefecimento de um "bébé" versus um "adulto"

Faz parte das mais elementares regras de prudência agasalhar bem um bebé que se leve à rua num dia fresco: envolvê-lo em xailinhos e cobri-lo bem, na alcofa. É que um bebé perde calor, por várias razões, com mais rapidez que um adulto.

Tentemos simular esse arrefecimento.

Usando garrafas de água de plástico cheias de água quente se possível a temperaturas semelhantes ( uma de 33 cl como **bébé** e outra de 150 cl como **adulto**), regista-se o arrefecimento dos dois corpos.

#### 1ª Experiência:

**bébé** (garrafa de 33 cl)

**adulto** (garrafa de 150 cl)

As duas garrafas estão cheias de água quente, aproximadamente à mesma temperatura  $T_0$ , no ar à temperatura  $T_a$  de 18,5 °C.

O **STAD** (com sensores de temperatura) forneceu os seguintes dados:

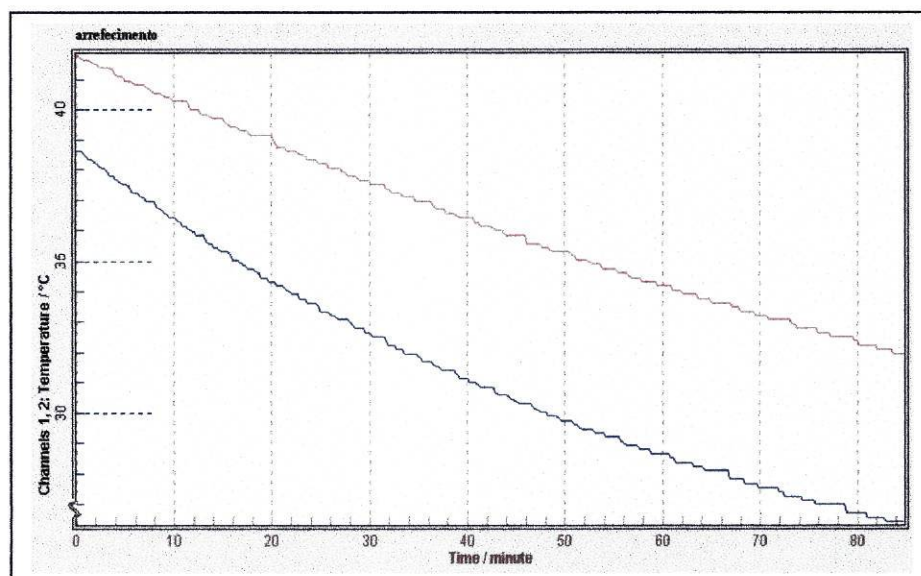


Figura 3.27 - Registo DDWIN no arrefecimento "bébé-adulto" (1ª experiência)



Procedeu-se ao tratamento dos dados em EXCEL e obteve-se o gráfico da Fig. 3.28 que dá a variação logarítmica das diferenças de temperatura,  $\Delta T = T - T_a$ , com o tempo:

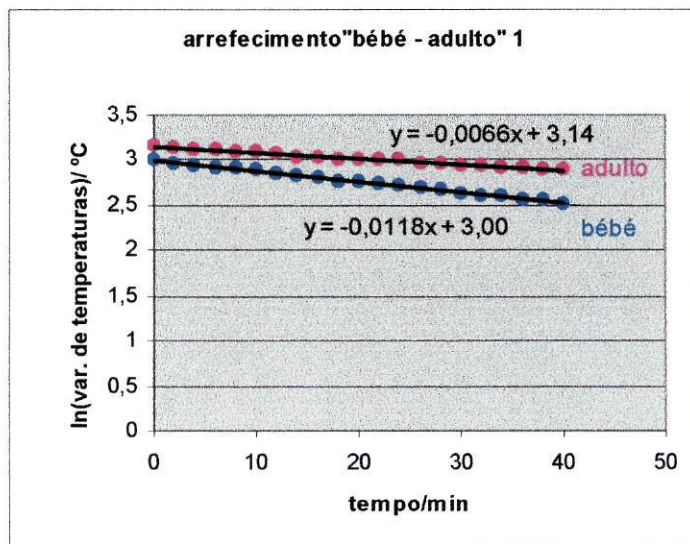


Figura 3.28 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo

### 2ª Experiência:

Repetiu-se a experiência anterior (garrafas de 33 cl+150 cl) partindo de temperaturas iniciais diferentes das consideradas nessa experiência.

Apresentam-se, a seguir, os dados registados pelo **STAD** em gráfico e o gráfico da variação do logaritmo das diferenças de temperatura  $\Delta T = T - T_a$  com o tempo.

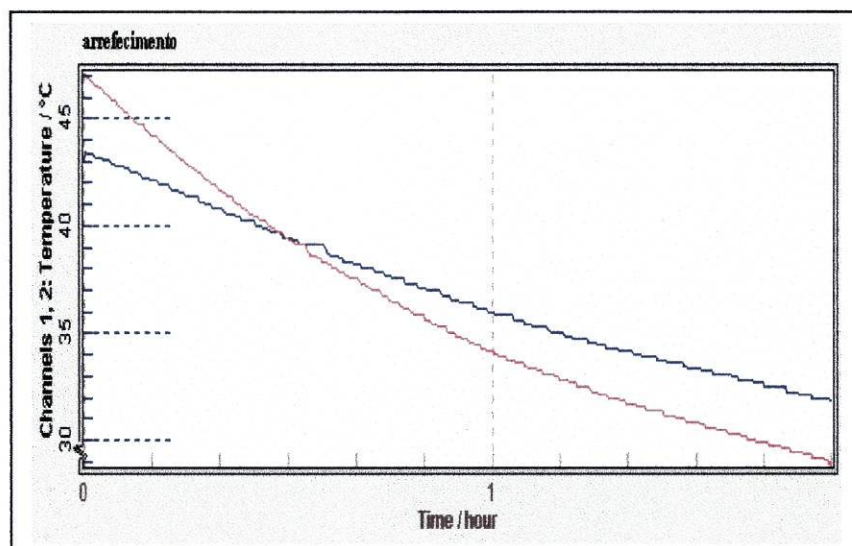


Figura 3.29 - Registo DDWIN no arrefecimento "bêbê - adulto" (2ª experiência)

