

**Universidade de Évora**

**Um Romance da Entropia:  
Contributo para a construção de uma narrativa  
histórica com valor pedagógico**

**Maria Inês Tavares da Costa**

**Orientadora: Professora Doutora Mariana de Jesus Pedreira Valente**

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

**Évora**

**2005**

**Universidade de Évora**

**Um Romance da Entropia:  
Contributo para a construção de uma narrativa  
histórica com valor pedagógico**

**Maria Inês Tavares da Costa**

**Orientadora: Professora Doutora Mariana de Jesus Pedreira Valente**



168 685

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

**Évora**

**2005**

# Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido sob a orientação da professora Mariana Valente, a quem agradeço a oportunidade que me deu de realizar uma tese deste teor, que tanto me enriqueceu. Agradeço, ainda, o apoio, a disponibilidade, a confiança e as suas valiosas sugestões.

Agradeço, também:

Ao Jorge e ao Henrique, pela partilha de livros.

Ao Daniele, pelo indispensável apoio informático, à Maria João, pelo estímulo, pela confiança e pelo apoio incondicional. Ao Filippo, pelo grande incentivo que, mesmo sem saber, me deu.

Ao Luís Miguel, pelo seu entusiasmo, pelas conversas interessantes que partilhámos e que tanto me inspiraram, pelo ânimo nas horas de maior insegurança, pela amizade.

Aos meus pais, pelo grande apoio de todas as horas.

# Resumo

O presente trabalho tem como objectivo a construção de uma narrativa histórica com valor pedagógico sobre o conceito de entropia. A mesma terá por título «Romance da entropia».

O interesse pela ciência parece ausente na educação científica escolar, tal como alguns autores têm vindo a afirmar. O contacto com os problemas que se colocaram aos cientistas e que estiveram na base de desenvolvimentos espantosos, em que a imaginação científica jogou um papel importante poderá ajudar a desenvolver um interesse pela ciência. Hoje, muitos investigadores apontam a via da História da Ciência para a introdução de alguns aspectos associados à natureza do conhecimento científico.

Consideramos que a forma de preparar professores para a utilização pedagógica da História da Ciência é através da investigação. Foi este o pressuposto que nos conduziu a uma investigação histórica que culminou com a construção do «Romance da entropia».



# The entropy romance

## Abstract

The aim of the present work is the construction of an historical narrative with pedagogical value on the entropy concept. The dissertation is entitled “Entropy romance”.

The interest for science seems absent in the scientific education given in schools, as some authors have stated. The contact with scientific problems that were often at the basis of some amazing developments where scientific imagination played a key role may help to develop an interest for science. Today, many investigators point at the history of science for the introduction of some aspects associated with the nature of scientific knowledge.

It is considered that the way of preparing teachers on the pedagogic use of history of science is through investigation. This is the presuppose that conducted to an historical investigation that culminated with the construction of the “Entropy romance”.

---

# Índice

Resumo .....	<b>i</b>
Abstract.....	<b>iii</b>
Índice.....	<b>v</b>
Índice de Figuras.....	<b>xi</b>
Introdução.....	<b>1</b>

## 1ª Parte

### Problemática e desenvolvimento metodológico

Capítulo 1- Introdução.....	<b>7</b>
-----------------------------	----------

### Capítulo 2- Reflexão sobre o ensino e a aprendizagem da ciência

2.1. A Didáctica das Ciências no século XX.....	<b>9</b>
2.2. Do ensino por descoberta ao construtivismo.....	<b>12</b>
2.3. A importância do professor no ensino construtivista.....	<b>22</b>

## **Capítulo 3- O ensino da Física e a História da Ciência**

3.1. O que a História da Ciência pode fazer pelos alunos de Física.....	25
3.2. Resultados da utilização da História da Ciência no ensino.....	35
3.3. Aplicação da História da Ciência no ensino.....	37
3.4. Análise de alguns manuais escolares.....	43

## **Capítulo 4- Ao encontro de saberes verdadeiramente formativos**

4.1. Motivações e objectivos do trabalho.....	51
4.2. Importância da narrativa histórica.....	56
4.3. Elementos metodológicos para a construção de uma narrativa.....	57

## **Capítulo 5- «Romance da Entropia»: história ou pseudohistória?**

5.1. Sinais de uma pseudohistória.....	63
5.2. Contra uma pseudohistória mas a favor de uma leitura criativa de textos.....	68
5.3. «Romance da Entropia».....	70

## **2ª Parte**

### **Romance da Entropia**

<b>Capítulo 1- Introdução.....</b>	<b>79</b>
------------------------------------	-----------

---

## **Capítulo 2- O conde de Rumford, a fábrica de canhões e a cosmologia do calor**

2.1. Benjamin Thomson ascende a conde de Rumford.....	83
2.2. Os canhões a rodar e a água a aquecer.....	85
2.3. Os mágicos fluidos imponderáveis.....	88
2.4. Calor: matéria ou movimento?.....	90
2.5. Afinal o que é que se movia?.....	93
2.6. A teoria incompleta de Rumford.....	94

## **Capítulo 3- Da técnica à Física**

3.1. As exigências da revolução industrial.....	97
3.2. O flagelo das minas alagadas.....	99
3.3. A magia do vapor e a força do nada.....	99
3.4. Savery e Newcomen entram nas minas.....	102
3.5. De uma aula de Física a uma revolução técnica.....	107
3.6. Alterações de Watt à máquina de Newcomen.....	111
3.7. A máquina de Watt.....	113
3.8. A máquina a vapor transforma o mundo.....	117
3.9. As marcas da Revolução Francesa.....	118
3.10. Um pouco da história da família Carnot.....	120
3.11. Reflexões sobre a potência motriz do fogo.....	123
3.11. 1. O fascínio de Carnot pela máquina a vapor.....	123
3.11. 2. Em busca de uma lei geral.....	126
3.11. 3. Uma analogia entre a água e o calor.....	128
3.11. 4. Viagem ao mundo das máquinas perpétuas.....	132
3.11. 5. Em busca da máxima potência motriz.....	138
3.11. 6. A importância dos estudos de Carnot.....	146
3.12. Escritos póstumos de Carnot.....	147

## Capítulo 4- Todos os caminhos vão dar à entropia

4.1. Um pouco da história de Mayer.....	151
4.2. O sangue é mais vermelho nos trópicos.....	153
4.3. A Teoria de Lavoisier do calor animal.....	154
4.4. O “calor” e o trabalho são convertíveis.....	156
4.5. De uma crença metafísica a uma revolução em Física.....	157
4.6. Um inglês chamado Joule.....	160
4.7. Da resina com alma até ao motor eléctrico.....	162
4.8. Joule rende-se à “euforia eléctrica”.....	164
4.9. Na senda de uma experiência mais simples.....	168
4.10. Disputa entre Mayer e Joule.....	169
4.11. A lei da “conservação da força” é enunciada por Helmholtz.....	170
4.12. Joule em lua de mel.....	174
4.13. A história do professor que se tornou lorde.....	176
4.14. As discussões dos irmãos Thomson.....	177
4.15. A obra de Carnot traduzida por Clapeyron.....	178
4.16. William Thomson viaja para Paris.....	178
4.17. O regresso a casa e a busca do zero absoluto.....	179
4.18. Thomson assiste à conferencia de Joule.....	181
4.19. O deleite de Thomson: Leitura e análise do livro de Carnot.....	182
4.20. Clausius une Carnot e Joule.....	186
4.21. O primeiro enunciado da segunda lei da termodinâmica.....	188
4.22. Thomson rende-se à teoria de Joule.....	191
4.23. O fim do mundo.....	193
4.24. Conclusões de Thomson.....	195
4.25. Clausius reformula a segunda lei.....	196
4.26. O nascimento da entropia pelas mãos do padrinho Clausius.....	199
4.27. O último enunciado da segunda lei.....	200
4.28. A divina entropia.....	200
4.29. A excepção não confirma a regra.....	201
4.30. Do quente para o frio.....	201

## Capítulo 5- O demónio que brinca com moléculas e a inevitável incerteza

5.1. Uma pequena história do átomo.....	203
5.2. A dança dos grãos de pólen.....	206
5.3. O comportamento dos gases.....	209
5.4. A teoria cinética do século XIX.....	211
5.5. Um escocês chamado Maxwell.....	215
5.6. Maxwell lê o trabalho de Clausius.....	218
5.7. Cálculo de probabilidades.....	220
5.8. As brincadeiras do demónio de Maxwell.....	223
5.9. O demónio e a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica.....	227
5.10. Uma tragédia na família Boltzmann.....	233
5.11. Quem era Ludwig Boltzmann.....	234
5.12. O acaso não faz parte da segunda lei.....	234
5.13. Dois paradoxos para Boltzmann explicar.....	236
5.14. A entropia é desordem.....	239
5.15. A interpretação microscópica da segunda lei da termodinâmica.....	245
5.16. No mundo microscópico da máquina a vapor.....	247
5.17. Nem o universo inteiro consegue contrariar a segunda lei da termodinâmica.....	248
5.18. O moribundo demónio continua a suscitar interpretações da segunda lei da termodinâmica.....	252
5.19. O relógio de Praga.....	257
<b>Considerações finais.....</b>	<b>259</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>275</b>



# Índice de Figuras

Figura 1- Relógio de Praga.....	77
Figura 2- Benjamin Thomson .....	83
Figura 3 – Azulejos da Universidade de Évora – experiência de Guericke.....	101
Figura 4- Máquina de Savery .....	103
Figura 5 - Máquina de Newcomen .....	106
Figura 6- (A) Máquina de Newcomen; (B) máquina de Watt .....	114
Figura 7- Sadi Carnot .....	120
Figura 8- Máquina reversível de Carnot .....	137
Figura 9 - (A) Queda de água; (B) máquina de Carnot .....	140
Figura 10 - Julius Robert Mayer .....	151
Figura 11 - James Joule .....	160
Figura 12 - William Thomson .....	176
Figura 13 - Rudolf Clausius .....	186
Figura 14- Máquina reversível de Clausius .....	189
Figura 15- Movimento browniano .....	208
Figura 16- Gás de Bernoulli .....	211
Figura 17- James Clerk Maxwell .....	215
Figura 18- (A) Transferência de energia sob a forma de trabalho; (B) Transferência de energia sob a forma de calor .....	223
Figura 19- Demónio de Maxwell .....	225
Figura 20- Rocha a subir uma colina espontaneamente .....	227
Figura 21- Ludwig Boltzmann .....	233
Figura 22-Vaso calorimétrico.....	271
Figura 23- Recipiente não calorimétrico .....	271





# Introdução

O contacto com os problemas que se colocaram aos cientistas e que estiveram na base de desenvolvimentos espantosos em que a imaginação científica jogou um papel importante poderá desenvolver um interesse pela ciência. Realçamos o desenvolvimento do trabalho de Sadi Carnot, baseado em analogias e em máquinas perpétuas que só existem na imaginação de cada um. Ou a exploração de James Maxwell à natureza estatística da segunda lei da termodinâmica. Com esta exploração, nasceu um demónio com ágeis dedos, que lhe permitem brincar com átomos e moléculas, fazendo-os passar através de uma porta sem massa.

O interesse pela ciência parece ausente na educação científica escolar, tal como alguns autores (por exemplo, Matthews) têm vindo a afirmar. A História da Ciência era, de acordo com Langevin, citado por Valente (1999), o instrumento certo para passar de uma instrução científica para uma verdadeira educação científica. Hoje, muitos investigadores (Matthews e outros) apontam também a via da História da Ciência para a introdução de alguns aspectos associados à natureza da ciência. A contextualização do conhecimento poderá proporcionar uma relação mais madura e equilibrada com o conhecimento científico. Só desta forma, a educação científica poderá contribuir para um adequado exercício de cidadania.

Como preparar professores para que possam fazer uma verdadeira utilização pedagógica da História da Ciência? Consideramos que isso só é possível através de uma experiência de investigação nesta área. Foi este o nosso pressuposto que nos lançou nesta aventura de uma construção histórica com valor pedagógico. E aventura parece-nos a palavra certa já que se trata de percorrer caminhos em que os riscos para atingir os objectivos são grandes. Apenas uma garantia: a certeza de que a nossa própria relação com o conhecimento científico irá sair alterada.

Em relação à narrativa construída com o fim de produzir elementos que possam vir a ter efeitos no combate ao desinteresse e ao dogmatismo, associados à aprendizagem em ciências, deve esclarecer-se o porquê da escolha do tema: desenvolvimento do conceito de entropia. Por um lado, salienta-se o fascínio pessoal pela entropia. No entanto e apesar do gosto particular por este conceito, o mesmo sempre foi entendido como algo rodeado por

uma aura de mistério e cuja compreensão fica aquém do que é desejado. Por outro lado, a importância do conceito de entropia e da segunda lei da termodinâmica no desenvolvimento da Física e do nosso olhar sobre o mundo físico.

Apesar do conceito de entropia ser leccionado, actualmente, no 10º ano de escolaridade, dos programas curriculares do terceiro ciclo faz parte o tema “Energia”, no qual se abordam conceitos como os de energia útil e energia dissipada que tão intimamente se relacionam com o de entropia. É nesta linha que surge a narrativa histórica com valor pedagógico com o título «Romance da Entropia». Esta surge como um meio de aproximar os professores a um conceito que merece toda a atenção na sala de aula.

Não nos sendo possível trabalhar toda a história da entropia, tivemos que delimitar o período histórico sobre o qual a narrativa irá incidir. Uma vez que o grande objectivo é o de adequar a investigação ao ensino da energia e das leis da termodinâmica no terceiro ciclo e no ensino secundário, a escolha foi baseada nos programas curriculares destes níveis de ensino. Desta forma, a narrativa será balizada pelos séculos XVIII e XIX, tendo algumas incursões a séculos passados que levam à grande questão que origina o romance; “o que é o calor?”

O trabalho está dividido em duas partes. A primeira, fornece as ferramentas que justificam o desenvolvimento da segunda. A primeira parte tem como título, “Problemática e desenvolvimento metodológico”. Após um desenvolvimento sumário de algumas questões relacionadas com o ensino, que nos conduziram a uma investigação histórica, exploram-se algumas linhas metodológicas seguidas na construção da narrativa. Salienta-se que pretendemos construir uma narrativa que aposta no rigor científico, apesar da linguagem que se pretende simples. Rigor que passa pela linguagem cuidada, pela coerência e pela fidelidade às utilizadas fontes primárias e secundárias. Uma parte do *corpus* do trabalho é constituída por textos referentes a fontes primárias. Só desta forma parece ser possível promover uma aproximação entre os professores e o desenvolvimento do conceito de entropia, o que poderá ter efeitos no interesse dos alunos pelo mesmo. Ainda incluída nas orientações metodológicas do «Romance da Entropia», surge a discussão em torno das «pseudohistórias», preocupação actual de alguns defensores da introdução da História da Ciência no ensino. Pois se há uns anos atrás a aposta era de utilizar a História da Ciência, hoje, existe a preocupação do rigor com que esta é utilizada.

---

Tentaremos clarificar que a nossa narrativa não constitui uma pseudohistória e que o termo «Romance» surge com o significado que Whitehead lhe dava.

A segunda parte do trabalho desenvolve a narrativa histórica com valor pedagógico de título «Romance da Entropia». Para esta chamamos uma particular atenção por pretender ser um romance como outro qualquer, sendo que não existe um par romântico, mas sim um conceito científico, como personagem principal. Julgamos que a mesma poderá despertar um novo interesse pela Física, através da exploração de alguns espantosos e imaginativos estudos realizados ao longo dos séculos. Além da máquina perpétua de Carnot e do demónio de Maxwell também farão parte desta história argumentos como o de Lorde Kelvin de que o Universo terminaria com uma terrível morte térmica, ou perplexidades vividas, como as de Rumford e Mayer. O Conde de Rumford ficou perplexo ao perceber, enquanto supervisionava uma fábrica de canhões, que a fricção de dois metais originava «calor» sem limite. Mayer ficou perplexo ao fazer uma sangria num doente e perceber que o sangue, num clima tropical, é mais vermelho do que na Europa.

A grande expectativa deste trabalho baseia-se na esperança de que o «Romance da Entropia» represente um contributo para um ensino das leis da termodinâmica com significado, sentido e interesse.



**1ª Parte**

**Problemática**

**e**

**Desenvolvimento  
metodológico**



## Capítulo 1 – Introdução

Nesta primeira parte do trabalho, há quatro capítulos que se seguem. O primeiro e o segundo tratam da problemática que conduziu a uma investigação histórica e que culminou com a construção do «Romance da Entropia».

O primeiro desenvolve quatro perspectivas de ensino, salientando o apelo à História da Ciência. Para tal, serão essenciais vários autores dos quais se destacam, Praia, Garcia, Piaget e Pérez.

O segundo capítulo é dedicado à utilização da História da Ciência no ensino, focando as vantagens de tal via. Far-se-á, ainda neste capítulo, uma análise sucinta de alguns manuais escolares, como forma de investigar acerca da utilização da História da Ciência no ensino, em Portugal. Para este capítulo serão essenciais autores como Mathews, Wang e Marsh, Solbes, Traver e Solomon.

O terceiro e o quarto capítulo tratam da metodologia da narrativa que consta na segunda parte; o «Romance da Entropia».

No terceiro capítulo salienta-se a escolha pessoal pela História da Ciência, assim como a importância da narrativa. Serão, também, descritas as orientações metodológicas do «Romance da Entropia» e os objectivos do mesmo. Para o mesmo, Bruner e Kubli serão essenciais.

O último capítulo discute a diferença entre história e pseudohistória, explorando o valor do «Romance da Entropia», colocando em evidência o significado do termo «Romance». Allchin e Whitehead serão essenciais como apoio para a sua construção.





## Capítulo 2 – Reflexão sobre o ensino e a aprendizagem da ciência

“Matéria de fácil entendimento são os efeitos do mel, do vinho, do heléboro, do cautério e do corte. Saber, porém, como, para quem e quando devemos aplicar estas coisas como remédios não é menor empresa do que a de ser médico.” (O sublinhado é da nossa responsabilidade).