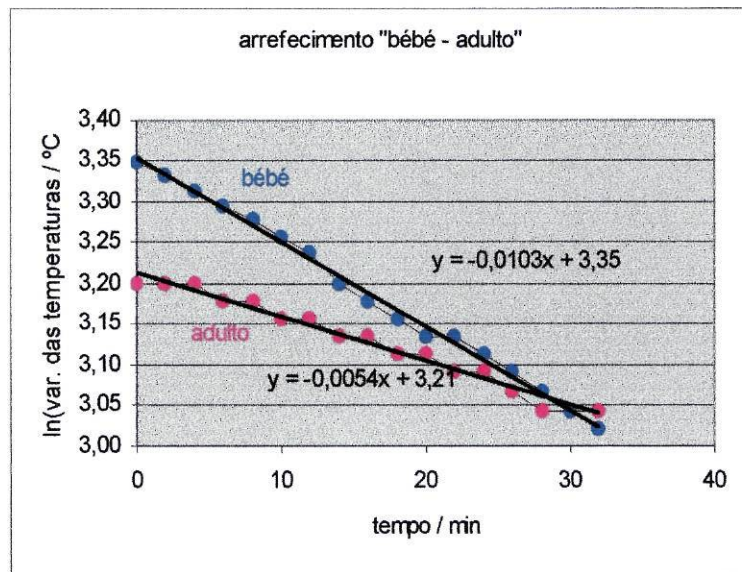


Figura 3.30 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo

### 3ª Experiência:

Alterou-se o procedimento anterior utilizando uma garrafa de 33 cl e uma de 50 cl para estudar o arrefecimento comparado de um bebé e de uma criança maior (digamos, um rapaz).

bébé - garrafa de 33 cl

rapaz - garrafa de 50 cl

A partir dos valores de temperatura registados pelos sensores, em automático, como nas restantes experiências, obteve-se o gráfico da Fig. 3.31 :

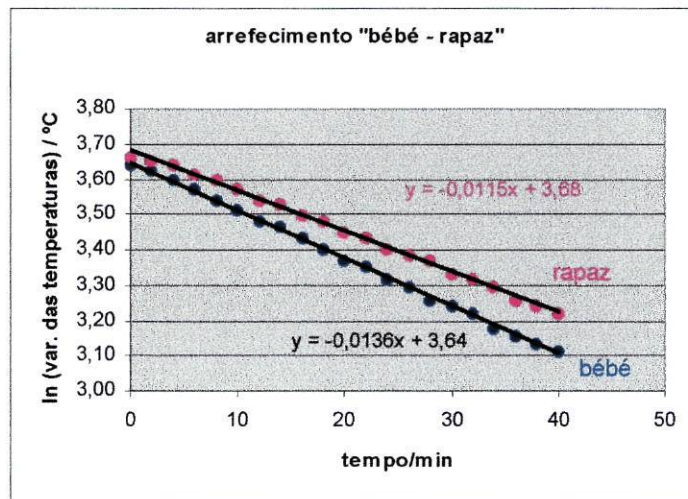


Figura 3.31 - Variação linear de  $\ln(\Delta T)$  com o tempo



## **Análise dos resultados**

A expressão da constante de tempo  $\tau$  considerada anteriormente é

$$\tau = m.c / K$$

A constante de **tempo de arrefecimento**  $\tau$  é proporcional à massa (e também ao volume, para uma massa volúmica constante) e inversamente proporcional à superfície porque  $K$  está relacionado com os detalhes da superfície.

A constante de **tempo de arrefecimento**  $\tau$  é, portanto, proporcional a  $V/S$  (com dimensões de um comprimento) e se, grosseiramente, se tomar o corpo como esférico,  $\tau$  há-de ser proporcional à **raiz cúbica de  $V$**  e o declive da recta **ln(variação das temperaturas) = f(t)** será proporcional ao **inverso da raiz cúbica de  $V$** .

Quando se toma para **bébé** a garrafa de 33 cl e para **adulto** a garrafa de 150 cl, obtém-se, para equações das rectas,  **$y = -0,0118t + \text{constante}$**  e  **$y = -0,0066t + \text{constante}'$** , respectivamente (2ª experiência).

Verifica-se que, de facto, o bebé arrefece mais rapidamente:  $\tau_{\text{bébé}} / \tau_{\text{adulto}} = 0,0066 / 0,0118 = 0,56$ .

A razão dos volumes é  $V_{\text{bébé}} / V_{\text{adulto}} = 33 \text{ cl} / 150 \text{ cl} = 0,22$  cuja raiz cúbica é igual a **0,60**.

Há uma diferença relativa de 7% entre os valores a comparar.

Os valores obtidos na 1ª experiência conduzem a uma diferença relativa de 4%.

Mediu-se ainda, na 3ª experiência, o arrefecimento da água quente de uma garrafa de 33cl (um **bébé**) e o arrefecimento da água quente de uma garrafa de 50 cl (uma **criança** maior). As equações obtidas foram as seguintes:

$$y = -0,0134t + \text{constante}$$

$$y = -0,0115t + \text{constante}'$$

Confirmou-se o arrefecimento mais rápido do **bébé** e verifica-se ainda que **a criança** tem uma constante de **tempo de arrefecimento** menor que um **adulto** (  $1/0,0115$  contra  $1/0,0058$ ).

A razão das constantes de tempo de arrefecimento (bébé/criança) é igual a  **$0,0115/0,0134 = 0,86$** .

A razão dos volumes é igual a  **$33 \text{ cl} / 55 \text{ cl} = 0,60$**  e a **raiz cúbica** dos volumes é igual a **0,87**.

Há uma diferença de 1% entre os valores a comparar.

No caso da 2ª experiência, estuda-se o arrefecimento de um bebé e de um adulto, sendo diferentes as temperaturas iniciais (47,0° C para o bebé e 43,3 °C para o adulto). A temperatura ambiente  $T_a$  é igual a 18,5 °C.

Obtiveram-se os seguintes declives para as rectas ajustadas:  $-0,0103 \text{ s}^{-1}$  , para o bebé e  $-0,0054 \text{ s}^{-1}$  , para o adulto.

Os declives obtidos na 1ª experiência (temperaturas iniciais de 38,5 °C e 42,0 °C, para o bebé e o adulto, respectivamente, e igual temperatura ambiente) foram:  $-0,00118 \text{ s}^{-1}$  , para o bebé e  $-0,0066 \text{ s}^{-1}$  , para o adulto.

As diferenças nos valores do declive e, portanto, da constante de tempo são devidas às diferentes gamas de temperaturas a que é aplicada a lei de arrefecimento de Newton.

Devem sublinhar-se os aspectos aproximativos desta análise ao considerar:

- 1 - a forma esférica do corpo
- 2 - a massa específica constante
- 3 - a ausência de processos metabólicos.

De referir ainda que se considerou **um arrefecimento global** (com o contributo maior ou menor das diferentes formas de transferência de calor: radiação, convecção e condução).

## 3.2 MEDIÇÃO DA TERMOCONDUTIVIDADE

### 3.2.1 A condução radial / Comparação de termocondutividades

Construíram-se dois discos, um de cobre e outro de aço, com as mesmas dimensões (20 cm de diâmetro e 3,0 mm de espessura), que foram revestidos, na face superior com uma folha termossensível ajustada em toda a superfície ao metal pelo aperto com uma folha de plexiglass. Ao centro de cada disco foi adaptado um aquecedor de resistência calibrada (de  $65,0 \Omega$ ) e cuja potência fornecida é regulada através de um **Variac** (potenciômetro). A face inferior dos discos foi isolada com cortiça.

Os discos estão munidos de termopares de cobre/ constantan (de sensibilidade igual a  $40 \mu\text{V/K}$ ) que permitem determinar a diferença das temperaturas entre um ponto central (a 2,0 cm do centro) e um ponto exterior (a 9,2 cm do centro).

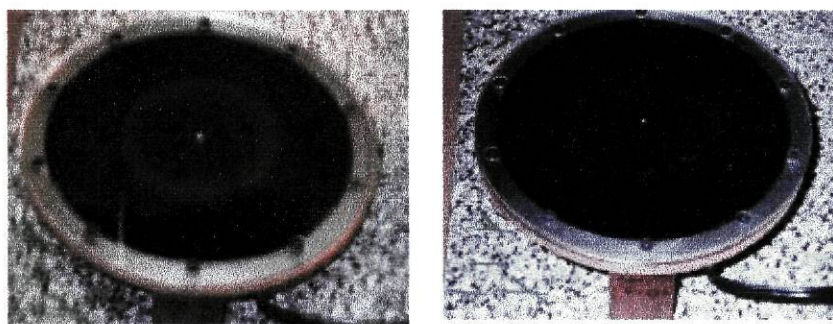


Figura 3.32 - Condução radial em:

(1) disco de cobre

(2) disco de aço

#### 1ª experiência:

1. Em primeiro lugar, os discos permitem comparar, de forma bem visível, a diferente rapidez da condução radial do cobre e do aço e, portanto, comparar qualitativamente os valores das condutividades térmicas dos metais dos discos.

2. A ligação em paralelo dos dois aquecedores ao mesmo Variac permite a visualização simultânea da condução nos dois discos.



Ao fornecer potência ao conjunto, observa-se o aparecimento de um ponto colorido (em primeiro lugar no disco de aço) que se vai transformando num disco colorido de raio cada vez maior que põe em evidência a propagação radial do calor.

Esperar-se-ia que, sendo o cobre melhor condutor que o aço, a mancha colorida aparecesse, em primeiro lugar, no disco de cobre. Mas, de facto, sendo melhor condutor, há uma "difusão" do calor que faz com que, para a mesma energia térmica fornecida, haja uma maior elevação de temperatura no disco de aço tornada, portanto, mais visível com o material termossensível.

A melhor condução térmica do cobre evidencia-se pelo facto do raio da mancha colorida aumentar mais rapidamente no cobre atingindo os bordos do disco em primeiro lugar. Interrompendo o aquecimento, a mancha circular colorida reduz-se mais rapidamente no cobre que no aço. Após o disco de cobre ter readquirido o aspecto inicial, a cor no disco de aço demora algum tempo a desaparecer.

## **2ª experiência:**

Pretende-se determinar a condutividade térmica do cobre.

Regulando o Variac de forma a aplicar à resistência de  $65,0 \Omega$  do aquecedor uma tensão de  $40,0 \text{ V}$ , registaram-se os valores das tensões dos termopares (nos pontos considerados) e converteu-se a sua diferença em diferença de temperaturas.

V1(mV)	V2(mV)	V1-V2(mV)	T1-T2 (K)
2,332	2,153	0,179	4,48
2,378	2,179	0,199	4,98
2,396	2,220	0,176	4,40
2,423	2,257	0,166	4,15
2,560	2,396	0,164	4,10
2,644	2,486	0,158	3,95
2,709	2,544	0,165	4,13
2,749	2,598	0,151	3,78

O gradiente de temperaturas é máximo (correspondente a  $0,197 \text{ mV}$ ) ao fim de cerca de  $150 \text{ s}$ , quando começa a aparecer cor no centro. A cor verde vai alastrando até o disco apresentar, ao fim de  $300 \text{ s}$ , uma cor verde uniforme e o gradiente de temperaturas corresponder a uma diferença de potenciais nos pares termoeléctricos de  $0,172 \text{ mV}$ .