Aristóteles<sup>1</sup>

### 2.1. A Didáctica das Ciências no século XX

Segundo uma investigação efectuada por Solbes e Traver (1996), a ideia que os alunos possuem da ciência corresponde a uma imagem deformada da actividade científica:

... os questionários dos alunos revelam como o ensino habitual (...) lhes transmite uma imagem deformada da actividade científica, já que a maioria dos alunos (...) ignora o papel fundamental do trabalho científico como resolução de problemas mediante a investigação de hipóteses e a criação de conceitos, assim como a forma de modificar os paradigmas conceptuais, assumindo uma visão empirista, basicamente formalista e cumulativa da ciência e do seu crescimento. (p.110)

Deveríamos acrescentar a esta citação que o trabalho científico não tem como único papel a resolução de problemas, mas essencialmente, a sua elaboração. Com efeito, a emergência de um problema é já o resultado de um encontro da mente questionadora com os factos científicos. Ao longo da narrativa desenvolvida na segunda parte deste trabalho, ter-se-á a oportunidade de seguir um pouco de um percurso histórico onde os problemas se vão construindo e resolvendo.

Uma vez que a imagem da ciência é formada, em grande parte, nas salas de aula e atendendo à possível imagem deformada que os alunos possuem da mesma, a preocupação em torno do ensino das ciências é cada vez maior. É urgente o alerta de que este processo deve visar muito mais do que a mera transmissão de fórmulas e de leis. Assim, os esforços dos investigadores em Didáctica das Ciências, ou utilizando a equivalência de Praia (2004,

---

<sup>1</sup> Citado por Bruner (2000, p. 71)

p.1), dos investigadores em Educação em Ciência, reúnem-se no sentido de estudar as vantagens e as desvantagens de diferentes formas de ensinar e de aprender. À partida, parece razoável supor que, no que às temáticas científicas diz respeito, o grande desafio do professor deverá ser o de proporcionar uma visão mais alargada da sua disciplina, sendo capaz de desenvolver um sentido íntimo do poder e da beleza das ideias. Um ensino deste género deverá assentar na reflexão em torno da natureza da ciência e sua importância na sociedade, implicando uma relação com outras áreas, como a Filosofia, a História e a Sociologia.

As investigações sobre a Educação em Ciências proliferam desde as últimas décadas do século XX. No entanto, segundo Praia (2004, p. 20), Gabel afirma no prólogo de *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* que “desde 1927 têm sido publicados trabalhos e resumos sobre a investigação realizada no campo do ensino e aprendizagem das ciências.”

A Didáctica das Ciências cresceu de acordo com os estudos em torno do desenvolvimento cognitivo do ser humano. Segundo Garcia e Piaget (1987, pp.241), “Existe continuidade no desenvolvimento do sistema cognitivo, desde a criança até aos homens da ciência, passando pelo adulto «normal» (não sofisticado pela ciência).” Para os dois autores, quando se adquire conhecimento novo, aquele que já existia não desaparece, mas acomoda-se às novidades. Desta perspectiva, a criança, alvo de uma educação científica, não é vista como alguém que não possui qualquer conhecimento ou que terá que esquecer as suas concepções tidas como alternativas. É vista como alguém que possui conhecimento mas que terá que o adequar ao novo que lhe irá chegar através da escola. Garcia e Piaget (1987, pp.242), salientam, no entanto que, a passagem de uma estrutura cognitiva para outra mais recente implica uma descontinuidade, embora esta não se revele merecedora de preocupação. Citando os dois autores, “... as reestruturações não constituem saltos no vazio: elas respondem a uma lógica interna...” (1987, pp.242). Garcia e Piaget (1987, pp.243), defendem, ainda, que tal adaptação de estruturas é realizada de forma inconsciente pelo ser humano e sempre contínua. Atendendo a que uma estrutura mais avançada se acomoda à que já existe, os autores defendem que, para uma melhor apreensão do conhecimento científico, dever-se-á tomar consciência do conhecimento que o antecedeu e que pode ser tomado como pré-científico. Citando Garcia e Piaget (1987, pp.243), “a fonte de todo o conhecimento deve ser procurada avançando até ao nível das

noções.” Os dois autores retiraram as anteriores ilações da análise das concepções de alguns cientistas, ao longo da história. Pérez (1993), realça a importância da análise das concepções alternativas dos alunos, justificando, com base nos estudos de Piaget que:

Existe uma certa semelhança entre os esquemas alternativos dos alunos em alguns campos e concepções históricas que foram abandonadas pelos conhecimentos hoje aceites pela comunidade científica (...) Sem pretender estabelecer um paralelismo mecânico entre as concepções alternativas dos alunos e as pré-científicas, parece razoável supor que esta semelhança não pode ser accidental, mas sim o resultado de uma forma também similar de abordar os problemas... (p.201).

Garcia (1983) demonstra alguma preocupação face a mal-entendidos respeitantes à investigação sobre a relação entre a psicogénese e a História das Ciências. Entre estes, Garcia destaca a complexidade inerente aos possíveis paralelos existentes entre concepções do passado e concepções alternativas dos alunos. O autor expõe o assunto da seguinte forma:

... Podemos mostrar que no século XIV Buridan ou Oresme explicaram o movimento de um móvel envolvendo o conceito de “força” o que tem semelhanças impressionantes com conceitos envolvidos em respostas dadas por alunos em certas situações experimentais. O facto de se encontrar uma resposta semelhante na história à que é dada pelas crianças não tem significado epistemológico, a menos que alguém esteja em posição de inferir o *porquê* de encontrarmos uma resposta na história e o mesmo tipo de resposta durante o desenvolvimento da criança, isto é, a menos que alguém seja capaz de mostrar a relevância epistemológica da analogia.

Um segundo tipo de mal-entendido (...) corresponde à ideia de que a procura de inter-relações é uma tentativa de mostrar que as crianças recapitulam o que aconteceu na história da ciência. Isto novamente é muito difícil de sustentar e tal, por si mesmo, tem pouco interesse epistemológico.

(...) É um sério mal-entendido do método psicogenético e de todo o propósito de considerar a psicogénese e a história da ciência juntas a partir da perspectiva epistemológica, isto é, com o objectivo de explicar como é que o processo do desenvolvimento cognitivo ocorre.

Deve lembrar-se que Piaget não começou o seu trabalho com crianças porque estava interessado na psicologia da criança por si mesma. Ele começou o seu trabalho com crianças porque procurava respostas para alguns problemas epistemológicos fundamentais e descobriu que era possível explorá-los em maior profundidade nos primeiros estádios do desenvolvimento. O seu objectivo não era descrever simplesmente em detalhe o que as crianças fazem ou não em cada idade, mas antes explorar os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento cognitivo... (pp. 4, 5)

Em relação ao desenvolvimento das estruturas cognitivas do ser humano, Garcia e Piaget (1987, pp. 243), chamam a atenção para o facto do contexto social em que um sujeito está inserido também contribuir para a construção do conhecimento. Os mesmos formulam uma curiosa questão; “Se a influência da sociedade é tão grande, como é possível que em todos os períodos da história da humanidade e em todas as crianças de qualquer

grupo social e de qualquer país encontremos em acção os mesmos processos cognitivos?” (1987, p.244). Segundo Garcia e Piaget (1987, p.244), a influência da sociedade não afecta os mecanismos cognitivos da criança. O papel da sociedade é, de acordo com estes autores, realçado apenas no sentido de chamar a atenção para um determinado objecto em detrimento de outro ou de situar o objecto num determinado contexto que, em diferente sociedade e situação cultural poderia estar situado noutra contexto.

Os trabalhos de Garcia e Piaget, assim como de outros estudiosos sobre a psicogénese do conhecimento humano, contribuíram para o desenvolvimento da Didáctica das Ciências. Consequentemente, diferentes formas de ensinar surgiram, como potenciais medidas para colmatar os problemas associados ao ensino, entre os quais se encontra a desmotivação dos alunos.

## **2.2. Do ensino por descoberta ao construtivismo**

Pérez (1993), Cachapuz, Jorge, e Praia (2001), apresentam quatro perspectivas de ensino, que têm vindo a ser desenvolvidas ao longo dos anos, nomeadamente:

Ensino por descoberta. Esta perspectiva de ensino centra-se na convicção de que o aluno aprende por si mesmo, a partir de descobertas feitas ao acaso. Citando Cachapuz et al. (2001, p. 11), “O ensino por descoberta parte da convicção de que os alunos aprendem, por conta própria, qualquer conteúdo científico a partir da observação (...) tais factos estão ali, falam por si e basta olhá-los com atenção.

Segundo Pérez (1993, p.198), o ensino por descoberta foi desenvolvido e colocado em prática nas décadas de 60 e 70 do século XX, tendo como intuito uma aproximação entre a aprendizagem das ciências e o desenvolvimento do trabalho científico. Segundo o mesmo autor, as muitas análises efectuadas a este modo de ensino, declararam-no como um fracasso, tanto a nível de aquisição de conhecimentos, como a nível da aproximação à construção da ciência. A nível da aquisição de conhecimentos, o sucesso não poderia ser o desejado, já que, sem a orientação de um professor, a árdua tarefa de distinguir o que é importante do que é acessório, ou o que é correcto do que não é, não seria possível. O conhecimento do modo como a ciência se constrói também ficaria muito lesado no ensino por descoberta, uma vez que a mesma não retrata o processo de fazer ciência. Os factos

científicos não se descobrem, mas constroem-se, lenta e sinuosamente, ao longo de um processo em que muitas questões são colocadas e das muitas respostas propostas, umas vingam e outras são abandonadas.

Apesar das fraquezas acima assinaladas deste modo de ensino, na opinião de Pérez, esta tentativa valeu pela mudança e abriu portas a novas práticas de ensino; "... a orientação de aprendizagem por descoberta presumia um estudo sistemático de renovação curricular que rompia com uma estabilidade de muitas décadas e iniciava um processo de transformação em que seguimos hoje imersos, sem que os objectivos de aproximar a actividade dos alunos às características do trabalho científico e, sobretudo de gerar atitudes positivas em relação à ciência e à sua aprendizagem, tenham perdido a sua vigência." (1993, p.199).

Ensino por transmissão. Os princípios desta perspectiva de ensino estão centrados no professor, ignorando o importante pressuposto de Garcia e Piaget de que o conhecimento é construído tendo em conta as estruturas que já existem. Citando Praia (2004, p.22) acerca do ensino por transmissão, "Assente, quase exclusivamente na acumulação de informações e factos, essencialmente provenientes da exposição oral do professor." Na opinião de Pérez, este modo de ensino pode ser visto, de certa forma, como um regresso ao ensino mais tradicional, centrado, essencialmente na transmissão de conhecimentos do professor para o aluno. Quanto ao seu surgimento, o autor defende que o ensino por transmissão "... desenvolveu-se como uma reacção frente ao de descoberta..." (1993, p.199). Para Pérez, uma vez que esta perspectiva de ensino se apresenta quase como o revés do ensino por descoberta e tendo este último sido considerado um fracasso, o ensino por transmissão pode ter surgido como forma de o contrariar. Na mesma linha de pensamento, Ausubel, citado por Pérez (1993, p.199), considera que o ensino por transmissão pode ter surgido como uma resposta para "a falta de capacidade da maioria dos alunos para descobrir autonomamente tudo o que devem saber." Ausubel, estima o papel do professor como de grande importância para a aquisição de conhecimento, na medida em que ajuda os alunos a reunirem e apreenderem de forma mais organizada os novos conceitos. No ensino por descoberta, a ausência deste guia pode levar a "aquisições dispersas que proporcionam as «descobertas» acidentais do trabalho autónomo." (Pérez 1993, p.199). Segundo Pérez (1993, p.199), Ausubel compara, ainda, o ensino por transmissão à forma como os cientistas levam a cabo os seus estudos. Para estes, também é

imperativa a presença de alguém mais experiente com quem discutir os seus estudos, ou até, que dirija a investigação. Com esta comparação, Ausubel pretende mostrar que os cientistas não desenvolvem os seus trabalhos autonomamente ou por descoberta accidental. Assim, o modo de ensino por transmissão, apesar de parecer mais primitivo, estará mais próximo da forma como a ciência se desenvolve do que o ensino por descoberta.

A via de ensino por transmissão, não será, no entanto, a que melhor se enquadra nos propósitos de ensinar a ciência, dando a conhecer o modo como um conceito científico surge, se desenvolve e se relaciona com o meio que o envolve. Na opinião de Pérez (1993, p.199), há contradições evidentes entre o modelo do ensino por transmissão e a natureza do trabalho científico. Há que notar que, neste tipo de ensino, os alunos não são levados a construir o conhecimento, apenas se pretende que assimilem os conceitos já elaborados e que o professor apresenta. Este processo está longe de acolher a integração dos novos conceitos nas estruturas conceptuais dos alunos que pressupõem a existência de um conhecimento prévio. Citando Pérez (1993),

Se é verdade, como defende Ausubel, que a verdadeira assimilação de conceitos exige um processo activo de relação, diferenciação e reconciliação integradora com os conceitos pertinentes que já existiam, não está nada claro que um ensino por transmissão de conhecimentos «no seu estado final» favoreça tal actividade. (p.199).

Desta forma, este tipo de ensino não parece ser o mais correcto, ou pelo menos, o mais completo para a exploração da natureza da ciência e motivação dos alunos. Citando Cachapuz et al. (2001, p.8), “As “matérias” constituem-se num fim em si mesmo, como algo de verdade absoluta, em que o conhecimento científico é considerado como sempre certo e inquestionável.” Pérez (1993), apresenta a opinião de alguns autores em relação a este tipo de ensino de que,

o modelo de aprendizagem por recepção não só se mostrava incapaz de alcançar uma apropriação dos conceitos realmente significativa, como contribuía para visões deformadas e empobrecidas adquiridas pelos alunos sobre o trabalho científico e que são responsáveis, em grande medida, pelas atitudes negativas face à ciência e à sua aprendizagem. (P. 200).

Após as tentativas menos conseguidas das perspectivas de ensino por descoberta e por transmissão (ou recepção, considerando o ponto de vista dos alunos) e na posse do conhecimento das fraquezas de tais modos de ensino, teria que se seguir em frente e avançar com novas ideias sobre o difícil processo do ensino-aprendizagem das ciências.

Considerando as anteriores perspectivas por este prisma, de modo algum se poderão considerar como um desperdício de tempo, mas prestar-lhes a justa homenagem por terem aberto o caminho a novos panoramas de ensino. Citando Pérez (1993):

Os resultados proporcionados pelos modelos de aprendizagem por descoberta e por recepção significativa não constituíram simples perdas de tempo e de esforços. Agora tinha-se uma visão mais clara das dificuldades (...) O esforço a fazer dirigia as atenções para as analogias entre a actividade dos cientistas e a dos alunos, fazendo convergir as descobertas da psicologia da aprendizagem e as contribuições da filosofia e da história das ciências contemporâneas.” (p. 200, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Ensino por mudança conceptual. Esta perspectiva de ensino pretende levar a que os alunos compreendam os motivos que estão na base da substituição de um conceito por outro. Citando Cachapuz et al. (2001):

Do que se trata agora é de contribuir para mudar os conceitos, de procurar compreender algumas das dificuldades que tal mudança exige e de referir eventuais estratégias de ensino para ajudar os alunos a levar a cabo tal mudança. (p.19).

Esta prática de ensino que não descarta as concepções alternativas dos alunos parece ser uma forma mais desejável de envolver os estudantes no mundo da ciência e poderá conseguir resultados positivos a nível afectivo e cognitivo. A nível afectivo, o facto de não se ignorarem ou rotularem de erradas as concepções alternativas, poderá contribuir para minimizar alguns sentimentos de inferioridade dos alunos face ao mundo da ciência. Citando Cachapuz et al. (2001):

Sabemos hoje que as concepções alternativas são erros constitutivos do saber, são uma consequência inevitável de um limite humano. Por isso há que ter consciência da sua presença, há que passar por elas para as poder ultrapassar. (p. 28, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Concordando com os autores, não se pode deixar de salientar o caso de Sadi Carnot. Trata-se de um engenheiro francês, cujos estudos sobre o calor são famosos até aos dias de hoje. Dignos de uma extraordinária imaginação revelam grandes verdades, no entanto, o que importa de momento sublinhar é o facto dos mesmos terem sido baseados na ideia do calórico. Apesar de acreditar que o calor era uma substância material, Carnot construiu uma teia de raciocínios aceites até hoje. As concepções alternativas têm estado presentes no



desenvolvimento do próprio conhecimento científico e a tomada de consciência de tal, por parte dos alunos, torná-los-á, certamente, mais confiantes.

A nível cognitivo, os alunos terão a oportunidade de construir o seu próprio conhecimento. A construção é realizada a partir da compreensão dos motivos que levaram à troca de um conceito por outro diferente, considerado mais correcto. Citando Praia (2004):

O aluno apresenta-se como um sujeito cognitivamente activo, um sujeito em construção que se auto-regula e auto-transforma à medida que (re)organiza e amplia a sua estrutura cognitiva, função do confronto entre as suas ideias e os conceitos científicos, confronto esse capaz de gerar a pretendida mudança conceptual. (p. 23).

Pérez (1993, p.200), reflecte a opinião de alguns autores de que esta orientação construtivista, representa o produto de um “consenso emergente do ensino das ciências” e de que “foi considerada como a contribuição mais relevante das últimas décadas neste campo.” O autor apresenta um resumo elaborado por Resnick acerca das características essenciais da via construtivista, visada na perspectiva de ensino por mudança conceptual. O resumo de Resnick assenta em três princípios, nomeadamente:

- Quem aprende constrói significados. Não reproduzem simplesmente o que lêem ou o que se lhes ensina.
- Compreender algo supõe estabelecer relações (...) Os fragmentos de informação sem relações são esquecidos ou tornam-se inacessíveis na memória.
- Toda a aprendizagem depende de conhecimentos prévios. (p. 200)

Esta orientação parece conseguir unir diversos estudos efectuados no domínio da epistemologia das ciências, apontando, desde logo, para um possível sucesso, ao ser posto em prática. Citando Pérez (1993):

Esta coerência básica dos resultados de investigações inicialmente independentes reforçou, sem dúvida, o valor das concepções construtivistas sobre o ensino/aprendizagem das ciências e permitiu a emergência de um amplo consenso (...) O velho objectivo de aproximar as actividades de aprendizagem às da construção dos conhecimentos científicos, recuperou assim uma nova força, apoiado numa melhor compreensão da natureza da ciência e numa sólida fundamentação teórica. (p. 200).