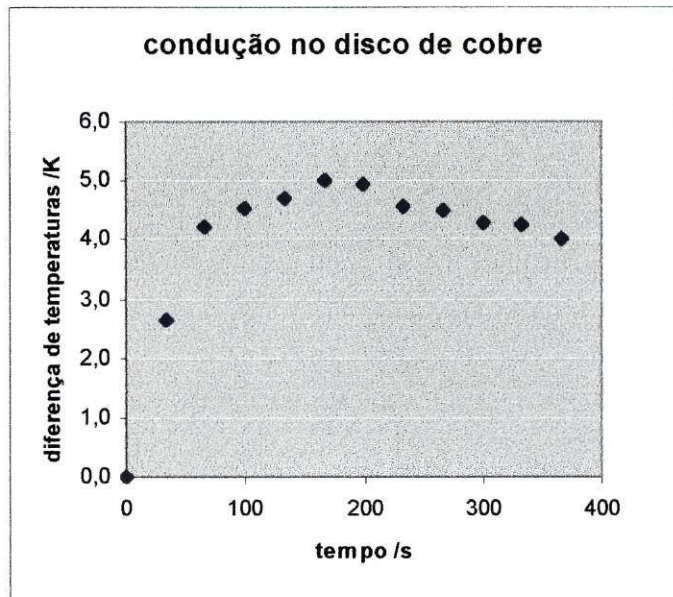


Figura 3.33 - Variação do gradiente de temperatura, entre dois pontos do disco, com o tempo

A diferença de temperaturas entre o centro do disco e a periferia não se manteve constante, apresentando uma diminuição ao longo do tempo. O contacto da periferia do disco (de 3,0 mm de espessura) com o exterior não permitiu um escoamento de calor capaz de conduzir a um gradiente de temperatura constante, entre o centro do disco e a periferia. Também não há garantia de um isolamento perfeito da face superior do disco através da folha termossensível e da placa de plexiglass que a ajusta ao disco, sob pressão.

Foi calculado o valor de  $k$  (condutibilidade térmica do cobre) no instante em que o gradiente de temperaturas é máximo (5,0 °C) e quando o disco fica com uma cor uniforme (4,3 °C):

A soldadura do termopar exterior, que indica a temperatura  $T_2$ , encontra-se a uma distância  $r_2$  do centro do disco igual a 9,2 cm enquanto a do termopar interior, que indica a temperatura  $T_1$ , se encontra a uma distância  $r_1$  de 2,0 cm.

A espessura  $L$  do disco é de 0,30 cm.

A potência  $P$  fornecida corresponde à diferença de potencial de 40,0 V aplicada ao aquecedor de resistência igual a 65,0  $\Omega$  e vale, portanto, 24,6 W.

Os valores determinados, a partir da expressão  $P=k.2\pi.L.(T_1-T_2)/\ln(r_2/r_1)$ , são respectivamente,  $(42 \pm 3) \times 10$  W/m.K e  $(47 \pm 3) \times 10$  W/m.K.

O valor tabelado do cobre é igual a 401 W/m.K. Estamos, portanto, na presença de diferenças no valor da termocondutividade da ordem de 10%. À partida sabíamos que este



método só poderia dar ideia da ordem de grandeza da termocondutividade, uma vez que, através da periferia do disco, não há suficiente escoamento de calor de forma a atingir-se um regime estacionário.

Com base no pressuposto anterior, preparou-se a determinação da condutividade térmica do cobre, por condução linear, que se descreve a seguir.

### 3.2.2. A condução linear / Determinação da termocondutividade do cobre

Construiu-se o dispositivo representado a seguir para proceder à determinação da termocondutividade do cobre.

É constituído por uma haste de cobre com 10,0 mm de diâmetro  $D$  que é envolvida no centro por um enrolamento de  $28 \Omega$  de resistência que funciona como aquecedor de potência  $P$ . Ao mesmo tempo, este enrolamento divide a haste em duas porções idênticas de 10 cm de comprimento  $L$ , onde se vai estudar a propagação do calor em sentidos contrários. Junto ao aquecedor, temos as extremidades quentes. As extremidades opostas, mantêm-se a temperatura constante pela circulação de água em torno delas. A diferença de temperaturas entre as extremidades quente e fria das duas semi-hastes é determinada por dois termopares cobre/constantan cujas d.d.p. são lidas por um milivoltímetro.

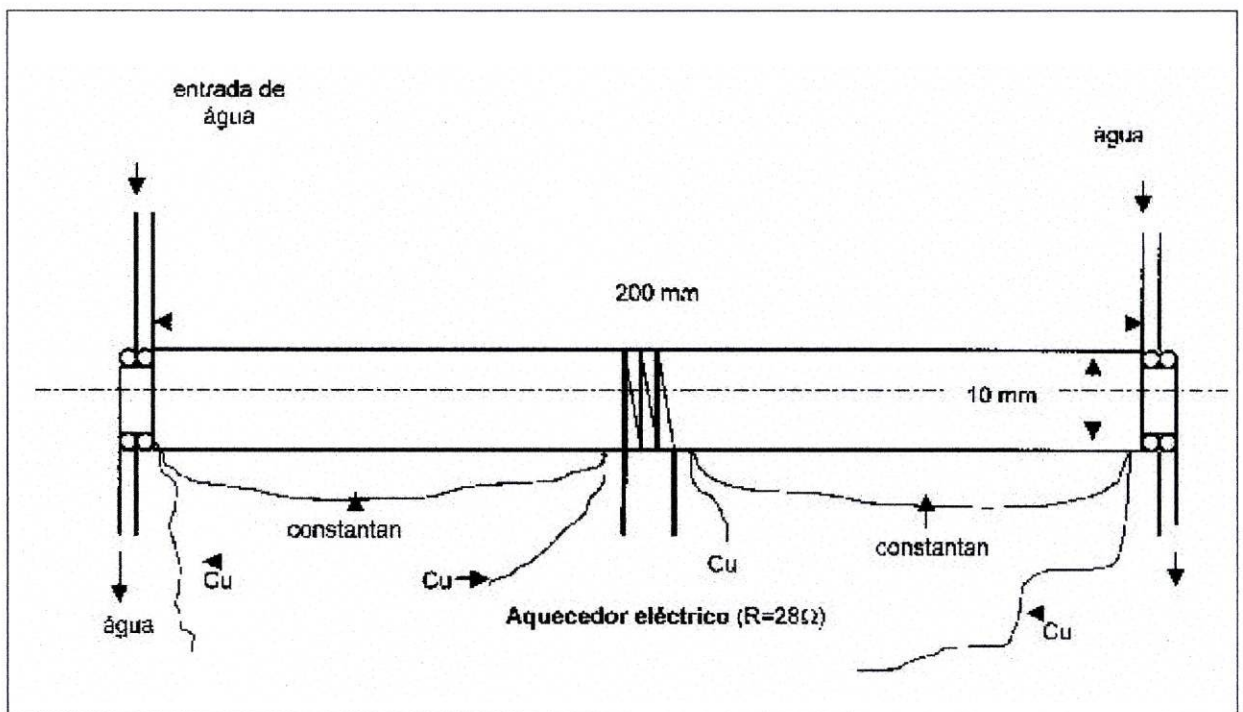


Figura 3.34 - Esquema do dispositivo para determinação da condutividade linear do cobre