Tal orientação, possuidora, à partida, de tantas vantagens para o processo de ensino-aprendizagem das ciências deveria ser posta em prática, o que foi possível através da perspectiva de ensino por mudança conceptual. Segundo Pérez (1993, p.201), este modo de ensino pressupõe as três fases seguintes:

- Uma fase de eliciação das concepções dos alunos (fazendo aparecer o carácter plausível e frutífero que as mesmas têm nos contextos utilizados pelos alunos).
- Uma fase de reestruturação, com a criação de conflitos cognitivos que gerem a insatisfação com as concepções manifestadas e preparem para a introdução dos conceitos científicos; e
- Uma fase de aplicação que proporcione oportunidades aos alunos para usar as novas ideias em diferentes contextos.

Na opinião de Pérez, a maior limitação da perspectiva de ensino por mudança conceptual prende-se com a insuficiente atenção que tem sido prestada à forma de raciocínio dos alunos, associado às suas concepções alternativas. Tal preocupação surge na linha de investigação de Piaget, anteriormente mencionada, segundo a qual o novo conhecimento é adequado ao que já existe. O primeiro passo a dar em direcção a um maior sucesso nas aulas de ciências poderia ser, eventualmente, a análise, por parte do professor, dos erros dos alunos. Normalmente e devido a diversos factores, tais como a falta de tempo ou a insegurança do professor, as respostas erradas não são devidamente analisadas. Destacam-se, apenas, as respostas certas, mostrando qual deverá ser o procedimento sempre que uma questão análoga surja. É importante que os professores não se esqueçam que as mentes dos alunos não estão despovoadas de informação e que, normalmente, a resposta errada tem a sua razão de existir. Só assim se conseguirá identificar a causa da não compreensão de um conceito e agir de forma a superar o obstáculo que impede o aluno de obter um maior «sucesso» escolar. Neto (2002) apresenta uma citação de Bachelard que talvez traduza o primeiro passo que um professor deveria dar em relação ao aluno que errou. Veja-se a passagem de Bachelard:

Na educação, a noção de obstáculo pedagógico é realmente desprezada. Muitas vezes me tenho impressionado com o facto de os professores de ciência, mais ainda, se possível, do

que os outros, não compreenderem que não se compreenda. Muito poucos são aqueles que investigaram a psicologia do erro, da ignorância e da irreflexão (...) Não reflectiram no facto de que o adolescente chega à aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos (...) Um educador não tem o sentido do fracasso precisamente porque se julga um mestre. Quem ensina comanda. (p. 4).

Mas como agir de forma a que o aluno troque as concepções pré-científicas pelas científicas? Não se julgue que este processo é simples e que depende apenas da boa vontade dos professores. Pérez (1993, p.202), reflecte a opinião de vários autores de que as concepções pré-científicas "... só podiam ser abandonadas graças a uma nova metodologia que combinava a criatividade do pensamento divergente com rigor na contrastação das hipóteses, mediante experiências em condições controladas e a busca de coerência global..." Pérez refere-se, também à dificuldade de todo este processo; "Historicamente, essa troca conceptual e metodológica não foi, em absoluto, fácil e é lógico pensar que o mesmo ocorrerá com os estudantes..." (1993, p.202). Esta visão conduziu à convicção de que os alunos só superarão as suas concepções alternativas desde que entrem em contacto com situações que lhes exijam a aquisição de novas metodologias. Destas, Pérez (1993, p.202), destaca situações de construção de hipóteses, delineação de experiências, ao que se segue a sua realização e análise de resultados. Segundo o autor, esta será a melhor forma dos alunos superarem "... a sua metodologia espontânea de senso comum, ao mesmo tempo que se produzem as profundas mudanças metodológicas exigidas pela construção do conhecimento científico." (1993, p.202)

Para colocar em prática os requisitos anteriores, o ensino por mudança conceptual terá que suportar muito mais do que a mera substituição de conceitos científicos. Segundo Pérez (1993), tais requisitos,

... implicam uma primeira crítica das estratégias de ensino orientadas para produzir trocas conceptuais (...) estas estratégias parecem pôr quase exclusivamente a tónica na modificação de ideias (...) um dos defeitos do ensino das ciências repetidamente denunciado tem sido o de estar centrado quase exclusivamente nos conhecimentos declarativos (nos «que») descuidando os procedimentais (os «como»)... (p. 202).

Resta resumir as estratégias de ensino por mudança conceptual, para então discutir as possíveis vantagens e desvantagens. Citando Pérez (1993),

A sequência que propõem as estratégias de ensino baseadas na mudança conceptual consiste (...) em trazer à luz as ideias dos alunos, favorecendo a sua formulação (...), para

depois criar conflitos que as ponham em questão e introduzir as concepções científicas, cuja maior capacidade explicativa torna possível a mudança conceptual. (p. 202).

Esta perspectiva de ensino, em que o aluno vai construindo, de forma consciente, o seu próprio conhecimento, parece ser mais favorável à aprendizagem das ciências do que as perspectivas anteriormente citadas. No entanto, na opinião de Pérez (1993, p.202), as estratégias pressupostas por este tipo de ensino, além dos frutuozos resultados que podem gerar, provavelmente também criarão situações menos desejadas. Citando Pérez (1993):

É certo que esta estratégia pode, pontualmente, dar resultados muito positivos ao chamar a atenção sobre o peso de certas ideias de senso comum, assumidas como evidências, mas também é certo, que praticada de forma reiterada, produz uma inibição e um retrocesso muito compreensíveis. Com efeito, que sentido tem, fazer com que os alunos explicitem (...) as suas ideias para em seguida serem questionadas? Como não ver nisto um artifício que se opõe à situação de construção de conhecimento? Essa construção nunca se planeia para questionar ideias, para provocar mudanças conceptuais, mas sim, para resolver problemas de interesse para os investigadores (quer dizer, neste caso para os alunos...). Nesse processo, as concepções iniciais poderão ser sujeitas a mudanças e inclusivamente, ainda que mais raramente, serem questionadas radicalmente, mas esse nunca será o objectivo, mas sim (...) a resolução de problemas ... (pp. 202, 203, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Para Pérez, o inconveniente de tal perspectiva de ensino, prende-se com o facto de, para a construção do conhecimento, os alunos terem como objectivo o abandono de determinados conceitos ao invés do seu alvo ser a resolução de um dado problema. Segundo Bachelard, citado por Pérez (1993, p.203), “Todo o conhecimento é a resposta a uma questão.” Na verdade, as ideias dos alunos precisam de ser acarinhadas, caso contrário, pode cair-se no não desejado retrocesso assinalado por Pérez.

Como forma de tentar superar as dificuldades encontradas neste tipo de ensino, foram pensadas algumas alterações ao modelo. Nomeadamente, proporcionar a aprendizagem através do “tratamento de situações problemáticas abertas que os alunos considerem do seu interesse.” (Pérez, 1993, p.203). Através deste método, o objecto de ensino deixa de ser a substituição de conceitos, para passar a ser a resolução de um problema. Durante o processo, os alunos deixam de estar envolvidos no conflito entre as suas ideias e as dos cientistas, sendo que as mesmas passam a ser vistas como hipóteses que podem não ser as mais plausíveis para dar resposta ao problema, seguindo-se uma busca de novos pressupostos. Esta nova perspectiva de ensino, que surge na sequência do ensino por troca conceptual, tem o nome de ensino por pesquisa.

Ensino por pesquisa. Como anteriormente se referiu, esta perspectiva pressupõe que variados problemas, de preferência, relacionados com a sociedade e que sejam importantes

para quem aprende, se discutam na sala de aula. Citando Cachapuz et al (2001, p 45): “Os problemas amplamente discutidos na aula nascem de problemáticas mais abertas, com raízes ou incidência sociais fortes, que a pouco e pouco se vão delimitando e preparando para o exercício de pesquisa partilhada, quer intragrupal, quer intergruppal.” Cachapuz et al (2001, p 47), chamam a atenção para o facto de que, para que os objectivos presumidos neste modo de ensino sejam cumpridos, é necessário fazer cumprir algumas exigências, nomeadamente;

- A existência de uma inter e intradisciplinaridade que acabe com a visão de que existem vários mundos, cada um gerido por uma disciplina diferente.
- Abordagem de situações-problema do quotidiano, que levem os alunos a reflectir sobre as relações entre a ciência, a sociedade e a tecnologia. Espera-se que deste modo os alunos se tornem adultos mais responsáveis, conseguindo tomar decisões conscientes.
- Pluralismo metodológico a nível de estratégia de trabalho. No ensino por pesquisa pretende-se que os alunos desenvolvam tarefas diferentes das habituais.

Esta perspectiva, ao contrário do ensino por descoberta, conta com o comando de alguém (professor) entendido na investigação que está a ser levada a cabo. Não se pense, porém, que esta característica do ensino por investigação o torna semelhante à perspectiva de ensino por transmissão. Citando Pérez (1993):

... entre a metáfora do aluno como simples receptor, (...) a um «investigador» autónomo, propomos a metáfora do «investigador inexperiente» que integra também coerentemente as contribuições de Vygotsky sobre a «zona de desenvolvimento potencial» e o papel do adulto na aprendizagem. (pp. 204, 205).

Vygotsky realça o papel de um orientador (professor) no desenvolvimento intelectual do ser humano, algo que o ensino por descoberta não contempla. Este autor, acolhe o desenvolvimento cognitivo da criança em algo a que chama de zona de desenvolvimento próximo, o qual, segundo Neto (2003, p.4), Bruner denomina de zona de desenvolvimento potencial. Neto (2003), apresenta a definição de Vygotsky para a zona de desenvolvimento próximo através da seguinte citação do autor:

A zona do desenvolvimento próximo é a distância entre o nível real de desenvolvimento (da criança), determinado pela sua capacidade de resolver um problema

autonomamente, e o nível de desenvolvimento potencial, determinado através da resolução de um problema sob a orientação de um adulto ou em colaboração com um colega mais competente. (p. 4).

Para Vygotsky, a criança cresce intelectualmente a partir da passagem da aprendizagem com outros para a aprendizagem individual. O processo só é possível sob a orientação de um professor. Citando Neto (2003, p.4), acerca da perspectiva de desenvolvimento intelectual da criança de Vygotsky: "... transformação de um processo interpessoal (social) em intrapessoal (cognitivo e metacognitivo), sob a influência crucial dos adultos, nomeadamente do professor." Ao investigar um tema, sob a orientação do professor, como é suposto no ensino por pesquisa, o aluno encontra-se na zona de desenvolvimento próximo de Vygotsky. Citando Pérez (1993, p.204),

A proposta de organizar a aprendizagem dos alunos como uma construção de conhecimentos manifesta (...) uma investigação dirigida, em domínios perfeitamente conhecidos pelo «director de investigações» (professor) e na qual os resultados parciais, embrionários, obtidos pelos alunos, podem ser reforçados, matizados ou postos em questão através dos resultados obtidos pelos cientistas (...) Não se trata, pois de «enganar» os alunos, de fazê-los crer que os conhecimentos se constroem com a aparente facilidade com que eles os adquiriram, mas sim de colocá-los numa situação pela qual os cientistas habitualmente passam durante a sua formação (...), abordando problemas conhecidos por quem dirige os seus trabalhos. (p. 204).

Isquierdo (1996, pp. 8, 9) caracteriza este modo de ensino como um olhar para a ciência na forma de "pergunta e resposta". Citando Isquierdo (1996):

A nova metáfora é a de «ciência como pergunta e resposta» e portanto é mais um diálogo sobre o mundo do que um livro já acabado; requer olhar as coisas directamente e pensar sobre elas mediante teorias (...) para chegar, isso sim, à formação de uma trama de ideias coerente, que permita actuar no mundo dos fenómenos e que possa colocar-se por escrito, finalmente. Esta nova metáfora, ao colocar o acento no «diálogo significativo» requer, antes de mais, curiosidade, motivação (...), imaginação e disciplina (...) e sobretudo, um mundo de fenómenos sobre o que pensar e actuar. (p. 8).

Daqui pode decorrer a seguinte questão: Como formar professores com estas sensibilidades e capacidades?

Consideramos que a História da Ciência pode ser um instrumento muito importante no desenvolvimento dessas capacidades. Em relação aos alunos, uma aproximação à História da Ciência permite desenvolver uma ideia mais equilibrada da ciência. Citando Pedrinaci (1996):

A história da ciência é (...) um recurso didático de primeira magnitude. Que melhor forma haverá de entender como se constrói a ciência do que analisar alguns casos históricos da gestação das teorias? Que melhor forma haverá de valorizar o que são e significam as teorias do que analisar algumas controvérsias históricas ou reflectir sobre a potencialidade explicativa que oferecem diversas teorias que afectam um mesmo campo de saber? Que melhor forma haverá de evitar uma visão dogmática e acabada da ciência do que analisar como se vão substituindo umas teorias às outras, como todas as explicações são efémeras? (...) A Epistemologia e a história da ciência, (...) ajudam-nos a decidir quais os conteúdos que convém trabalhar e em que ordem, ou a prever algumas das dificuldades ou obstáculos que encontram os nossos alunos e alunas, ao mesmo tempo que podem orientar acerca do modo de superar tais dificuldades. (pp. 4, 5).

Assim, a nossa questão passa a ser; como formar um professor para que seja um bom utilizador da História da Ciência?

Do nosso ponto de vista e pela nossa experiência, não será por transmissão, mas sim, pela via da investigação.

### **2.3. A importância do professor no ensino construtivista**

Resta lembrar que, relativamente às duas últimas perspectivas de ensino mencionadas e que merecem toda a atenção, por parecerem solucionar muitos dos problemas do ensino das ciências, algumas questões se levantam. Pérez (1993, 203), dá a conhecer algumas destas questões, que tão bem reflectem a preocupação de professores e investigadores face a esta visão construtivista do ensino. Nomeadamente, “Até que ponto não se trata de uma proposta utópica?” Esta talvez seja a maior preocupação que se coloca face a um ensino que tão longínquo se encontra daquele que se baseia na transmissão de conhecimentos do professor para o aluno, enraizado por tantos e tantos anos. Não obstante, apesar das muitas dúvidas que se levantam, tudo parece indicar que se caminha no bom sentido, já que os antigos modos de ensino não pareciam satisfazer professores, alunos e investigadores. Citando Pérez (1993, p.204), em relação à opinião de vários autores:

... a ideia de aproximar o trabalho dos alunos às características do trabalho científico atrai hoje um consenso crescente, fruto da convergência das ideias construtivistas e do aprofundamento das implicações da história e da filosofia das ciências no ensino das ciências. (p. 204).

Claro que a concretização da via construtivista não é fácil, pela exigência da mudança, dos conhecimentos e da criatividade. Citando Pérez (1993, p.209), “Como exigir a um professor ou professora todos os conhecimentos que esta orientação de ensino demanda?” Claro que não seria justo pedir a um professor que, solitariamente desenvolvesse todo o trabalho necessário para o funcionamento deste tipo de ensino. Na opinião de Pérez (1993, p.209), seria pedir aos professores que possuíssem um “conjunto de saberes que, com toda a certeza, ultrapassam as possibilidades de um ser humano.” Como solução, Pérez defende que o trabalho exigido por esta perspectiva de ensino seja colectivo, trabalho este, que compreende todo o processo, “desde a preparação das aulas até à avaliação.” No mesmo sentido, Isquierdo (1996, p.7), defende que se deveria dar mais tempo para investigação a estes professores. Na sua opinião, os mesmos, além de serem transmissores do conhecimento já elaborado, deverão também criar o conhecimento científico que se desenvolve nas aulas, de forma a proporcionar uma formação científica adequada à população. Ao mesmo tempo, deverão proporcionar bases que permitem olhar para a ciência de uma forma diferente.

Um professor deverá, ainda, ser consciente de que a falta de conhecimentos é a condição normal de qualquer ser. Desta forma, devem ter sempre em mente que as ideias não científicas dos alunos também, um dia, povoaram as suas mentes e até, talvez, as dos cientistas. É essencial que transmitam tais sentimentos aos alunos, de forma a produzirem um reforço positivo a nível emocional. Bruner (2000), presta a sua homenagem a Robert Karplus, “uma figura fulcral no movimento de reforma curricular das décadas de 60 e 70.” Segundo Bruner, Karplus:

... sabia o que era sentir «não saber», o que era ser principiante. Por temperamento e por princípio sabia que não saber era a condição crónica não só do estudante, mas do verdadeiro cientista. Foi isso que fez dele um professor autêntico. O que ele sabia é que a ciência não é algo que exista na natureza, mas uma ferramenta ínsita na mente do conhecedor- professor ou estudante. Conseguir saber algo é uma aventura que consiste em dar conta, do modo mais simples e elegante possível, de uma multidão de coisas que se nos deparam. (p. 157).

Finalmente, considera-se que a principal tarefa do professor é a de guiar cada aluno da melhor forma para que este consiga desenvolver saberes verdadeiramente formativos. O grande desafio é o de saber qual é a melhor forma de guiar os alunos. Esta dificuldade faz-nos lembrar o seguinte comentário de Aristóteles, citado por Bruner (2000):



Matéria de fácil entendimento são os efeitos do mel, do vinho, do heléboro, do cautério e do corte. Saber, porém, como, para quem e quando devemos aplicar estas coisas como remédios não é menor empresa do que a de ser médico. (p. 71, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

## Capítulo 3 – O ensino da Física e a História da Ciência

“A história, examinando a vida e a época dos cientistas, humaniza os assuntos da ciência, tornando-a menos abstracta e mais atractiva para os alunos.”

Mathews<sup>1</sup>

### 3.1. O que a História da Ciência pode fazer pelos alunos de Física

No capítulo anterior considerámos que a História da Ciência poderá ser um instrumento importante no desenvolvimento de sensibilidades e capacidades essenciais ao professor que gere um ensino construtivista. Neste ponto, salientar-se-ão possíveis vantagens da utilização da História das Ciências no ensino, ilustrando-as, sempre que oportuno, com alusões à história da entropia.

Actualmente, os programas curriculares do 3º ciclo e do ensino secundário pressupõem que o ensinamento das ciências seja sustentado através da relação entre a Ciência a Sociedade e a Tecnologia (CTS). Esta dinâmica do ensino das ciências está de acordo com a perspectiva construtivista, na qual se encaixa o ensino por pesquisa, atrás descrito. A nova abordagem ao temido mundo científico tem em vista uma ágil preparação dos alunos como cidadãos conscientes e preparados para a vida em sociedade. Talvez esta seja, de facto, a melhor forma de enredar os alunos na grande aventura da aprendizagem das ciências, tantas vezes por eles dramatizada. Os intentos são os melhores e certamente que os resultados são compensadores, resta questionar acerca da melhor forma de o fazer.

Muitos são os defensores de que a utilização da História da Ciência no ensino é imprescindível para levar a cabo uma educação unificadora dos mundos científico, social e cultural. Wang e Marsh (2002, p. 171) consideram que a História da Ciência assenta na relação entre a ciência e a sociedade, fornecendo aos estudantes muito mais do que o mero conhecimento académico. Quando se conta uma história, há inúmeros detalhes que não podem faltar, tais como, a contextualização histórica e social. Ignorando tais descrições, o autor não cede ao seu leitor o prazer de se sentir quase como um dos personagens da história, como é suposto em qualquer bom romance ou livro de aventuras. Da mesma

---

<sup>1</sup> Citado por Wang e Marsh (2002, p178)



forma, também uma narrativa que retrate a evolução da ciência deve conter certos pormenores descritivos da situação social e cultural da época. Só assim se poderão compreender as motivações que levaram a que um cientista enveredasse por um determinado estudo. Tome-se como exemplo a contextualização social efectuada na narrativa apresentada neste trabalho, de modo a dar a conhecer os motivos que levaram à construção da máquina a vapor e qual o impacto que esta máquina teve na sociedade. A este propósito, Wang e Marsh (2002, p. 173), referem-se a um trabalho de Mendelsohn et al., onde se afirma que, “a história da ciência engloba a informação acerca de como os cientistas, tanto como investigadores como membros da sociedade, interactuaram com o discurso científico, com a sociedade e com o governo.” Por outro lado, Solbes e Traver (2003), consideram que entre a História da Ciência e a abordagem CTS há muitos pontos em comum. Citando os autores:

Pensamos que há várias relações entre a história da ciência e CTS visto que se tratam de dois tópicos de investigação num amplo terreno comum: história da ciência externa (ou social) ou, noutras palavras, relações CTS ao longo da história. (p. 705).

Vista desta perspectiva, a História da Ciência parece ser o meio ideal para levar a cabo a nova proposta curricular, em que os estudantes devem adquirir conhecimento científico aliado a uma rampa de acesso aos problemas da sociedade, que os poderá munir de uma série de ferramentas úteis para o exercício da cidadania. Wang e Marsh (2002), expressam a opinião do cientista James Conant de que

uma vez que se espera que todos os cidadãos possuam opiniões sobre as relações entre o governo, a educação, e as questões da investigação científica e o seu desenvolvimento; é imperativo que uma apreciação das complexidades da ciência e da sociedade faça parte da educação tanto dos cientistas como dos não cientistas. (p. 173).

O uso da História da Ciência no ensino parece, ainda, combater ou pelo menos minimizar, a imagem menos favorável que os alunos possuem da ciência e até mesmo dos cientistas. Apesar da importância da ciência, muitos são os alunos que ousam dizer que não entendem o motivo da aprendizagem de tais disciplinas. Desta expressão tão corriqueira nas salas de aula nada mais pode advir senão o extremo desinteresse da maioria dos alunos face ao estudo das ciências. Para Solbes e Traver (2003), a não inclusão da História da

Ciência no ensino é a grande responsável pela falta de interesse dos educandos. Citando os autores,

... a falta de interesse nos alunos e as suas atitudes de rara apreciação em relação ao estudo da ciência podem dever-se, em parte, àquela visão não histórica no ensino das ciências habitual (...) Devemos modificar essa imagem através de uma apresentação precisa de vários aspectos retirados da história da ciência e introduzir o modo como o conhecimento científico é construído, em que contextos históricos e sociais certas teorias surgiram e que influências tiveram no próprio ambiente social.” (p. 715)

Em relação aos cientistas do passado (e aqui talvez os físicos ganhem um papel de destaque), quase que são vistos como mitos. Einstein encabeça a lista dos cientistas estereotipados, tantas vezes descrito como uma figura de cabelo em pé, cuja inteligência fora do normal lhe permitia, rapidamente, descobrir fórmulas mágicas explicativas dos mais belos segredos do mundo. Este retrato dos cientistas é também a marca do distanciamento que os alunos fazem em relação aos mesmos. Os primeiros são imaginados como possuidores de uma inteligência que vai além da dos comuns dos mortais, cujos raciocínios complicados são inatingíveis para a maioria dos estudantes. Este distanciamento em relação aos cientistas poderá constituir um perigoso bloqueamento emocional em relação ao estudo das ciências. Citando Solbes e Traver (1996, p.111), em relação à utilização da História da Ciência no ensino, “Pode apresentar-se a ciência como uma construção humana, colectiva, fruto do trabalho de muitas pessoas, para evitar a ideia de uma ciência feita basicamente por génios, na sua maioria homens.”

A História da Ciência parece ser uma via adequada para passar a mensagem, aos alunos, de que a Física não é mais do que o resultado do esforço de pessoas como eles próprios. Muitas vezes, os estudantes possuem ideias que são consideradas de senso comum (e portanto erradas) e que após as primeiras aulas lhes são desmentidas e substituídas por outras, por vezes opostas. Tem que se convir que por vezes ser estudante é uma tarefa quase frustrante, na medida em que se sente que a visão que se tem do mundo não corresponde à que é considerada como a correcta. Simultaneamente, o conhecimento superficial de «génios» como Einstein, levam a sentimentos de inferioridade por parte dos alunos e a certezas de que a Física não é uma disciplina acessível às suas mentes. Tal desânimo é muitas vezes responsável pelo desinteresse e conseqüente insucesso nesta disciplina. Aos professores compete uma função igualmente complicada. Deles é esperado que promovam sucessivas revoluções científicas nas mentes dos estudantes, entendendo-se

como revolução a substituição de ideias interiorizadas ao longo de muitos anos por outras diferentes e muitas vezes totalmente opostas. Não pense o mais otimista educador que para a consecução da sua tarefa, apenas terá que informar o aluno de que antigas ideias que sempre os acompanharam terão que ser substituídas por outras diferentes, visto as últimas serem consideradas como as certas e as primeiras como as erradas. Esta substituição de ideias «erradas» por outras «correctas» poderá reforçar a convicção dos alunos de que os «génios» cientistas que ditavam ideias opostas às suas nunca se enganavam e que eles jamais atingirão tais saberes complicados.

A urgência em alterar algo no ensino das ciências é óbvia, mas uma vez mais se coloca a questão; qual será a melhor forma de o fazer? Talvez a grande resposta resida no facto dos alunos conhecerem os cientistas apenas superficialmente. Se soubessem um pouco mais das suas histórias e das vicissitudes que tiveram que ultrapassar ao longo dos seus estudos, certamente que os jovens aprendizes se sentiriam muito mais confiantes. Citando Wang e Marsh (2002, p. 173), “humanizar a ciência através da vinheta histórica irá enriquecer as experiências de aprendizagem da ciência associando as experiências individuais com as figuras científicas”.

A necessidade de explorar com os alunos alguns aspectos relacionados com a natureza da ciência está a sensibilizar os responsáveis pela elaboração dos currículos e algo parece começar a mudar. Citando Pedrinaci (1996):

As reformas educativas levadas a cabo nas últimas décadas nos países ocidentais têm incorporado no currículo da educação científica aspectos relacionados com o conhecimento da natureza da ciência. A origem desta tendência vem da contestação de que os estudantes têm uma visão dogmática e estereotipada da ciência e dos cientistas, assim como da ideia de que conhecer as ciências mesmo nos níveis básicos, deve implicar ter algumas noções acerca do modo como os cientistas geraram as teorias, das limitações que estas possuem ou da inevitável influência social que afecta o processo da construção científica (...) também influenciou o convencimento de que a aprendizagem científica deve conter valores educativos, éticos e humanos que vão além do conhecimento da produção científica.(p. 4).

Segundo Caamaño (1996), a exploração de questões relacionadas com a construção da ciência já faz parte dos planos curriculares de vários países. Entre os exemplos de Caamaño destaca-se o dos planos curriculares de Inglaterra, Gales e Irlanda do Norte postos em prática em 1989. Os objectivos relacionados com a natureza da ciência aparecem expostos da seguinte forma:

Os estudantes têm que desenvolver um conhecimento e uma compreensão das formas em que as ideias científicas mudam ao longo do tempo e de como a natureza destas ideias e a sua utilização vem condicionada pelos contextos culturais, éticos e sociais nos quais se desenvolvem ... (p. 44).

Segundo Caamaño (1996, p. 47), o estudo da natureza do conhecimento científico fornece aos alunos a oportunidade de:

- Estudar as ideias e teorias utilizadas noutras épocas para explicar os fenómenos naturais.
- Valorizar a evidência experimental de que se dispõe, relativa a estas ideias e teorias.
- Dar-se conta de como se relaciona o desenvolvimento de um conceito científico ou teoria com o contexto histórico e cultural da época em que surge.
- Estudar exemplos de controvérsias científicas e a forma como estas ajudaram ao progresso científico.
- Relacionar as ideias e teorias científicas de outras épocas com o conhecimento científico e tecnológico actuais...

A História da Ciência parece conseguir transmitir alguns elementos essenciais à apreensão do conhecimento científico. Citando Carvalho e Vannucchi (2000), numa opinião de Matthews:

Há duas formas de considerar a introdução da História e Filosofia da Ciência nos currículos de ciência em termos de conteúdo: a história e filosofia da ciência como *elementos que ajudarão a compreender os conceitos das teorias científicas* ou como *elementos inerentes à própria ciência*, uma vez que um conhecimento bem fundamentado da ciência implica necessariamente um conhecimento da sua história.(p. 428).

Carvalho e Vannucchi (2000), alertam para os perigos em que um ensino sem referência à História da Ciência incorre. Segundo os autores,

Ignorando os aspectos históricos e filosóficos da ciência, geramos uma visão pré-conceituada da actividade científica; uma visão baseada em conceitos empírico-indutivos – uma ciência sendo composta por verdades inquestionáveis. Esta postura rígida e intolerante nega, ou pelo menos subestima, a criatividade inerente ao trabalho científico, criando obstáculos invencíveis ao ensino da ciência. (p. 428).

Em suma, a História da Ciência parece ser a via mais aconselhável para construir uma ideia da ciência, tão bem descrita por Lakatos, citado por Ana Luísa Janeira (1985),

... a ciência cresce porque cria, avança devido aos factos novos que descobre, e actua assim com base num encadeamento sem uma única teoria monopolizadora nem um processo repetitivo preponderante, mas onde várias teorias proliferam a qualquer instante. (p. 292).

Carvalho e Vannucchi (2000) revelam, também, a preocupação de que, pela não inclusão da História da Ciência nos currículos, os alunos revelam lacunas em determinadas competências que deveriam ser essenciais.

Os estudantes não estão preparados para examinar factos segundo diferentes pontos de vista; não estão prevenidos para a provável diversidade de opiniões; não questionam o propósito da investigação científica; não são levados a comparar os seus pontos de vista com os dos outros estudantes... (p. 428).

Koumaras e Seroglou, (2001, p.155) resumem em três categorias o que, de acordo com os mesmos, traduzem os objectivos do ensino da Física. É de grande interesse o conhecimento e análise de tal categorização, visto a mesma vir de encontro às possíveis vantagens do uso da História da Ciência no ensino, anteriormente referidas. As categorias são as seguintes: cognitiva, metacognitiva e emocional (ou afectiva). Os mesmos autores explicam que a primeira categoria diz respeito ao ensino e aprendizagem dos conteúdos de Física, à perícia de resolução de problemas e às ideias alternativas dos alunos (2001, p.155). A segunda categoria relaciona-se com a aproximação ao modo como a ciência se constrói e com as inter-relações entre a ciência e a sociedade (2001, p.156). Na terceira dimensão, os autores incluem os esforços dos investigadores da educação em Física, no sentido de criarem métodos que motivem os alunos para o estudo desta disciplina. (2001, p.157).

Para os dois autores, a utilização da História da Ciência no ensino proporciona o cumprimento dos três domínios considerados imprescindíveis à aprendizagem das ciências, citados anteriormente. No domínio cognitivo, a apresentação de casos históricos na sala de aula pode ser muito benéfico. De acordo com Wang e Marsh (2002, p. 174), a informação histórica relativa ao desenvolvimento do conhecimento científico “revela como uma nova ideia substitui uma antiga e como as duas ideias podem entrar em conflito uma com a outra.” O contacto com a História poderá ajudar o professor a aproximar-se das ideias dos

alunos. De acordo com Wandersee, citando por Koumaras e Seroglou (2001, p.161), “... o professor, comparando as ideias científicas correntes com as históricas na sala de aula, ajuda os seus alunos a superar as suas ideias alternativas e a aceitarem as ideias científicas correntes.” Griffiths & Barry, numa citação de Wang e Marsh (2002, p176), consideram que no que diz respeito a uma abordagem histórica da ciência, “Os estudantes através desta abordagem são capazes de reconhecer os seus próprios mal-entendidos conceptuais.” A título de exemplo, pode pensar-se no conceito de calor que, sendo extremamente vago, é muitas vezes pensado em termos de uma substância material. Também esta era uma certeza defendida por ilustres cientistas, tais como Lavoisier ou Carnot. A narrativa construída neste trabalho tentará colocar em evidência o processo de conceptualização daquilo que inicialmente começou por ser designado como calor. Ao mesmo tempo, explorar-se-ão os motivos que inviabilizaram o seu entendimento como uma substância material.

No domínio metacognitivo, a utilização da História da Ciência na sala de aula também parece ser altamente benéfica para os alunos. Uma aproximação à história de um conceito científico permite uma aproximação ao modo como o mesmo é construído e, desta forma, à sua natureza. Segundo Wang e Marsh (2002, p177), o ensino baseado na História da Ciência permite que os alunos se sintam mais próximos do mundo científico, ao conhecerem os factores que “motivaram ou inspiraram um cientista a sacrificar anos de vida e dedicar-se à investigação científica.” Como exemplo sugere-se o envolvimento de Mayer no desenvolvimento do conceito de energia através de uma perplexidade vivida enquanto desempenhava a profissão de médico, para a qual se havia formado.

A História da Ciência é, também, o meio mais apropriado para ilustrar as inter-relações entre a ciência e a sociedade, visadas nesta categoria. Citando Wang e Marsh (2002):

... a história da ciência engloba a informação acerca de como os cientistas tanto como investigadores como membros da sociedade, interactuaram com o discurso científico, a sociedade e o governo. Além do mais, a forma como o progresso científico influenciou o público é intensamente retratada na história da ciência... (p. 173).

Koumaras e Seroglou (2001, p.163), dividem as inter-relações entre a ciência e a sociedade em quatro vertentes, nomeadamente, a democrática, a utilitária, a cultural e a moral. A vertente democrática diz respeito à maturidade com que o indivíduo, como ser inserido numa sociedade, discute problemas e exprime opiniões conscientes. Através da



História da Ciência, pode dar-se a conhecer algumas das discussões postas em marcha pelos cientistas, ao longo dos tempos. Koumaras e Seroglou (2001, p.164) expressam a opinião de Bybee et al. de que, através da tomada do conhecimento de tais discussões os alunos “deverão ficar informados acerca dos mesmos de modo a que fiquem capazes de expressar as suas opiniões pessoais...”

A vertente utilitária refere-se à evolução da tecnologia, que Koumaras e Seroglou (2001, p.164), exemplificam com a descoberta e evolução do telefone, tão indispensável nos dias de hoje. Através da História da Ciência, os alunos ficarão inteirados de como, quando e pelas mãos de quem é que a tecnologia foi avançando. Nesta vertente, a História da Ciência parece cumprir o papel de proporcionar o estudo das relações entre a Ciência, a Sociedade e a Tecnologia (CTS).

Em relação à vertente cultural, Koumaras e Seroglou (2001, p.164), referem que desde 1960, várias sugestões foram documentadas no sentido de reconhecer a Física como uma parte da cultura da humanidade. Os autores salientam que as teorias de Copérnico e de Galileu ajudaram a entender a posição que o ser humano tem no Universo. Estas, juntamente com a teoria de Newton de que as mesmas leis regulam o céu e a Terra e com a Teoria da Relatividade, “foram consideradas como elementos fundamentais de cultura.” Claro que, mais uma vez, é indispensável o conhecimento histórico de tais teorias para que as mesmas sejam entendidas como elementos culturais. A história da evolução científica também permite, a nível cultural, o reconhecimento de que a ciência é feita por pessoas de todos os países do mundo sem excepção e de ambos os sexos. Citando Wang e Marsh (2002):

A história da ciência retrata o papel dos modelos de diferentes culturas tais como da China, do Egipto, de Inglaterra, de França, da Grécia, da Alemanha, da Itália e do Japão (...) Além disso, os trabalhos de cientistas femininas (...) apresentam a possibilidade das mulheres poderem ser bem sucedidas no campo da ciência. (p. 179).

Outra perspectiva é a de Erwin Schrödinger, citado por Stuewer (1998, p.24), de que lamenta a “tendência para esquecer que toda a ciência é limitada pela cultura humana em geral, e que as descobertas científicas, mesmo aquelas que parecem mais avançadas e esotéricas e difíceis de compreender, não têm sentido sem o seu contexto cultural.”