Com uma fonte de alimentação fornecem-se potências adequadas ao aquecedor cujo valor se determina com o auxílio de um voltímetro e um amperímetro. Tendo previamente regulado a circulação de água para o arrefecimento das extremidades a temperatura mais baixa, procede-se às leituras da intensidade da corrente e correspondentes diferenças de potencial dos termopares  $V_1$  e  $V_2$  dos termopares.

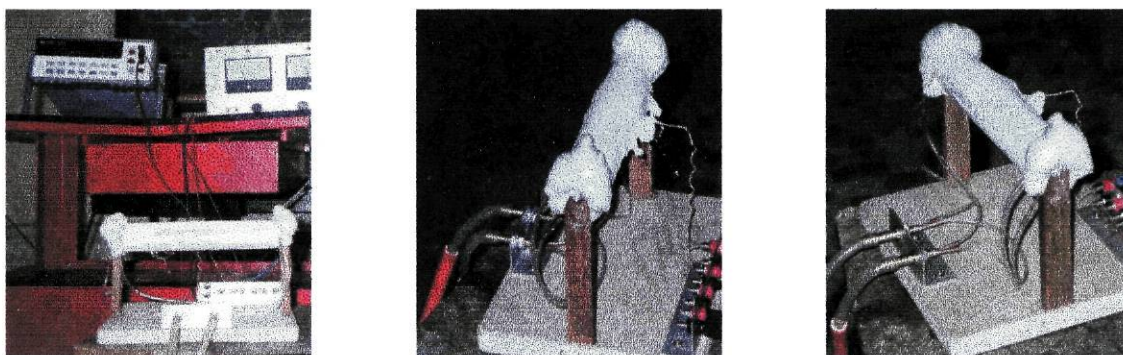


Figura 3.35 - Dispositivo para a determinação da termocondutividade do cobre

### Registos das medições

I /A	P /W	$V_1$ /mV	$V_2$ /mV	$\Delta T_1$ /K	$\Delta T_2$ /K
0,333	3,101	0,216	0,193	5,40	4,83
0,373	3,893	0,269	0,245	6,73	6,13
0,396	4,403	0,301	0,269	7,53	6,73
0,427	5,102	0,360	0,325	9,00	8,13
0,467	6,096	0,425	0,382	10,63	9,55
0,504	7,112	0,504	0,451	12,60	11,28
0,518	7,513	0,512	0,456	12,80	11,40
0,535	8,014	0,562	0,505	14,05	12,63

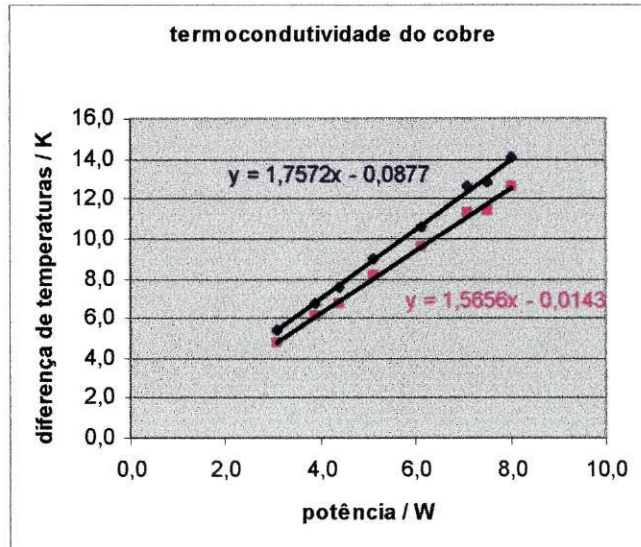


Figura 3.36 - Gráfico para a determinação da termocondutividade de cobre

Adaptando a expressão de condução de calor a este caso, tem-se  $P/2=(k.A/L).\Delta T$  ou, ainda,  $P/2=(k.\pi.D^2/4L).\Delta T$ .

Representando  $\Delta T$  em função de  $P$  (fig.3.36), obtém-se uma recta de declive  $m=2L/(k.\pi.D^2)$  ou seja  $k=2L/(m.\pi.D^2)$ .

Obtiveram-se os valores de 362 e 407 W/m.K para a termocondutividade do cobre, respectivamente para a semi-haste 1 (à esquerda) e para a semi-haste 2 (à direita). A diferença de valores, que se confirma ao trocar as ligações, dever-se-á à dificuldade de localizar as soldaduras dos termopares num ponto bem definido.

Adicionando-se o erro devido à dispersão dos resultados com o erro instrumental, obtém-se  $\Delta k=11$  W/m.K e 12 W/m.K.

Os resultados da medição serão  $(36 \pm 1) \times 10$  W/m.K e  $(41 \pm 1) \times 10$  W/m.K.

O valor da termocondutividade térmica do cobre tabelado é de 401 W/m.K.

Os valores obtidos, mais baixos que o valor tabelado, dever-se-á a possíveis perdas de potência para o exterior.



A utilização dos sensores na realização de algumas experiências mais elaboradas deste meu trabalho, sensibilizou-me para as notícias que aparecem todos os dias nas revistas de divulgação científica e justifica que, neste capítulo, lhes dedique alguma atenção:

### 3.4 Os sensores no futuro

A evolução rápida da informática fez-nos passar de computadores de grande porte, grandes e tão caros que eram partilhados por centenas de cientistas e engenheiros, para os actuais **PC** (computadores pessoais), de aquisição cada vez mais acessível.