Quanto à última vertente, a moral, a História da Ciência será o meio mais indicado para mostrar de que forma o avanço científico pode contribuir para fazer o bem ou

provocar a destruição global do Universo. A este respeito, Koumaras e Seroglou (2001, p.164), apresentam o exemplo da bomba atômica usada durante a Segunda Guerra Mundial e que “fez os cientistas enfrentarem a sua responsabilidade moral.” É necessário frisar que as questões relacionadas com o “bem” e o “mal” são extremamente relativas. No entanto, o mote será adequado para, pelo menos, gerar a discussão na sala de aula sobre assuntos do foro da Física. Ainda dentro desta vertente, Wang e Marsh (2002, p178), salientam as tantas vezes que os cientistas têm que voltar atrás nas suas investigações e “... reflectir sobre o modo como a sua ciência pode ajudar a melhorar a economia ou a sociedade.” Esta forma de olhar a ciência leva a relações entre este mundo e o político, pois a investigação científica terá que ter um apoio financeiro para poder avançar nas suas investigações. Citando Stuewer (1998),

A ciência é a força mais poderosa e penetrante afectando os continentes do mundo de hoje – afectando a saúde económica, a estabilidade política e a vitalidade cultural. Mas a força é exercida em ambas as direcções; os físicos dependem do apoio governamental para as suas pesquisas e subsistência. (p. 24).

Falta, apenas, salientar a importância do uso da História da Ciência na sala de aula no domínio afectivo. Segundo Koumaras e Seroglou (2001, p.165), nas décadas de 60 e 70 do século XX, sugeriu-se que os estudantes ficavam mais motivados para o estudo da Física sempre que a abordagem à disciplina era feita a partir da apresentação e discussão de eventos históricos acerca da evolução da ciência. Solbes e Traver (2003, p.706), realizam a opinião anterior, enfatizando a influência positiva da História da Ciência, a nível emocional, da seguinte forma:

... acreditamos que é apropriado introduzir alguns aspectos da história da ciência no ensino (...) de forma a que os alunos entendam melhor como é que a ciência funciona, como é construída e como é desenvolvida e quais são as repercussões sociais das descobertas científicas. Consequentemente pensamos que o foco histórico gerará uma atitude positiva em relação ao conhecimento científico. Esta atitude irá a seu tempo melhorar a atmosfera nas nossas salas de aula e irá aumentar o interesse dos nossos alunos em participarem no processo de ensino e de aprendizagem... (p. 706).

Koumaras e Seroglou (2001, p.153), defendem, também, a utilização da História da Ciência, expressando a opinião de Nielsen e Thomson de que o uso da História da Ciência no ensino da Física muda a atitude dos estudantes face ao estudo desta disciplina. Na base de tal convicção encontra-se um currículo baseado num ensino “que já não é centrado nos

conteúdos de física mas na apresentação da física como uma actividade humana.” De facto, parece ser este o grande triunfo da História da Ciência aplicada ao ensino. A abertura a uma nova visão sobre os cientistas poderá derrotar a imagem estereotipada que deles se tem. Desta nova visão destaca-se a exploração das motivações pessoais que levam os cientistas a tomar determinadas decisões, a relação entre os cientistas ou mesmo, pequenas curiosidades acerca das suas personalidades. A aproximação entre «génios» e o comum ser humano, contribui para uma maior motivação frente ao estudo das ciências. Citando Wang e Marsh (2002, p177), “A abordagem pela história da ciência pode estimular os interesses dos alunos e atitudes positivas em relação à ciência, a qual no final pode unir o “buraco” entre cientistas e não-cientistas...” Através da História da Ciência os cientistas poderão deixar de ser meras personagens míticas para passarem a pertencer ao mundo dos estudantes. Segundo Wang e Marsh (2002, p178), a este respeito, Matthews terá concluído que, “A história, examinando a vida e a época dos cientistas, humaniza os assuntos da ciência, tornando-a menos abstracta e mais atractiva para os alunos.”

Deve, ainda, salientar-se que a utilização da história da ciência, na sala de aula, pode abrir caminho a actividades diferentes das habituais e mais motivadoras para os alunos. Citando Carvalho e Vannucchi (2000, p.427), “A história e a filosofia da ciência são consideradas, no mínimo, como assuntos que fornecem ideias para actividades que os alunos considerem interessantes e /ou problemáticas.”

Matthews (1994) resume os benefícios do uso da História da Ciência no ensino através da lista que se segue e que sumaria as vantagens anteriormente referidas. O autor considera que a História da Ciência aliada ao ensino ajuda a:

- Entender melhor os conceitos científicos e os métodos;
- Relacionar o desenvolvimento do pensamento individual com o desenvolvimento das ideias científicas;
- Entender a «validade cultural-individual»;
- Compreender a natureza da ciência;
- Impedir o cientismo e o dogmatismo (comum na educação científica);
- Humanizar os conteúdos científicos, reduzindo o formalismo...;
- ... Entender que «a ciência é falível e não fornece verdades absolutas»;

- As teorias científicas podem ser entendidas se o seu desenvolvimento histórico for entendido.

Como forma de concluir a apresentação do rol de vantagens da utilização da História da Ciência no ensino, optou-se por uma frase de Mortimer e Carvalho, citada por Carvalho e Vannucchi (2000) que parece reunir os benefícios de seguir tal via. Segundo os autores:

... entendemos que aprender ciência [e aprender acerca da ciência] envolve levar jovens a pensarem e explicarem o mundo natural de diferentes formas; torná-los familiarizados, com maior ou menor extensão, com as práticas da comunidade científica, com os seus objectivos particulares, e a sua forma particular de entender e explicar as coisas. (p. 442).

O «Romance da Entropia» surge como algo que tenta ir ao encontro destas vantagens. Surge como algo que poderá levar ao entendimento de que a ciência é falível e não favorece verdades absolutas, que se vai construindo a partir de um encontro espantoso entre factos precisos e um pensamento imaginativo. Trata-se de uma narrativa histórica, com valor pedagógico, sobre o conceito de entropia.

### **3.2. Resultados da utilização da História da Ciência no ensino**

Exploradas as possíveis vantagens de um ensino baseado na História da Ciência, resta frisar que Solbes e Traver (2001, pp.157, 158), apresentam o resultado de um estudo realizado, em que se compararam as reacções de alunos que estudaram Física e Química através da História da Ciência e de alunos que seguiram o ensino tradicional. Segundo os dois autores, os alunos que seguiram a via da História da Ciência;

- Demonstraram ter uma maior compreensão de que a actividade científica e o surgimento dos conceitos científicos são fruto da criação dos cientistas e não uma descoberta.
- Demonstraram ter entendido que a compreensão do formalismo matemático não é a maior prioridade para o entendimento da Física e da Química.

- Ficaram com uma visão muito diferente da evolução da ciência, conseguindo enumerar crises que surgiram durante a evolução da ciência, tais como, controvérsias entre cientistas.
- Mostraram ser conhecedores de vários cientistas e dos trabalhos que os mesmos levaram a cabo.
- Mostraram desenvolver uma maior sensibilidade para a relação entre a ciência e a sociedade, nomeadamente, no que diz respeito à repercussão social do avanço da ciência e aos problemas que geram um trabalho científico.

Os mesmos autores (2001, p.158), referem, ainda, que os alunos sujeitos a um ensino das ciências baseado na história, revelaram uma grande satisfação em terem seguido tal via. Os estudos parecem, ainda, apontar que também ao nível afectivo, a História das Ciências tem efeitos positivos. Segundo Solbes e Traver (2001, p. 158), tais alunos ficaram mais interessados em “... conhecer aspectos como o processo de criação da ciência, biografias de cientistas e relações CTS...” Apesar de não se poder afirmar que a atitude dos alunos muda radicalmente face ao estudo das ciências, Solbes e Traver (2001, p. 158), afirmam que, “... a incorporação das actividades de conteúdo histórico nas aulas de Física e Química é um factor que contribui para criar um bom ambiente de trabalho na aula e aumenta a participação e o interesse dos alunos.” Ainda que a História da Ciência não opere todos os milagres desejados por professores e alunos, talvez possa ajudar o processo do ensino e aprendizagem das ciências.

As vantagens da História da Ciência parecem estar explicitadas. A questão que agora se levanta e que transporta consigo alguma preocupação é a de saber que história da ciência é utilizada no ensino? Nos pontos que se seguem, tentar-se-á discutir algo acerca da utilização da História das ciências no ensino. Focar-se-ão, também, alguns pontos que retratam uma má utilização da História da Ciência, contrastando, sempre que possível, com a narrativa «Romance da entropia».

### 3.3. Aplicação da História da Ciência no ensino

As questões que agora se colocam e que parecem ser as mais pertinentes são as seguintes:

- Como é que se poderá colocar em prática a utilização da História da Ciência no ensino?
- Será que a História da Ciência é utilizada no ensino em Portugal e, caso seja, será que o é da forma mais adequada?

A aplicação didáctica da História das Ciências pode fazer-se na sala de aula e através dos manuais escolares.

Existem textos que se poderão constituir como recursos pedagógicos importantes. É o caso da obra de Galileu, “O Diálogo sobre os dois maiores Sistemas do Mundo”. Numa tentativa de mostrar que o movimento da Terra não era a heresia que tantos afirmavam, Galileu escreveu um livro cheio de imaginação, em que a defesa das suas ideias e raciocínios era dada a conhecer através de um diálogo entre três personagens. Por um lado, no decurso de toda a obra, são várias as alusões a antigos modos de pensar e à evolução de alguns conceitos como o de movimento e repouso, ao longo dos séculos. Através da grande problemática posta em questão (movimento da Terra) as ideias de inércia e da relatividade dos movimentos foram-se desenrolando. Esta obra histórica pode ser utilizada no ensino da Física aquando da abordagem à lei da inércia, dando pertinência e significado a uma ideia tão afastada do mundo da experiência. A sua utilização poderá ser feita, por exemplo, através da análise ou dramatização de excertos escolhidos pelo professor. Existem hoje muitos textos que poderão vir a tornar-se instrumentos pedagógicos na utilização da História da Ciência na sala de aula. Mas para que os mesmos se tornem verdadeiros instrumentos pedagógicos, muito trabalho há a fazer sobre eles. O estudo presente caracteriza este tipo de trabalho.

De acordo com a perspectiva construtivista, os alunos deverão ser confrontados com situações problemáticas sobre a ciência para, em seguida, debaterem tais temas, na sala de aula. Para o efeito, poder-se-ão escolher excertos de obras históricas que se considerem de maior interesse e analisá-los com os alunos, não descurando as repercussões sociais e culturais dos estudos neles evidenciados. Citando Carvalho e Vannucchi (2000, p.429):

“... as discussões histórico-filosóficas podem ser introduzidas na sala de aula através de discussões acerca de momentos controversos na história da ciência. Desta forma, as questões filosóficas podem ser apresentadas aos alunos na forma de situações problemáticas.” A partir de tais discussões, poder-se-á tirar partido de uma maior aproximação dos estudantes aos problemas dos cientistas, através do conhecimento dos percursos sinuosos atravessados por estes e dos motivos que levaram a abandonar certas teorias em favor de outras diferentes. Desta aproximação, poderá nascer o entendimento de que certas ideias que pareciam fazer sentido, afinal, poderão ser substituídas por outras mais apropriadas. Segundo Suárez (1996), a opinião de Pedrinaci a propósito da discussão de situações controversas ao longo da história é a seguinte:

O seu estudo... tem um grande interesse didático já que ilustra sobre como aparecem as teorias, os condicionantes epistemológicos e sociológicos da resistência da comunidade científica a aceitá-las, assim como da sua posterior aceitação e persistência, até que são superadas por outras com maior poder explicativo; tudo isto facilita a relativização do conhecimento científico e ajuda a superar posições dogmáticas perante a ciência. (p. 64).

De entre as controvérsias históricas que fazem parte da História da Ciência, Suárez (1996, p. 64), destaca como um tema adequado a abordar na sala de aula, a controvérsia relativa à idade da Terra. A mesma, baseia-se nos cálculos de William Thomson e de Charles Darwin sobre a idade da Terra. Para o primeiro, este planeta teria cerca de 98 milhões de anos, enquanto que para o segundo, a Terra contaria com uma idade de, aproximadamente, 300 milhões de anos. Suárez (1996) destaca os principais motivos que o levam a defender esta controvérsia como de grande interesse didático:

- A variedade de teorias que estiveram implicadas na controvérsia, ajudando no processo de aprendizagem das mesmas.
- A multidisciplinaridade implicada, destacando-se as disciplinas de geologia, biologia, física, química e astronomia.
- A contextualização e a argumentação baseada na religião até aos meados do século XVIII e a contextualização e argumentação baseada em estudo geológicos e geofísicos do início do século XX. Esta contextualização oferece a oportunidade de abordar as relações entre a ciência, a religião, a sociedade e a tecnologia.

- A urgência sentida pela comunidade científica da época em resolver o problema da idade da Terra, de forma a que se resolvessem outras questões que com esta controvérsia se relacionavam.
  - O entendimento da ciência como uma construção humana e, assim, sujeita às condicionantes humanas, como, a altivez, o dogmatismo e a intransigência...”
- (p. 64)

Para colocar em prática a discussão de uma controvérsia histórica, na sala de aula, Suárez (1996, pp. 65, 66), propõe que, numa primeira fase, a mesma seja apresentada através de um texto que relate as visões, com os respectivos argumentos, sobre a idade da Terra, ao longo dos séculos. Numa segunda fase, lançam-se questões relativas ao problema visado na controvérsia. Suárez apresenta os seguintes exemplos: “Que idade tem a Terra? Achas que se pode calcular? Como?” Por último, várias discussões deverão surgir, relacionadas com as teorias implicadas na controvérsia. O professor poderá, ainda, fornecer textos históricos com informação adicional sobre o problema em causa e a situação social da época em que a controvérsia foi vivida.

A difícil tarefa de trocar um conceito por outro, parece ter maior sucesso quando realizada desta forma, do que quando é efectuada pelo professor, através de um ensino por transmissão. Citando Carvalho e Vannucchi (2000, p.429), “Nestas situações de diálogo as ideias dos estudantes são modificadas, eles reconhecem a necessidade de as reformular e formular novos conceitos.” Também neste sentido se realça o valor do «Romance da Entropia». A leitura desta narrativa permitirá o contacto com a controvérsia vivida entre Joule e William Thomson. Para o primeiro, o calor transformava-se em trabalho. Enquanto que para o segundo, o calor era transferido e mantinha o seu valor constante. Afinal, o calor transformava-se ou o calor transferia-se? (Romance da Entropia, p. 185).

Uma outra questão a considerar e a ter em conta aquando da selecção dos conteúdos a tratar historicamente, prende-se com a melhor altura para pôr em prática o ensino através da história, na sala de aula. Segundo Suárez (1996, p.63), Jiménez Alexandre e Fernández defendem três possibilidades, nomeadamente: “como fio condutor da sequência de aprendizagem, como introdução motivadora e como apresentação de descobertas ou investigações concretas.” Por outro lado, Suárez (1996, p.63), refere que Pedrinaci “... faz



referência à sua utilização como uma fonte para a colocação de problemas.” (O sublinhado é da nossa responsabilidade).

Como forma de ilustrar as linhas anteriores, julga-se que um tema apropriado para tais discussões poderia ser o surgimento da máquina a vapor e a análise dos estudos efectuados a partir de tal máquina. Além da compreensão do calor como energia interna, frutuosas seriam também as discussões sobre as relações entre a ciência, a sociedade e a tecnologia. A máquina a vapor é um engenhoso meio para mostrar como os problemas da sociedade estão inter-relacionados com o avanço da tecnologia. Um problema de mineiros levou à invenção desta máquina que acabou por fazer crescer a sociedade, com as consequentes repercussões culturais e políticas. Por outro lado, a máquina a vapor esteve na origem de grandes estudos científicos, demolindo a ideia que tantas vezes se tem de que a tecnologia apenas avança com o ímpeto da ciência. Neste caso, talvez tenha sido ao contrário, a tecnologia fez interessar a ciência por outro tipo de problemas. A curiosidade sobre o fluxo do calor, na máquina a vapor, levou a que novas questões se levantassem e a busca de respostas levou a uma evolução da ciência que abriu caminho à palavra entropia. Carvalho e Vannucchi (2000), apresentam os resultados de estudos efectuados por diversos autores que demonstram algumas ideias erradas que tanto alunos como professores possuem sobre a relação entre a ciência e a tecnologia. Uma discussão histórica sobre a máquina a vapor, anteriormente referenciada, poderá ser uma forma adequada para desfazer alguns enganos, que os autores apresentam da seguinte forma:

- Os aspectos sociais da ciência são completamente omitidos. Não há referência ao papel da comunidade científica, nem aos enganos, crenças e dilemas éticos dos investigadores.
- ... a ciência e a tecnologia são vistas como um único empreendimento ('tecno-ciência').
- A ciência é frequentemente apreendida como hierarquicamente superior à tecnologia, com a última vista como uma mera aplicação da primeira. (p. 431)

A utilização da História da Ciência na sala de aula não representa uma inovação, sendo porém, cada vez mais desejável o apelo à mesma. Citando Solbes e Traver (1996):

A história das ciências e a sua implicação no ensino das mesmas é uma linha de investigação e de inovação em educação científica com uma larga tradição. Iniciou-se na Universidade de Harvard por Conant com o estudo, por parte dos alunos (...) de «casos» históricos, baseados na análise de processos chave no desenvolvimento da ciência, com as suas implicações filosóficas, sociais, etc. (p. 103).

Há que salientar, no entanto, que pelo facto de cada vez mais se apelar à utilização da História da Ciência no ensino, não se pretende que os programas curriculares se tornem mais extensos, introduzindo novos conceitos científicos através da vinheta histórica. Pretende-se, sim, que se faça uma selecção, de entre os conteúdos que fazem parte dos programas curriculares, de modo a que alguns sejam introduzidos através da sua história. Citando Solbes e Traver (2003, p.707), “... não pretendemos aumentar os conteúdos usuais adicionando mais conceitos históricos (...) Pelo contrário, apontamos antes para a introdução de conteúdos que devem efectivamente ser pensados através de uma narrativa histórica...”

A outra forma anteriormente apontada como meio de introdução da História da Ciência no ensino diz respeito aos manuais escolares. Solbes e Traver (1996, pp.103, 104), referem que também este campo já conta com uma certa tradição na Universidade de Harvard, através da primeira edição de um livro de Holton, no ano de 1952. Não pode deixar de se mencionar o *Projecto Física*, uma obra exemplar de como a ciência pode ser abordada com base na sua história e cuja primeira publicação remonta ao ano de 1970. Em Portugal, a obra foi publicada no ano de 1980.

Os manuais escolares detêm uma importância e, conseqüentemente, uma responsabilidade muito grande no processo da aprendizagem das ciências. Segundo Stengers (1979, p.91), “Na maior parte dos casos, a unanimidade de uma comunidade humana pode explicar-se por uma disciplina, por uma obediência imposta ou livremente consentida, às ordens de uma autoridade superior.” No entanto, não é esta a situação vivida na comunidade científica. Citando Stengers (1979) em relação a esta última:

O acordo profundo dos seus membros não é fruto de coações exteriores mas pertence ao tipo particularíssimo de iniciação que precede a entrada em cada comunidade: a educação científica. O principal instrumento desta educação é, aparentemente, bem anódino, pois trata-se, segundo Kuhn, de obras pedagógicas redigidas especialmente para os estudantes por membros da comunidade, os manuais. (p.91).

Este instrumento que Stengers caracteriza de anódino, é detentor de uma grande responsabilidade, na medida em que, representa um dos principais portadores de

informação científica, nas escolas. Segundo Stengers (1979, pp.91. 92), Kuhn, sublinha a importância dos manuais escolares no ensino das ciências, alertando para o facto dos mesmos não estarem construídos de modo a que o aluno medite sobre as teorias que lhe são expostas. Para o autor, o facto dos estudantes de ciências não contactarem com textos originais, leva a que os mesmos fiquem aptos, apenas, para resolver situações através de analogias com situações anteriores e semelhantes. Tal exercício de memória e de relação entre situações, baseia-se na apreensão de regras e de leis que são expostas ao longo do manual. A principal consequência deste modo de ensino é, citando Stengers (1979, pp.95), “... que o homem da ciência já não aparece como esse intrépido explorador do desconhecido que nos ensinaram a admirar.” Como forma de evitar que os estudantes de ciências fiquem presos aos exemplos dos seus manuais, estes deveriam estar munidos com informação que conduzisse à compreensão de que existe muito mais no mundo da ciência além de fórmulas. Citando Stengers (1979):

Até à conclusão dos seus estudos, até ao momento em que, pelos seus trabalhos pessoais, deve recorrer à literatura «criadora» da especialidade que escolheu, o estudante, de um modo geral, apenas contactou com obras pedagógicas escritas especialmente em sua intenção. Ora, estes manuais não são concebidos para que o estudante seja levado a meditar sobre a relatividade do conhecimento humano e sobre a fragilidade de qualquer teoria; devem permitir-lhe aceder o mais rapidamente possível à prática da sua disciplina. É por isso que o estudante não é posto em presença de teorias ou de soluções contraditórias; quando, raramente, é feita uma alusão no seu manual à história da disciplina inculcada, é sempre na perspectiva cumulativa duma investigação de precursores e duma reconstrução do passado como lenta evolução para a visão científica contemporânea do mundo e para as soluções ensinadas no manual.” ( pp. 91, 92, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

No que diz respeito à segunda questão (Será que a História da Ciência é utilizada no ensino em Portugal e, caso seja, será que o é da forma mais adequada?), não nos compete encontrar respostas, já que não foram esses os objectivos deste trabalho. Considerámos, no entanto, importante olhar para alguns manuais escolares para que as nossas categorias de trabalho na construção da narrativa histórica tivessem uma motivação concreta e se desenvolvessem com base em contrastes emergentes a partir desta análise. Julga-se, porém, que a resposta cedida pelos manuais quanto à utilização ou não da História da Ciência nos mesmos, poderá ser um indicativo da existência da História da Ciência na sala de aula. O paralelismo poderá ser feito, na medida em que se acredita que o manual escolar é, normalmente o guia maioritário do professor. Citando Leite (2002, pp.334,335), “... se os professores tiverem tendência para seguir o manual escolar e se os autores dos manuais não

se sentirem compelidos a dar importância suficiente à história da ciência, então pouco conteúdo histórico deverá ser esperado nas aulas de ciência.”

### 3.4. Análise de alguns manuais escolares

Na sucinta análise que se segue, tentar-se-á concluir acerca da existência da História da Ciência nos manuais escolares de Física e, caso exista, de que história é que se trata. Deve ter-se em conta que não basta contar uma história, há que saber contá-la. Citando Leite (2002):

A história da ciência pode melhorar o ensino-aprendizagem da ciência mas se for usada inadequadamente pode antes distorcer as ideias dos alunos sobre a natureza da ciência e a sua inter-relação com a tecnologia, a política e a religião (...) de facto, o efeito de usar a história da ciência na educação em ciências depende maioritariamente de que história da ciência é usada e como é usada.” (p. 343, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Procedeu-se à análise de cinco manuais do 10º ano de escolaridade, uma vez que o conceito de entropia, tema em estudo, é leccionado neste ano de escolaridade. Desta análise fizeram parte os seguintes parâmetros:

1- Referência ou não à história da entropia.

2- Das informações biográficas aos elementos biográficos com valor pedagógico .

Pretende fazer-se a distinção entre os manuais que apresentam mera informação biográfica dos cientistas, como a data de nascimento e de morte, país natal e profissão e aqueles que apresentam elementos biográficos com valor pedagógico. Destes destaca-se o enquadramento histórico e social que rodeava o cientista, assim como os seus interesses pela natureza ou a tecnologia. Pode referir-se como exemplo o caso de Carnot que, nasceu e viveu em França numa época em que ainda se sentiam os efeitos da revolução francesa. Por este motivo, a máquina a vapor era algo que em França não tinha tido o mesmo desenvolvimento que nos outros países da Europa. Dominado pela curiosidade e por um encantamento em torno desta máquina, Carnot desenvolveu um estudo exaustivo sobre a mesma que levou a numerosos e importantes trabalhos ao longo dos tempos. Também o caso de Mayer é outro exemplo de como é importante dar a conhecer certas referências

como a profissão do estudioso. Este exemplo, retrata um médico que, ao descobrir com surpresa que o sangue nos trópicos era mais vermelho, desenvolveu inúmeros estudos que vieram a cair no domínio da Física. Um outro exemplo e desta feita para mostrar como a alusão ao meio familiar também é importante é o caso de William Thomson. As discussões científicas que manteve desde cedo com o seu irmão James, engenheiro, e com o seu pai, certamente que terão sido determinantes para o surgimento de muitas das questões a que se propunha encontrar uma resposta.

### 3- Apresentação clara do desenvolvimento conceptual.

É de extrema importância que o manual deixe bem claro que a construção da ciência corresponde a um processo de evolução muito lento, podendo demorar séculos. Desta evolução fazem parte o questionamento e a busca da resposta que parece ser mais conveniente. Da busca fazem parte vários avanços e retrocessos, assim como inúmeras controvérsias.

A narrativa histórica «Romance da entropia» exemplifica este ponto. A mesma, iniciar-se-á com a grande questão do conde de Rumford, “o que será o calor?” E apenas no final, tendo decorrido aproximadamente um século, se conseguirá dar uma resposta que parece ser a mais aceitável. Da aventura farão parte conceitos considerados de senso comum, como o do calórico e, quando tudo indica (através das experiências do conde) que o mesmo possa ser abandonado, haverá um retrocesso. Pretendemos, com esta narrativa, deixar bem claro que qualquer estudo científico é uma aventura com continuidade e em aberto.

### 4- Apresentação clara de que uma nova ideia corresponde ao trabalho de muitos cientistas.

### 5- Contextualização histórica, tecnológica, social, política e religiosa.

Ao longo da unidade e, à medida que se vai avançando na exploração do conceito de entropia, é importante acompanhar também a restante evolução que se fazia sentir na sociedade. As revoluções, francesa e industrial tiveram um papel de destaque no desenvolvimento do conceito de entropia, pelo que não devem ser esquecidas no manual. Afinal, foi devido à primeira que o conde supervisionou a perfuração de canhões e a

segunda foi a causa e a consequência de estudos muito importantes. Devem fazer-se alusões à alteração do modo de vida na sociedade ao longo dos tempos, reflexo do avanço da indústria. Da mesma forma, devem fazer-se menções à política, aproveitando a deixa da situação em França após a revolução. Um outro pormenor importante e até curioso é o da religião. Também este não deve ser deixado ao acaso, salientando sempre que possível que muitas das opiniões dos cientistas eram tomadas tendo por base argumentos religiosos. Salienta-se o caso de William Thomson, que recorreu à bíblia para a defesa da morte térmica do universo. Certamente esta é uma faceta que os alunos desconhecem dos cientistas e que provavelmente considerarão de grande interesse.

#### 6- Organização da história da entropia no manual.

##### 6.1- Apresentação de fotografias de cientistas e de máquinas.

No caso concreto da história da entropia é essencial o uso de imagens que mostrem a engrenagem da máquina a vapor, assim como esquemas explicativos do «trabalho» do demónio de Maxwell e da teoria cinética dos gases.

##### 6.2- Apresentação de textos originais.

Através do uso de textos escritos pelo próprio cientista, os alunos compreenderão melhor o porquê do abandono de uma via e o seguimento de outra. Ao mesmo tempo, sentir-se-ão em contacto directo com a personalidade.

##### 6.3- Tem papel de destaque ou apenas surge em anexo.

Aos manuais em análise dar-se-á a denominação de A, B, C, D e E cuja correspondência é a seguinte:

A – Caeiro, F., Costa, A. M., Costa A., & Moisão, A. (2003). *Ver + Física A 10º ano*. Lisboa: Plátano Editora.

B – Dias, F., M., L. & Rodrigues, M., M. (2003). *Física na nossa vida: Física e Química A – Física 10º ano*. Porto: Porto Editora.

C – Silva, D., M. (2003). *Desafios da Física: Física e Química – A 10º ano*. Lisboa: Lisboa Editora.

D – Ferreira, A. J., Fiolhais, C., Fiolhais, M., Paiva, J., & Ventura, G. (2003). *10 F Ciências Físico-Químicas- Física 10º ano*. Lisboa: Texto Editora.

E – Bello, A., & Caldeira, H. (2003). *Ontem e hoje: Física e Química A – Física- 10º ano*. Porto: Porto Editora.

Após a análise, considera-se que nos manuais A, D e E existe um maior recurso à História da Ciência, contemplando muitos dos pontos em análise. Nestes manuais, são fornecidas algumas informações biográficas, assim como elementos biográficos com valor pedagógico. São feitas alusões à revolução industrial e à máquina a vapor, devidamente ilustrada com imagens. Destaca-se o manual E por se considerar que é aquele que explora o tema de forma mais interessante. Salienta-se a apresentação de textos históricos originais, num anexo que as autoras intitularam de “Viagens ao passado”. Ainda neste manual, ressaltam-se as várias imagens e exemplos apelativos que surgem ao longo da unidade.

No entanto, julga-se que seria de grande utilidade um maior encadeamento histórico, sendo que a exploração da história da 2ª lei da termodinâmica surge, essencialmente, em anexo. Por outro lado, a história da entropia apresenta situações de particular interesse que não deveriam ser esquecidas. Destas se destaca a morte térmica do universo, tão atractiva por ser um problema que a todos diz respeito, ou a controvérsia respeitante à questão da segunda lei da termodinâmica não ser absoluta. Mesmo sem aprofundar o estudo da estatística, julga-se ser possível e até de grande interesse o estudo das «brincadeiras» do simpático demónio de Maxwell.

De um modo geral, os manuais escolares apresentam características que não ajudam a construir uma ideia da ciência em que:

- O conhecimento tem uma origem problemática.

A matéria aparece exposta, como um facto consumado, sem que se dê conhecimento de, pelo menos, algumas das questões que levaram à emergência de um determinado estudo. Veja-se, por exemplo, como é iniciado o estudo da segunda lei da termodinâmica no manual C:

Os fenómenos naturais ocorrem espontaneamente, num determinado sentido. Embora a 1ª lei da termodinâmica não proíba que o calor possa ser transferido, espontaneamente, de um corpo que está a temperatura mais baixa para outro que está a temperatura mais elevada, a verdade é que isto não ocorre. Também não é possível, embora a 1ª lei da termodinâmica não o proíba, que um sistema cujas partículas estão desordenadas, evolua espontaneamente para um estado em que elas fiquem ordenadas. A 2ª lei da termodinâmica, permite clarificar o sentido em que os processos espontâneos ocorrem. (p. 121).

Neste exemplo, não há qualquer alusão às questões levantadas até se poder fazer tal afirmação, nem aos interesses que levaram a tais estudos.

- O conhecimento não se constrói de forma cumulativa.

A construção do conhecimento é descrita como uma acumulação de informação legada de um cientista para outro. Não se dão a conhecer as inúmeras controvérsias que fazem parte da história e que mostram que, muitas vezes, os cientistas entram em discórdia e não aceitam trabalhos anteriores. Destaca-se a controvérsia entre Joule e Lorde Kelvin acerca da conversão do «calor».

- A imaginação científica faz parte do desenvolvimento do conhecimento científico.

Basta destacar os trabalhos de Carnot ou o demónio de Maxwell para que se valorize a imaginação dos cientistas no processo da construção da ciência. No entanto, estes casos não são mencionados nos manuais, sendo que a construção do conhecimento é revelado, normalmente, como fruto de sucessivas constatações de fenómenos. Veja-se, como exemplo, a seguinte passagem do manual A:

A constatação de que a energia se transfere espontaneamente sob a forma de calor nos corpos mais quentes para os mais frios levou Rudolf Clausius, em 1850, a enunciar aquilo que hoje é designado o postulado de Clausius da 2ª lei da termodinâmica. (P.113).

Entende-se que o termo “constatação” deveria ter sido substituído por uma pequena história da máquina reversível de Carnot, fazendo notar que a tónica é colocada na grande imaginação do cientista francês. Deve referir-se que o manual faz referência ao ciclo reversível de Carnot (p. 112), no entanto, considera-se que a forma como o assunto está exposto não deixa transparecer que se trata de uma fascinante experiência pensada.



- Não existe um método científico.

Seria de grande interesse a inclusão, nos manuais, de episódios representativos das peripécias e adversidades ocorridas ao longo dos estudos dos cientistas. É dado a entender que tudo corre sempre bem, basta perseguir umas quantas etapas exigidas pelo mundo da ciência e o conhecimento surge.

As evidências parecem ser suficientes para se poder afirmar que, o uso da História da Ciência no ensino da Física ainda fica aquém do desejado. Na opinião de Solbes e Traver (1996), a pouca utilização que ainda é feita da História da Ciência advém, em parte, da imagem da ciência que é transmitida nas universidades aos futuros professores. Segundo os autores, a ciência é transmitida como;

... uma série de leis, que se deduzem logicamente a partir de uns princípios. Não existiram nos planos de estudo universitários, até princípios dos anos 80, estudos de história da ciência que pudessem contrariar essa imagem e mostrarem a ciência como uma construção de conhecimentos para resolver problemas. (p.104)

Para Rutherford (2001, p.571), um outro motivo que contribui para o papel insignificante da História da Ciência no ensino é o facto desta não fazer parte dos conteúdos a apreender no ensino da Física. Citando Rutherford (2001, p.571), "... As autoridades do sistema escolar que estabelecem os conteúdos necessários para o currículo normalmente desconhecem o valor da história da ciência na educação científica, (...) e como tal esta não é estabelecida como um objectivo de aprendizagem."

Anteriormente focaram-se aquelas que parecem ser as vantagens e os frutos que podem ser colhidos para quem optar por fazer uma abordagem histórica ao ensino da Física. Deve, porém, frisar-se que a implementação de uma educação baseada na História da Ciência é algo muito complexo e longe de se poder realizar de um momento para o outro. Uma abordagem histórica de um assunto exige um profundo conhecimento do mesmo, que a maioria dos professores não possui. Citando Stiefel (1996):

Aplicar a história da ciência ao ensino das matérias científicas não é tarefa fácil; a falta de preparação dos professores em história e filosofia da ciência (...) contribuem para tal. Apesar dos intentos realizados, dos que dão conta as revistas de carácter didáctico e as actas de congressos, perdura ainda muito caminho a percorrer para pôr ao alcance dos alunos do ensino secundário os conceitos científicos junto do seu nicho histórico, de modo a que ambas as dimensões fiquem adequadamente iluminadas. (p.53).

Assim, a única via parece ser a do professor investigador, com mais tempo disponível para levar a cabo uma investigação histórica sobre temas da sua disciplina. Sobre estes poderá construir material de carácter histórico que possa vir a ter aplicações didácticas. Com o «Romance da Entropia» pretende contribuir-se, com ideias, para a elaboração de tais materiais, estimulando o interesse por actividades deste teor.



## Capítulo 4 – Ao encontro de saberes verdadeiramente formativos

“Drogado de saber? Gosto que o saber faça viver, cultive, gosto de fazer dele carne e casa, que ajude a beber e a comer, a caminhar lentamente, amar, morrer, por vezes renascer, gosto de dormir entre os seus lençóis, que ele não me seja exterior...”.

Michel Serres<sup>1</sup>

### 4.1. Motivações e objectivos do trabalho

Entre os vários recursos possíveis para colocar em prática a via construtivista anteriormente focada, a escolha eleita para a realização do presente trabalho recaiu sobre a História da Ciência. Mais concretamente, sobre a história do conceito de entropia. O estudo histórico efectuado teve por base vários trabalhos de historiadores da ciência e textos históricos originais. Tal estudo, originou uma narrativa a que se deu o nome de «Romance da Entropia». Este título foi inspirado por Whitehead quando ele fala das três fases do gesto educativo. A escrita do «Romance da Entropia» corresponde, no nosso processo de formação, a um estado de generalização que nos ajude a valorizar o nosso contacto com o mundo físico. A fruição permitiu a concretização da narrativa, que foi construída com rigor e precisão (ver adiante, pp. 70-72). O seu grande objectivo é o de constituir-se como um instrumento ao alcance dos professores. Alguns excertos poderão ser utilizados na sala de aula.