Suponho que entre nós terá aparecido um desses "monstros" IBM na Faculdade de Ciências do Porto nos fins dos anos 60. Actualmente, apetece dizer que são as crianças que tratam os computadores com mais à-vontade.

A potência dos computadores duplica de dezoito em dezoito meses, segundo a **lei de Moore**. Assim, desde 1950 até hoje, a potência dos computadores aumentou cerca de dez mil milhões de vezes ( $2^{33} \cong 10^{10}$ ).

Na base da revolução dos computadores estão os transistores e a sua crescente miniaturização. Os transistores originais eram componentes electrónicos grosseiros, com dimensões apreciáveis, ligados por fios e construídos à mão. Hoje, os transistores fazem parte de circuitos impressos em placas de silício por meio de raios luminosos que produzem linhas e sulcos microscópicos (fotolitografia). Estamos na era dos **microchips**.

Tivemos ainda, nos anos 90, o crescimento explosivo da Internet que resultou da conjugação entre a potência crescente dos microprocessadores e do aparecimento de **lasers** baratos capazes de transportar quantidades imensas de informação, à velocidade da luz, ao longo de fibras ópticas.

Reportando-nos ao que tem acontecido nos últimos anos e fazendo um raciocínio exponencial ( e não linear como aquele para que o nosso cérebro está educado), não vamos estranhar que as mudanças nos próximos cinco ou dez anos sejam radicais.

As exigências das leis da Física e da Economia vão tornar os computadores omnipresentes a longo prazo. A sua inevitabilidade está ligada à proliferação da tecnologia dos microchips baratos.

Nesta nova era em que estamos a entrar pela sua vulgarização e pela miniaturização dos seus componentes, os computadores vão tornar-se invisíveis. A vulgarização tem um reflexo psicológico: sempre que criamos hábitos, tornamo-nos menos conscientes das coisas. Foi o que aconteceu, há mais tempo com a electricidade, e, há menos tempo, com os motores. Encontram-se (escondidos, disfarçados) nos mais variados sítios e limitamo-nos



a usá-los, muitas vezes sem pensar que eles existem: nos vidros eléctricos dos carros, nas portas automáticas das garagens e outros acessos, nos electrodomésticos de casa ...

Quando era muito pequena e vivia numa aldeia onde a instalação da energia eléctrica só aconteceu quando tinha doze anos, lembro-me de dizer: "**Quando for grande, quero ter tudo eléctrico: ferros de passar roupa** (eram a carvão), **caçoilas** eléctricas (eram de barro) e... (tudo o que fazia parte do dia-a-dia, os actuais electrodomésticos, afinal)". Hoje é tudo tão simples como actuar num interruptor e/ou rodar um botão ou acontece automaticamente.

Portanto, para os meninos que já nasceram em casas com computadores passar a viver em **casas inteligentes** ou usar **carros inteligentes** vai ser normalíssimo. Ninguém vai pensar nos computadores invisíveis nem nos **sensores** a eles associados que estarão por trás dos "escravos robóticos" cujas tarefas serão programadas ou comandadas pelos seus utilizadores ou pela voz ou por um simples olhar.

São os **sensores** que vão passar a acompanhar-nos na nossa vida.

É a indústria automóvel que começa a agitar-se sob os efeitos da revolução informática. O automóvel e as estradas serão alvo de uma revolução no séc.XXI. A chave para os **carros inteligentes** do futuro são os **sensores**.

Estão a ser construído protótipos de carros inteligentes capazes de monitorizar os condutores e as condições de condução na vizinhança. Pequenos radares ocultos nos pára-choques podem detectar automóveis próximos e prevenir colisões. Se o condutor cometer um erro de condução colocando-se à frente de outro carro, noutra faixa, o computador emitirá um aviso.

Muitos acidentes de estrada são devidos a manobras perigosas devidas a faltas de atenção, embriaguez ou sonolência. Carros inteligentes dispõem de sensores para evitar os acidentes. Um carro inteligente pode sentir se o condutor está embriagado através de sensores electrónicos que captam vapores de álcool no ar e recusa-se a fazer pegar o motor. Para evitar o risco do condutor adormecer, pode incluir-se uma câmara no painel de instrumentos que possa reconhecer os movimentos do rosto e olhos do condutor. Se as pálpebras se fecharem durante um certo tempo e a condução se tornar errática, o computador emitirá um aviso sonoro.

A existência de sensores num carro inteligente que se sintonizam com sinais de rádio emitidos por satélites em órbita permite indicar com precisão a localização do carro em qualquer momento ou avisar de engarrafamentos no trânsito. É o sistema **Global Positioning System** que se está a generalizar. O **GPS** permite ainda, no caso de roubo do carro, alertar a polícia e localizar a sua posição. O sistema pode permitir aos aviões aterrar por controlo remoto. A baixa de preço dos **microchips** poderá generalizar o sistema aos invisuais que

poderão usar sensores de GPS nas bengalas e aos adeptos de marcha/caminhada para localizar a sua posição.

No equipamento de bombeiros, para o ataque a incêndios e operações de salvamento, há capacetes munidos de sensores de IV que permitem ver através do fumo.

Os computadores já começam a identificar o humor de uma pessoa através do seu rosto. As emoções traduzem-se pelos movimentos que induzem nas nossas feições. Colocando sensores no rosto de uma pessoa que vai sorrir, rir, fingir, que ri ou vai franzir o sobrolho, os sensores conseguem detectar o número de músculos faciais que se movem. Por intermédio da identificação dos movimentos bem definidos de extensão que provocam no rosto, o computador consegue reconhecer as emoções.

Foram referidas algumas, possivelmente poucas, das utilizações dos sensores no presente e num futuro mais ou menos próximo.

## Conclusões

A sequência lógica do trabalho realizado será fazer o seu aproveitamento na Escola, a vários níveis:

1. **Ao nível dos Alunos**, solicitando estes no sentido de um empenhamento maior no estudo da Física:

### **1.1 A nível curricular**

Do programa de 8º Ano consta o tema **LUZ E VISÃO**. Assim, ao estudar a refacção e, como sua consequência a dispersão, poderia ser oportuno incluir as experiências descritas de observação de espectros. As experiências de difusão da luz em soluções coloidais respondem às perguntas:

**Porque é o céu azul?**

**Porque é que o céu, à noite, não é azul quando temos lua cheia?**

**O que acontece ao céu no pôr-do-sol? E no nascer-do-sol?**

Ao fazer referência ao espectro electromagnético, podem ser apresentadas a experiência de microondas "**Ferver água num copo de gelo**" e a experiência que mostra a absorção pela água das radiações infravermelhas emitidas por um retroprojector (pag.30). Poder-se-á, ainda, chamar a atenção para a relação entre radiações ultravioletas e o "buraco" de ozono.

O programa de 9º Ano contempla dois temas a que se pode aplicar o estudo realizado:

Tema 1. **Produção e consumo de energia** com o subtema **Energia transferida como calor** em que, no estudo dos Mecanismos de transferência de energia, cabem as experiências de **radiação, convecção e condução** descritas.

Falar de consumo de energia implica perguntar "**que energia?**" e "**quanta energia?**"

A resposta a "**que energia?**" leva-nos às energias renováveis e não-renováveis; daí, pode-se ir para poluição e efeito de estufa.

A resposta a "**quanta energia?**" leva-nos a chamar a atenção para a necessidade da utilização racional da energia e as experiências de **Efeito "de rebanho"** no



**arrefecimento, Simulação do arrefecimento do corpo humano e Comparação do arrefecimento de um bebé e de um adulto** podem sensibilizar os alunos para a quantificação das perdas de energia como calor.

Tema 2. **Atmosfera e mudanças de tempo** com o subtema **Alterações na atmosfera** que, incluindo a poluição e alterações climáticas, daria oportunidade para explorar as experiências de **Efeito de estufa** e referir ainda o "**buraco**" de ozono.

Devo acrescentar que, atendendo à extensão dos programas e à falta de tempo com que os professores se deparam para os cumprir, as experiências referidas são só exemplos duma possível integração no tema a tratar.

É de salientar ainda a importância do estudo da Luz, no 8º Ano, como preparação para o tema **Investigando a estrutura dos átomos**, do programa de Química do 11º Ano. No subtema **Absorção e emissão da luz pela matéria e energia do electrão do átomo de hidrogénio**, prevê-se a identificação dos elementos pela cor que conferem à chama o que implica observar e interpretar os seus espectros de emissão. Como pré-requisito, é indispensável o conhecimento do espectro electromagnético e das características das radiações electromagnéticas em termos de frequência e comprimento de onda, velocidade de propagação e energia. Para o estudo da quantização de energia no átomo de hidrogénio, deita-se mão do espectro de emissão daquele átomo, com as quatro riscas visíveis da série de Balmer de comprimentos de onda característicos das cores observadas, e com as séries de radiações invisíveis, no UV e no IV. Cada risca corresponde à transição electrónica entre dois níveis energéticos.

É, portanto, indispensável um contacto prévio dos alunos com os conceitos de luz, radiações, espectros.

## **1.2 A nível de Área-Escola ou de Clubes de Física.**

Um tema que inclua o estudo do **Efeito de estufa** e/ou "**buraco**" de ozono e/ou **poluição** tem todo o interesse em ser desenvolvido a nível de Área-Escola. Traduzindo uma preocupação actual, permite a articulação de várias áreas disciplinares: a Física, a Química, a Biologia e a Geografia, a que estaria associado o método experimental (com a possibilidade de utilização de sensores para aquisição dos dados), a Matemática e a Informática para o tratamento dos dados e outras disciplinas de carácter social e económico.

Todas as experiências consideradas são adequadas à realização num Clube de Física e podem sugerir outras. Os sensores constituem um equipamento indispensável, pela sua actualidade e pelo seu interesse, neste ambiente de trabalho.

## **2. Ao nível dos Professores**

Não tenho pretensões de ensinar "o Padre-Nosso ao vigário". Não preciso de despertar colegas.

Há, no entanto, um aspecto que gostaria de partilhar com eles:

Os sensores, como material de laboratório relativamente recente, não estão disponíveis em muitas escolas. A apresentação de pequenas experiências com sensores permite despertar os professores, desde o ensino básico até ao ensino secundário, para o interesse da sua utilização nos mais variados temas da Física, da Química e da Biologia e para alunos de vários níveis etários.

Assim gostaria de transmitir aos meus colegas professores o que aprendi e, possivelmente, o entusiasmo que o uso do material me proporcionou devido à maneira expedita, completa e cómoda que nos permite uma grande acessibilidade ao estudo de certos fenómenos que, devido às suas condicionantes, doutro modo não seria exequível.

## **3. Ao nível da professora que elaborou o trabalho**

Concluo que foi para mim uma motivação para abrir (mais) os olhos e o espírito como me propunha que acontecesse com os alunos.

Já vi arco-íris vermelhos, ao anoitecer, e manchas irisadas no céu em condições que, de certeza, não conduziam à formação de arco-íris. Mas, indo à procura da sua causa, descobri que eram uma parte de um halo ... à volta de um Sol quase poente.

Estou na dúvida se aqueles fenómenos se dignaram aparecer, agora, pela primeira vez, à frente dos meus olhos.

O que importa é a curiosidade, a disponibilidade para ver e querer entender. Fico feliz se conseguir passar a mensagem aos alunos. Fico mais feliz ainda quando recebo a mensagem deles. Às vezes acontece, são os alunos que me ensinam.