A opção em relação à História da Ciência, prendeu-se, principalmente, com a vontade de ter um conhecimento mais aprofundado acerca dos significados associados ao conceito de entropia e da Física em geral. Citando Stiefel (1996):

... quem ignora a história da sua própria disciplina não a conhece inteiramente: faltam-lhe as chaves interpretativas para dar sentido aos dados e teorias que estão na sua base, ignora o modo como se foram sucedendo os acontecimentos, o rosto daqueles que lhes deram forma, e as dificuldades de todo o tipo que intervêm na consolidação das ideias.

---

<sup>1</sup> Citado por Finger (1988, p. 81)

Quanto ao tema, há a salientar duas razões que levaram a que se investigasse acerca da natureza deste conceito, nomeadamente:

- Importância e interesse do conceito de entropia.
- Dificuldade do assunto.

Quanto à importância do conceito, basta lembrar que a entropia explica o porquê de um fenómeno acontecer num dado sentido e não no outro. Por outro lado, a história deste conceito permite manter constantes relações com os problemas da sociedade e com o avanço da tecnologia. A invenção da máquina a vapor, tão importante para a história do conceito, dá o mote para o estudo das relações CTS. É, também, um tema de grande interesse dada a natureza diferente da segunda lei da termodinâmica, que, ao contrário de todas as outras, não é absoluta, mas sim, estatística. Afinal, e ao contrário do que todos esperam, um café pode começar a ferver espontaneamente. Basta esperar algum tempo... “Se todas as estrelas do céu tivessem o mesmo número de planetas do Sol, e se cada um deste planetas tivesse a mesma população que a Terra, e se cada uma dessas pessoas vivesse  $10^{12}$  anos, o número de segundos dos seus tempos de vida combinados seria muito menor do que o enorme número...” correspondente a esse intervalo de tempo. (Romance da Entropia, p. 255).

Por outro lado, este conceito está intimamente relacionado com o da energia, o que deixa prever, desde logo, o seu elevado grau de abstracção. Talvez este seja um dos motivos que favorecem a dificuldade face à aprendizagem do conceito de entropia, assim como das leis da termodinâmica. Estas leis são leccionadas no actual 10º ano de escolaridade, sendo que se encontram na mesma unidade didáctica, com a primeira lei a anteceder a segunda. Solomon (1992) demonstra o seu desagrado em relação à prioridade cronológica que se dá à primeira lei, da seguinte forma:

A equivalência matemática entre o trabalho e o calor, e a conservação da nova quantidade associada, ficou estabelecida antes que qualquer teoria sobre máquinas a vapor fosse aceite. Assim, a Primeira Lei da Termodinâmica, descrevendo a conservação da energia surgiu primeiro (...) A ordem histórica, no entanto, não é nenhum guia de como as crianças modernas aprendem assuntos relacionados com a energia (...) Eles cresceram com carros, máquinas e motores. Seria surpreendente se a sua intuição sobre a termodinâmica não tentasse explicar e prever o curso da energia transferida e transformada...” (p. 125, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Solomon considera que, apesar da primeira lei ter surgido antes da segunda, o ensino só terá a perder se se atender à ordem histórica. Não consideramos, no entanto, que se possa afirmar que a primeira lei tenha surgido antes da segunda. A narrativa construída neste trabalho dá a conhecer que as reflexões em torno da segunda lei tiveram início antes dos estudos sobre a primeira lei. No ano de 1824, ano em o engenheiro Carnot editava os seus famosos estudos, a segunda lei da termodinâmica, a nível macroscópico, tomava contornos muito semelhantes aos aceites nos dias de hoje. Quanto à primeira lei, os estudos históricos revelam que as reflexões mais cuidadas que levaram ao seu desenvolvimento terão sido iniciadas por volta do ano de 1842. Citando Kuhn (1977, p. 101), “Entre 1842 e 1847, a hipótese da conservação da energia foi publicamente anunciada por quatro cientistas europeus...”

Em relação aos argumentos utilizados por Solomon de que os alunos de hoje estão rodeados de máquinas e carros, há que salientar que também esta foi a grande motivação dos homens do século XIX. Ambas as leis da termodinâmica contam com máquinas a vapor e eléctricas como as grandes impulsionadoras da maioria dos estudos que levaram aos seus enunciados.

Parece ser um pouco precipitado afirmar-se que a primeira lei surgiu antes da segunda e que as motivações dos alunos de hoje são muito diferentes das dos cientistas do século XIX. Deve, porém, voltar-se à opinião de Solomon, relativa à ordem cronológica do ensino das duas leis da termodinâmica, de modo a destacar-se algo de grande interesse na sua análise ao ensino da termodinâmica.

Na sequência das críticas da autora, surge a sua argumentação face aos benefícios da aprendizagem da segunda lei antes da primeira. Na sua opinião, os alunos estarão muito mais intuitivamente relacionados com a segunda lei do que com a primeira. A autora considera que, para que o ensino destas leis seja bem sucedido, deve haver uma adequação da linguagem, assim como levar em conta as ideias intuitivas dos educandos. Citando Solomon (1992),

Ensinar um aluno a entender e aplicar qualquer princípio físico envolve dois processos. O primeiro destes é encontrar uma linguagem apropriada para a tarefa. Este, por sua vez, requer que a criança entenda o tipo de palavras utilizadas, e também que estas palavras descrevam um aspecto do princípio que a criança seja capaz de compreender (...) A segunda parte essencial da planificação do processo do ensino é levar em conta os comuns problemas intuitivos da criança e organizar exemplos ilustrativos... (p.126)

A autora (1992, p.126), refere que nenhum destes princípios é visado no ensino da primeira lei da termodinâmica, salientando a importância de comparar a noção que os alunos têm do termo “conservação” com o seu significado no mundo da Física (1992, p.130). Solomon descreve um estudo piloto realizado a alguns alunos. Levando em conta a linguagem dos mesmos, assim como as suas ideias intuitivas, a autora descreve as mudanças sofridas na aprendizagem das leis da termodinâmica por parte destes alunos. Atendendo aos dois parâmetros anteriores, Solomon lança algo que denomina por *Running Down Principle* e reformula o ensino da segunda lei da termodinâmica:

A partir destas discussões, usando o vocabulário dos alunos, foi formulado um enunciado elementar da segunda lei da termodinâmica, acerca da direcção das transformações energéticas.

*RUNNING DOWN PRINCIPLE*

Em todas as transformações energéticas existe uma degradação como forma de se atingir um equilíbrio no qual parte da energia se torna inútil. (1992, pp. 133, 134).

Solomon salienta, ainda, que a segunda lei da termodinâmica, ensinada através do princípio anterior, antecedeu o ensino da lei da conservação da energia. Este último surgiu, apenas como uma adenda ao primeiro. Citando a autora,

... O *Running Down Principle* foi pensado antes do Princípio da Conservação. De facto, o último foi apenas adicionado à noção de degradação como um simples regulador de equilíbrio - ‘mas o número total de joule de energia permanece constante’. (1992, p.136)

Quanto aos resultados deste ensino piloto, em que se deu prioridade à linguagem e às ideias intuitivas, considerando que a segunda lei se encontra mais próxima da intuição dos alunos do que a primeira, Solomon mostra-se optimista. Os estudos revelaram “... mudanças significativas nos resultados após a adopção do novo programa de ensino...” (Solomon, 1992, p.137).

Além de perspectivizar uma nova forma de ensinar a termodinâmica, Solomon transmite o quão difícil se pode revelar a aprendizagem das questões relacionadas com a energia. Esta dificuldade e o interesse por novos modos de explorar o assunto na sala de aula, foram, também, muito importantes para a eleição do conceito de entropia como tema de trabalho.

A visão de Solomon acerca do ensino das leis da termodinâmica, onde está inerente a convicção de que a segunda lei estará mais próxima da intuição dos alunos, contrasta

substancialmente com o complexo conceito de entropia. Citando Atkins<sup>2</sup>, “Mencionar a segunda Lei da Termodinâmica leva-nos ao funcionamento das máquinas a vapor, à matemática mais intrincada, e à incompreensível entropia.” A aparente contradição entre Solomon e Atkins é compreensível. O princípio de Solomon visa apenas o fluxo de energia do «quente» para o «frio», tão próximo da experiência de qualquer criança que sabe antecipadamente que o seu leite, exposto ao ar, irá arrefecer. Atkins refere-se ao conceito de entropia e à sua formulação matemática, assim como à natureza estatística da segunda lei da termodinâmica.

O enriquecimento pessoal é grande através de uma investigação deste género, trazendo associado a si um melhoramento profissional, enquanto professora de Física. Para que um professor consiga guiar, da melhor forma, os seus alunos na árdua tarefa da aprendizagem, é essencial que destrua os seus próprios preconceitos acerca da ciência. Citando Caamaño (1996):

A compreensão da natureza da ciência deve ser um objectivo a abordar-se no ensino secundário obrigatório, para ajudar a formar uma visão epistemologicamente válida da ciência e da explicação científica, modificando certas visões estereotipadas que a investigação didáctica mostrou que têm muitos estudantes e alguns professores. (p. 43).

Uma formação epistemológica deverá, como alguns autores defendem, passar pelo aprofundamento histórico de algumas questões. Como abordar aspectos da natureza das ciências físicas sem passar pelas idealizações tão características do pensamento de Galileu; sem passar pelas omissões de Newton na sua experiência crucial; sem passar pela valorização do pensamento analógico, como foi o caso de Carnot?

Há que distinguir o saber da mera informação. O verdadeiro conhecimento é aquele a que se atribui significado e relevância, enquanto que a informação é transferida de pessoa em pessoa sem que alguém a explique verdadeiramente. Citando Finger (1988):

... é verdade que o saber tal como é produzido pela ciência moderna se apresenta cada vez mais sob a forma de informações. No entanto, uma informação não tem significado em si; para podermos compreendê-la temos de lhe atribuir um significado, de a integrar num saber que é outro (...) O saber só merece este nome se for encarnado e integrado numa pessoa. É evidente que a pessoa a que aqui me refiro é diferente dos indivíduos atomizados que acumulam informações e que repetem slogans. (p. 82).

Para que as questões relacionadas com a natureza do conhecimento científico não se

---

<sup>2</sup> Prefácio do livro “The 2<sup>nd</sup> Law”



concretizem em informação, mas sim em saber e conhecimento, é nosso pressuposto que devam resultar de aprofundamento histórico de casos.

Assim, surge o **primeiro objectivo** do trabalho: **Alterar a nossa relação com o conhecimento científico**, exibindo o seu valor, a sua pertinência, o seu poder e os seus limites. Sobretudo, vê-lo como uma união espantosa entre a imaginação e os factos concretos.

A nível pessoal, foi principalmente a busca deste conhecimento que motivou a elaboração do presente trabalho. Citando Serres, referenciado por Finger (1988):

Drogado de saber? Gosto que o saber faça viver, cultive, gosto de fazer dele carne e casa, que ajude a beber e a comer, a caminhar lentamente, amar, morrer, por vezes renascer, gosto de dormir entre os seus lençóis, que ele não me seja exterior. Ora ele perdeu este valor vital; é preciso curarmos do saber (...) O saber sensato cura e forma o corpo, embeleza. Quanto mais presto atenção e procuro, mais penso. Penso, logo sou belo. O mundo é belo, logo penso. O saber não pode dispensar a beleza. Procuro uma ciência bela. (p.81).

## 4.2. Importância da narrativa histórica

Antes de prosseguir, deve dar-se a conhecer o **segundo objectivo** do trabalho: **Construção de uma narrativa com valor pedagógico**. E o que é uma narrativa com valor pedagógico? É aquela que exhibe o valor, o poder e a “beleza” (Whitehead) dos conceitos científicos. A nossa narrativa põe em destaque a diferente natureza da segunda lei da termodinâmica. O seu carácter estatístico distingue-a de todas as outras e, no entanto, a didáctica, muitas vezes, não faz esta distinção.

Há um outro ponto que se deve focar e que diz respeito ao facto de se ter optado pela construção de uma narrativa. Poder-se-ia ter preferido outro tipo de trabalho no âmbito da História da Ciência. No entanto, a escolha recaiu sobre a construção de uma história que pretende retratar o surgimento e a evolução do conceito de entropia. Os principais motivos que levaram a esta escolha prendem-se, em parte, com a importância pedagógica que uma narrativa pode ter na construção do conhecimento. Segundo Bruner (2000), a narrativa é importante;

... enquanto modo de pensar, como estrutura de organização do conhecimento e como veículo no processo da educação, particularmente na educação científica (...) É que muito provavelmente a maneira mais natural e mais primitiva de organizarmos a nossa experiência e o nosso conhecimento é em termos próprios da forma narrativa. (p.163).

Bruner (2000) defende o “currículo em espiral”, em que, segundo o próprio,

... ao ensinar um assunto, se começa por um relato “intuitivo”, que se adapta ao alcance do estudante, e depois dá uma volta atrás para um relato mais formal e mais rigorosamente estruturado, até que, embora muitas mais reciclagens sejam necessárias, o aluno tenha dominado a matéria com a sua plena faculdade gerativa. (p.163).

A narrativa pode apresentar-se como um recurso apropriado para uma aprendizagem em espiral. Os alunos poderão ter uma primeira aproximação com um determinado conceito científico através da forma narrativa e vir a aprofundá-lo posteriormente, com a ajuda e a orientação do professor. Citando Bruner (2000, p. 163), “... Pode também ser verdade que os inícios, as transições e a plena compreensão das ideias num currículo em espiral dependem do encaixe dessas ideias numa forma narrativa.”

Por fim, salienta-se que a narrativa é um meio privilegiado para exhibir a elaboração das questões, das hesitações, das soluções imaginativas e dos erros. É grande o prazer que se retira da exploração do notável trabalho de tantos homens, fazendo uso da criatividade. Segundo Mach, citado por Ana Luísa Janeira (1985, p.285), “Como compreender uma ciência é compreender e manejar a sua história, como praticá-la com criatividade é ainda não depreciar os seus antepassados”.

### **4.3. Elementos metodológicos para a construção de uma narrativa**

Descritas algumas das vantagens da utilização da narrativa no ensino, impõe-se a questão de saber o que é, afinal, uma narrativa. Segundo Bruner (2000, p.163), sendo a narrativa um discurso, deverá existir um bom motivo a seu favor “que o distinga do silêncio.” O autor justifica a utilização da narrativa ao considerá-la como “uma violação da canonicidade”, em que a sequência dos eventos que nela estão narrados contam algo que ninguém espera, “algo que o ouvinte tem razão para pôr em dúvida (...) Uma história tem, pois, dois lados: uma sequência de eventos e uma avaliação subentendida dos eventos contados.” Para Bruner, no final da empolgante leitura que se faz da sequência de eventos que relatam algo de inesperado, o leitor faz a sua avaliação e decide se deve acreditar naquilo que leu ou não.

Para que a sequência de eventos seja bem sucedida há que fazer uma selecção dos factos a incluir na história. Feita a selecção, os eventos devem ser dispostos de uma forma organizada e simples, de modo a que a narrativa se torne agradável aquando do momento da leitura. Quanto à selecção de eventos a incluir na narrativa, Kubli (2001, pp.596-598) sugere que se sigam algumas prioridades, de forma a promover uma narrativa interessante e que vá de encontro aos seus objectivos. Na opinião de Kubli, uma narrativa deve esconder alguns segredos, de forma a estimular a curiosidade. Destes segredos, devem constar detalhes que não têm relação directa com o enredo e que poderão desviar a atenção dos leitores. Em relação às narrativas com um fim didáctico, Kubli (2001) salienta que:

Os elementos verdadeiramente didácticos manifestam-se por si só através da simplicidade do enredo e na claridade e precisão das descrições. Tal, evita mensagens intrusas e conduz o leitor ou o ouvinte ao ponto que se pretende sem uma moralização. (p.596).

Kubli também defende a presença de uma certa ironia na narrativa. No caso de uma narrativa histórica com um fim didáctico, a utilização da ironia poderá fazer diminuir o distanciamento que os estudantes sentem em relação aos cientistas. Citando Kubli (2001):

A ironia é uma espécie de condimento que ajuda a 'digerir' o conteúdo da história. É altamente recomendado quando se tratam de heróis da física. Ajuda os estudantes a vê-los como de facto são. Não gostamos de ser confrontados com pessoas que são intelectualmente ou moralmente superiores a nós, a menos que a narrativa nos ajude a sentirmo-nos iguais a eles (...) um pouco de ironia (...) Até ajuda a uma familiarização com o seu pensamento. (p. 597).

Aquando da construção da narrativa, o autor deve, também, ter em conta os seus possíveis leitores. A mesma, deve ser assente num determinado nível científico e em determinados valores, supostamente aceites pelos leitores a que se destina. Citando Kubli (2001):

O texto pressupõe um leitor implícito com uma certa faculdade para entender os conceitos ou os argumentos, e um autor implícito que converse com os seus leitores. Um bom texto está construído sobre um determinado nível intelectual e também está baseado num determinado sistema de valores que implicitamente são supostos ser aceites (...) O leitor ou o ouvinte implícito é um dos elementos mais importantes de uma história. (p.597).

O «Romance da Entropia» será construído de forma a, pretensamente, ter em conta os pontos anteriormente focados. Deve começar por explicitar-se o tipo de público a que esta narrativa se destina. Os leitores implícitos são professores e, possivelmente, alunos de

Física. Directamente, a narrativa destina-se a professores de Física que anseiam em saber um pouco mais sobre a história das leis da termodinâmica. Não obstante, julga-se que a linguagem utilizada e o rigor em que se insiste permitem que a história possa, também, ser dirigida a alunos. A sua aplicação didáctica poderá ser realizada, por exemplo, através da exploração de excertos escolhidos pelo professor, na sala de aula. Ainda em relação ao teor didáctico do “Romance da Entropia”, deve realçar-se que, apesar do título, esta história poderá ser utilizada não só para introduzir o conceito de entropia e as leis da termodinâmica, mas também, o tema “Energia” abordado no terceiro ciclo. Refira-se que neste tema são explorados conceitos como os de energia dissipada e energia útil, perfeitamente enquadrados na narrativa em questão. Assim, o “Romance da Entropia” poderá, eventualmente, ter um amplo público de alunos, compreendidos desde o terceiro ciclo, passando pelo ensino secundário (o conceito de entropia é leccionado no 10º ano), até ao ensino superior.