## **BIBLIOGRAFIA**

- ADKINS** C. J., *THERMAL PHYSICS*. Hodder and Stoughton Educational, London, (1976)
- ALVES** A. José, **ALMEIDA** A. Traça de, *CONTRIBUIÇÃO PARA O ENSINO DA ENERGIA SOLAR*, *Gazeta de Física*, vol. VII, Fasc.3/4, (1984)
- BEISER** Arthur, *CONCEPTS OF MODERN PHYSICS*. McGraw-Hill, New York, (1995)
- BERKES** Istvan, *A FISICA DO QUOTIDIANO*. Gradiva, Lisboa, 1992
- BLOOMFIELD** Louis A. , *HOW THINGS WORK: The Physics of Everiday Life*. John Wiley and Sons, New York, (1997)
- BODNER** George M. e **PARDUE** Harry L., *CHEMISTRY:an Experimental Science*. John Wiley and Sons, New York, (1995)
- BOEKER** Egbert and **GRONDELLE** Rienk Van, *ENVIRONMENTAL PHYSICS*. John Wiley and Sons, New York, (1995)
- BOHREN** Craig F., *CLOUDS IN A GLASS OF BEER / Simple Experiments in Atmosferic Physics*. John Wiley and Sons, New York, (1987)
- BOURDIAL** Isabelle, *L'HOMME A-T-IL VRAIMENT CHANGÉ LE CLIMAT?* **Science et Vie** **852** 48-52, (1988)
- BRADY** James E. and **HOLUM** John R., *CHEMISTRY: The Study of Matter andIts Changes*. John Wiley and Sons, New York, (1993)
- ÇENGEL** Yunus A., *HEAT TRANSFER: A Pratical Approach*. WCB/McGraw-Hill, New York, (1998)
- CHANG** Raymond, *QUIMICA*. McGraw-Hill de Portugal, Lisboa, (1994)
- CHARLSON** Robert J. and **WIGLEY** Tom M.L., *SULFATE AEROSOL and CLIMATIC CHANGE*, **270**, nº2, 28-35,(1994)
- CHASSERIAUX** J.-M., *CONVERSION THERMIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE*. Dunod, Paris, (1984)
- CROMER** Alan H., *PHYSICS FOR THE LIFE SCIENCES*. McGraw-Hill, New York, (1981)
- DESSART** A. , **JODOGNE** J.-C. et **JODOGNE** J., *CHALEUR*. Éditions A. de Boeck, Bruxelles, (1973)
- DEUS** Jorge Dias et al., *INTRODUÇÃO A FISICA*. McGraw-Hill de Portugal, Lisboa, (1992)
- DUNCAN** Tom, *EXPLORING PHYSICS* (vol.2). John Murray Publishers, London, (1970)
- EHRlich** Robert, *VIRAR O MUNDO DO AVESSO e outras 174 Demonstrações Físicas Simples*. Gradiva, Lisboa, (1992)
- FISCHER** Brian W., *THERE'S A HOLE IN MY GREENHOUSE EFFECT*. **School Science Revue**, **79**, 93-99, (1998)
- GRAVES** Jonathan e **REAVEY** Duncan, *A MUDANÇA GLOBAL DO AMBIENTE / Plantas, Animais e Comunidades*. Instituto Piaget, Lisboa, (1998)



- GREENLER** Robert, *BEYOND THE (VISIBLE) RAINBOW*, **Optics News**, Nov88, 23-24, (1988)
- GUILLEMOT** Hélène, *COUP DE FROID SUR L'EUROPE DU NORD*, **Science et Vie** **903** , 58-64, (1992)
- HALLIDAY D.**, **RESNICK R.** e **WALKER J.**, *FUNDAMENTALS OF PHYSICS*. John Wiley and Sons, New York, (1993)
- HECHT** Eugene, *OPTICA*. Fundação Gulbenkian, Lisboa, (1991)
- HICKMAN** Jennifer, *HOW HOT DOES YOUR PARKED CAR BECOME?* **The Physics Teacher**, JAN91, 58, (1991)
- HOLTON G.** e **ROLLER H. D.**, *FUNDAMENTOS DE LA FISICA MODERNA*. Editorial Reverté, Barcelona, (1972)
- HOLTZCLAW**, Henry F., **ROBINSON** William R. and **ODOM** Jerome D., *GENERAL CHEMISTRY*. D.C. Heath and Company, Lexington, Mass., (1991)
- HOUGHTON** Richard A . and **WOODWELL** George M., *GLOBAL CLIMATIC CHANGE*, **Scientific American** **260** nº4, 18-26, ( )
- HUEBNER** Jay S., *A GOLDEN OLDIE: Projecting a Sunset*, **The Physics Teacher**, **32**, 147 , (1994)
- JARDINE** Jim, *PHYSICS IS FUN*. Heinemann Educational Books, London, (1972)
- JENKINS F. A .**, **WHITE H. E.**, *FUNDAMENTALS OF OPTICS*. MacGraw-Hill, Tokyo, (1976)
- KAKUO** Michio, *VISÕES / Como a Ciência Irá Revolucionar o Século XXI*. Editorial Bizâncio, Lisboa, (1998)
- KARL** Thomas R., **NICHOLLS** Neville and **GREGORY** Jonathan, *THE COMING CLIMATE*, **Scientific American**, May97, 78-83, (1997)
- KIRKPATRICK** e **WHEELER** , *PHYSICS: a World View*. Saunders College Publishing, Philadelphia, (1995)
- KUTZ** Myer, *TEMPERATURE CONTROL*. John Wiley and Sons, New York, (1968)
- LA TAILLE** Renaud de, *L'ARITMETIQUE DE L'ARC-EN-CIEL*, **Science et Vie**, **896** (1992)
- LA TAILLE** Renaud de, *L'EFFET DE SERRE EN REDUCTION*, **Science et Vie**, **907**, 148-151, (1993)
- MINNAERT M.**, *THE NATURE OF LIGHT AND COLOR IN THE OPEN AIR*. Dover Publications, New York, (1954)
- MOORE** Marle H., *BLUE SKY AND RED SUNSETS*, **The Physics Teacher**, **11**, (1973)
- SAGAN** Carl, *BILIÕES E BILIOES*. Gradiva, Lisboa, (1998)
- SCHMIDT** Ernest, *THERMODYNAMICS- Principles and Applications to Engineering*. Dover Publications, New York, (1966)
- SCHNEIDER** David, *THE RISING SEAS*. **Scientific American**, Mar97, 113-17, (1997)
- TOSTESON** Joshua L., *THE WORLD IN A BUBBLE*, **Quantum**, SEP/OCT 97, 21-26, (1997)
- WALKER** Jearl, *O GRANDE CIRCO DA FISICA*. Gradiva, Lisboa, (1990)
- WHITE** Robert M., *THE GREAT CLIMATE DEBATE*. **Scientific American**, **263**, nº1, 18-25, (1990)