Quanto à estrutura, o “Romance da Entropia” estará organizado de forma a que os contributos de um cientista sirvam de base aos estudos do que se segue. Saliente-se que, apesar da expressão “servam de base aos estudos do que se segue”, não significa que a construção do conhecimento científico esteja retratada como uma «soma algébrica» de estudos. Muitas destas ideias que “servem de base”, são abandonadas, modificadas, e por vezes retomadas, ao longo da odisseia da evolução da entropia. O enredo será direccionado para o surgimento e conseqüente desenvolvimento do conceito de entropia, sendo que a história terminará com a visão mais complexa do mesmo. No entanto, julga-se que os últimos capítulos não oferecerão dificuldade a nível da compreensão, tendo em conta as explicações que o antecedem.

Em relação à coerência da história, tentar-se-á proceder, sempre que possível, da mesma forma, em relação a todos as «personagens». Antes de dar a conhecer os trabalhos de um cientista, construir-se-á um pequeno relato das suas vidas, por vezes desde crianças. Sempre que oportuno, serão relatadas peripécias que com eles se relacionam ou características que lhes eram próprias, de modo a promover a aproximação entre estudantes e cientistas. Com tais descrições também se pretende aproximar a história da entropia o mais possível da realidade, aspirando a que o leitor se envolva de tal modo, que se sinta quase a viver a história. Isabel Stengers é notável neste ponto, exibindo uma escrita cativante e clara, como se verifica no excerto que se segue e que tão bem resume a

evolução da entropia desde o imaginário ciclo do engenheiro Carnot até ao terrível presságio de Lorde Kelvin da morte térmica do Universo. Veja-se a seguinte passagem de Stengers (1994, Abril):

Nascido alguns dias após a publicação das *Réflexions* em 1824, um jovem escocês desembarcou em Paris em 1845. Um artigo assinado por Clapeyron incitou William Thomson a querer obter o trabalho de Sadi Carnot. Esforço perdido: Mais nenhuma livraria possuía um único exemplar. Que importava, a narrativa de Clapeyron seria suficiente. Com esta redescoberta, surgiram duas décadas de controvérsias. Um primeiro conflito entre Thomson e James Joule resolveu-se naqueles anos. A disputa foi mais violenta entre os físicos britânicos e um professor alemão: Rudolf Clausius. No final da história, o último triunfou: foram enunciados dois princípios da termodinâmica definitivamente adoptados... (p. 70).

Esta forma viva, que exhibe conflitos e polémicas foi um guia metodológico importante no desenvolvimento do nosso trabalho.

Segundo Bruner (1996, p.164), “... as histórias são julgadas com base na verosimilhança ou na afinidade com a vida.” Em relação a esta afirmação, Bruner alerta que, muitas vezes, o conto imaginário torna-se numa história real, através desta aproximação que o autor faz com a realidade. Não é esse, no entanto, o intuito do «Romance da Entropia», sendo que se tentará relatar os factos o mais rigorosamente possível, através do recurso a trabalhos de historiadores da ciência e a alguns textos históricos. Considera-se que numa narrativa deste carácter, o rigor dos factos, assim como a objectividade e a linguagem clara devem ser os trunfos principais. O «Romance da Entropia», será construído tendo sempre presente estes três pré-requisitos. A história será escrita para os leitores implícitos já descritos e para os quais o rigor dos factos deve ser colocado antes de qualquer outra estratégia de narração. Com rigor de factos entende-se, por um lado, o rigor científico, que engloba uma linguagem cuidada a nível científico e por outro lado, uma descrição baseada apenas em acontecimentos que, segundo as fontes analisadas, são verídicos. Ao mesmo tempo, apostar-se-á numa linguagem acessível e clara, através de um discurso lógico e objectivo, não dando margem para retirar ilações que poderão deturpar a mensagem que se tenta transmitir.

Por último, deve referir-se que o **terceiro objectivo** do trabalho é o de mostrar que, “**o processo de fazer ciência é narrativo.**” (Bruner, 1996, p.168). Citando o autor (1996) acerca da natureza do processo científico:

Consiste em aventar hipóteses sobre a natureza, pondo-as à prova, corrigindo-as e mantendo as ideias arrumadas (...) a nossa instrução aplicada à ciência, do princípio ao fim, deveria ter em consideração os animados processos do fazer ciência, em vez de ser apenas uma exposição

da “ciência acabada”... (p.168).

Resta sintetizar as motivações que levaram à eleição da História da Ciência e da narrativa para tema de trabalho, dando a conhecer os principais objectivos visados com a construção do «Romance da Entropia». Desta forma, a narrativa será construída tendo em vista os seguintes pontos:

- Aumentar a cultura histórica e científica de quem investiga, ajudando-a a perspectivar a didáctica de forma crítica.
- Contribuir, com ideias, para a construção de narrativas históricas com valor pedagógico.
- Contribuir para o desenvolvimento do interesse pelo conceito de entropia, que faz parte dos actuais programas do 10º ano de escolaridade.
- Exibir aspectos em que o conhecimento novo emerge, por vezes, com base em concepções que mais tarde se verificaram como incorrectas. Salienta-se o caso de Carnot, cujos estudos se basearam na visão do calor como uma substância material de nome calórico. A intuição de Carnot sobre o conceito de calor veio a verificar-se errada, o que não impediu este engenheiro francês de desenvolver um notável trabalho, que rendeu ideias aceites como correctas até hoje.
- Clarificar o significado do novo conhecimento científico, exibindo questões e perplexidades que estão na sua origem.
- Exibir aspectos que ajudem a explorar alguns passos que estão na base da construção do conhecimento científico.
- Proporcionar elementos para que possam ser vividos estados de romance na sala de aula (ver referência a Whitehead, pp. 76-79).



## Capítulo 5 – «Romance da Entropia»: história ou pseudohistória?

“Crusoe era um mero homem, a areia era mera areia, a pegada era uma mera pegada, e a ilha uma mera ilha, e a Europa era o movimentado mundo dos homens. Mas a súbita percepção das meia-reveladas e meia-escondidas possibilidades relacionando Crusoe e a areia e a pegada e a solitária ilha afastada da Europa constitui romance.”

Whitehead<sup>1</sup>

### 5.1. Sinais de uma pseudohistória

Quando os estudos sobre a psicogénese do ser humano começaram a dar indícios de que a utilização da História da Ciência no ensino poderia ter frutuoso resultados, tanto a nível cognitivo como afectivo, a única preocupação era avançar com uma prática de ensino que integrasse a história dos conceitos científicos. No entanto, à medida que se foram construindo materiais didácticos com referência à História da Ciência, outras preocupações surgiram. Nomeadamente, se a História da Ciência abrangida nestes materiais estaria explorada da forma recomendável para surtir os efeitos desejados nos estudantes. Neste momento, vários autores alertam para o perigo de uma História da Ciência mal contada, sendo que a mesma poderá contribuir para agravar os problemas dos alunos, face ao estudo da ciência, ao invés de os minimizar, como é desejado.

Allchin (2004, p.179), chama a atenção para alguns dos perigos relacionados com uma má utilização da História da Ciência no ensino. O autor engloba estes perigos em algo a que chama pseudohistória e que compara com as diferentes vertentes da pseudociência, como, a astrologia e a parapsicologia. Citando Allchin (2004):

... uma narrativa romantizada de uma descoberta pode sobreacentuar a contribuição de um indivíduo, minimizando o papel de acidentes ou erros, simplificando o processo de investigação (...) esconde o efeito de valores pessoais ou culturais (...) Transformam a ciência real numa ciência idealizada e imaginada. Tais histórias selectivas e enganosas mascaradas como histórias responsáveis são justamente chamadas de pseudohistórias.” (p.186).

---

<sup>1</sup> Citado por Valente (1999, p. 57)



Na pseudohistória, Allchin situa todas as histórias que “usam os factos selectivamente e promovem imagens enganosas (...) acerca da natureza da ciência (...) histórias que romantizam cientistas, inflamam o drama das suas descobertas, e simplificam excessivamente o processo da ciência.” (2004, p.179). Um dos perigos da utilização das pseudohistórias para o qual Allchin alerta refere-se à forte influência destas na construção de “estereótipos desnecessários e ideias falsas acerca de como a ciência funciona.” (2004, p.180). O autor (2004), neste artigo, fornece várias pistas para que as pseudohistórias possam ser identificadas pelos professores, evitando que estes façam utilização das mesmas na sala de aula. Para o efeito, analisa uma discussão acerca da dos estudos de William Harvey sobre a circulação do sangue, que terá sido apresentada para um público de professores de Biologia. Este exemplo não será discutido aqui, até porque o tema de debate foge à história da entropia, que é o foco de interesse. Apresentar-se-ão, apenas, as ilações que Allchin retirou da discussão em torno dos trabalhos de Harvey, sobre a qual começa por afirmar que “... alguns factos foram deturpados e outros factos importantes foram omitidos, com um efeito retórico poderoso.” (2004, p.180). Sendo um dos objectivos da História da Ciência no ensino introduzir elementos que ajudem a uma aproximação à natureza da ciência, uma narrativa histórica deve insistir no rigor como via metodológica. Como tal, uma história do foro didáctico jamais deverá moldar os factos, transferindo para segundo plano o rigor, como forma de a tornar mais interessante. Pelo contrário, julga-se que é precisamente o rigor dos factos que «anima» uma história e a torna muito mais empolgante do que qualquer outra de inventar. Citando Allchin (2004, p.181), “Para entender a natureza da ciência, queremos entender como é que Harvey realmente raciocinou, não como ele *poderá* ter raciocinado de acordo com algum arranjo idealizado.”

A primeira característica que Allchin aponta ao exemplo em estudo, indicadora do perigo da presença de uma pseudohistória é a facilidade que se deixa transparecer acerca do método de investigação utilizado. A investigação acerca da circulação do sangue foi descrita, segundo Allchin (2004, p.181), como levada a cabo unicamente por Harvey. Quanto às vicissitudes que terão acompanhado toda a investigação, Allchin (2004, p.181), refere que foram totalmente ignoradas tal como a alusão aos muitos anos de observações e estudos que antecederam as conclusões retiradas. Citando Allchin (2004):

O registo para os professores parece mostrar, através do exemplo de Harvey, que a descoberta científica ocorreu através de um método muito ponderado, sem problemas e rígido. O sucesso em ciência parece garantido pela simples perseguição de regras. (p. 181).

Allchin (2004, p.181), salienta também a lógica dedutiva que aparece como o cunho principal do raciocínio do estudioso da circulação do sangue. A esta descrição enganosa do modo de pensar de Harvey, o autor denominou de raciocínio se-então. Neste tipo de raciocínio não há lugar para enganos nem para formas de pensar alternativas. Para Allchin (2004, p.183), esta descrição do trabalho de Harvey “reflecte a tendência para descrever o passado conforme um presente ideal. Tal, tenta assegurar o progresso através da lógica.” Desta forma, a utilização da história da ciência no ensino não parece actuar da forma desejada, podendo até ter o efeito contrário, ao reforçar as ideias dos alunos de que os cientistas são génios que rapidamente descobrem complicadas teorias, sem que alguma vez percorram caminhos errados.

Allchin (2004, pp.183, 184), chama a atenção para um outro sintoma de que a narrativa possa ser uma pseudohistória e que também está presente no caso de Harvey. Trata-se da falta da descrição do contexto que rodeia o desenvolvimento de uma determinada teoria. O autor refere que segundo a descrição do próprio Harvey, os seus estudos desenvolveram-se com base numa analogia entre o funcionamento do corpo humano e as órbitas planetárias. Esta imagem não foi, no entanto, explorada na discussão sobre os seus estudos. Segundo Allchin (2004, 184), a analogia tomou um lugar secundário, uma vez que dá uma visão pouco científica ao modo com o trabalho do cientista foi desenvolvido. No entanto, para que a História da Ciência desempenhe o papel esperado no ensino, é imprescindível não ocultar estes detalhes que podem parecer pouco científicos. Citando Allchin (2004, p.184), “Não podemos considerar a analogia secundária se quisermos compreender o raciocínio de Harvey e retratá-lo fielmente aos estudantes.”

Uma outra característica importante das pseudohistórias, para a qual Allchin (2004, p.184), alerta os professores é a tendência para “romantizar os cientistas tanto santos – como heróis. Tais hagiografias enganam através da hipérbole e/ou pelo relato apenas do que reflecte favoravelmente o cientista.” Com a imagem de santo/herói dos cientistas, Allchin refere-se a uma descrição de alguém eleito como o único a estudar um determinado assunto e a descobrir algo de muito importante. O cientista em causa é tido quase como alguém perfeito, que nunca se engana e que efectua rapidamente raciocínios lógicos que levam a uma «descoberta». Para que um cientista possa ser visto desta forma, todos os

outros que anteriormente realizaram estudos na sua área e que deram contributos importantes são ignorados, fazendo realçar o «brilho» de um único homem- o herói da história. Nesta mesma perspectiva, Allchin (2004, p.185) ainda acrescenta que a contrastar com o herói, muitas vezes existe um vilão. Enquanto que o primeiro é o génio que desenvolve notáveis estudos, o segundo desenvolve um trabalho que leva a conclusões erradas e, claro, opostas às do herói. Há um conflito entre dois homens que representa “o conflito entre o conhecimento e a ignorância.” (Allchin, 2004, p.185). Desta forma, as qualidades do afortunado cientista a quem a história cede todos os louros, são ainda mais realçadas e o estatuto de génio torna-se ainda mais proeminente.

Allchin (2004, p.185), aponta mais uma característica que, por vezes, é atribuída ao herói da história e que constitui mais um indicativo de que se trata de uma narrativa enganosa e manipuladora. Desta vez, o autor alerta para uma descrição do herói da história como um mártir que não chega a ver o seu trabalho reconhecido. Segundo Allchin (2004, p. 185), para compor ainda mais a personagem principal da história e para dar um certo ar de drama à mesma, há uma descrição do herói como uma vítima das circunstâncias. No exemplo de Allchin, o herói, Harvey, não chega a ver o seu trabalho reconhecido, uma vez que tal só acontece catorze anos após a sua morte.

As características de uma narrativa que Allchin considera contribuir para descrever de forma enganosa um feito científico estão revelados. Em jeito de resumo, o autor sintetiza os detalhes que encontrou no exemplo da história de Harvey e que considera formarem uma pseudohistória. Destes, salienta, “omissão de pensadores anteriores, difamação de outros cientistas”, “imaginação de que Harvey previu a existência de capilares, supressão da analogia com o cosmos (...) tudo está (...) num modelo idealizado de raciocínio científico e de génios.” (2004, p. 185)

A utilização de uma história que, apesar de se basear em factos verídicos, transmite uma imagem deturpada da ciência, ou, pelas palavras de Allchin, a utilização de uma pseudohistória, pode ter um efeito contrário ao que se pretende. Citando o autor (2004, p. 186), “As pseudohistórias transmitem ideias falsas acerca do processo histórico da ciência e da natureza do conhecimento científico, ainda que baseadas em factos reconhecidos.” As categorias; cognitiva, metacognitiva e afectiva, consideradas como a compilação dos objectivos a atingir por quem pretende aprender Física, ficarão lesadas com um ensino que faz uso das pseudohistórias. Se o objectivo da História da Ciência é o de explorar a

natureza do conhecimento científico, realçando que a existência de génios é pura ficção e que a construção científica exige o esforço de muitos homens ao longo de séculos, estas histórias parecem contar o contrário. Tais narrativas não permitem, também, o conhecimento das controvérsias que fazem parte do desenvolvimento da ciência. “Não se consegue entender a ciência completamente sem apreciar a controvérsia” (Allchin, 2004, p.187). Segundo Stuewer (1998), tais histórias transmitem aos alunos, pelo menos, duas mensagens que contrariam o objectivo da introdução da História da Ciência no ensino. Citando o autor:

Primeiro, sugerem que a Física progride de uma forma quase programada: a máquina começa numa determinada altura, e num futuro próximo terá produzido uma nova descoberta; nada pode pará-lo ou impedi-lo. Segundo, tais histórias lineares sugerem que os físicos são pessoas (...) de capacidades intelectuais superhumanas; a Física não é uma disciplina para vulgares mortais tal como os jovens e inexperientes estudantes. (p.19).

Estas mensagens deixarão, também, nos estudantes a certeza de que o conhecimento científico é um monumento acabado e que jamais poderá ser posto em causa. No entanto, seria desejável que os alunos olhassem a ciência da mesma forma que, segundo Stuewer (1998, p.19), J.J. Thomson um dia a descreveu: “Uma grande descoberta não é um término, mas uma grande avenida que conduz a regiões até agora desconhecidas.” Na opinião de Solbes e Traver (2003, p.705), quando a História da Ciência é introduzida no ensino, é muitas vezes distorcida e são contadas histórias erradas aos alunos. “Como consequência, os estudantes ficam com uma imagem deformada de como os conceitos científicos são construídos e de como crescem, tendendo a adoptar uma atitude negativa face à ciência.” (Solbes e Traver, 2003, p.705)

De uma forma resumida poder-se-á dizer que as pseudohistórias não contam a história da natureza dos conceitos científicos, objectivo essencial para quem quer aprender Física. Citando Allchin (2004):

Ao mesmo tempo que se adultera a história também se adultera a natureza da ciência. Ao se encobrir o contexto histórico e romantizar o cientista como herói, automaticamente a história engana. Esta não é uma história apropriada para entender ciência. Melhor, é uma história que se apropriou para promover uma noção particular de como a ciência funciona. (p. 185).

Stuewer (1998, p.19), à semelhança de Allchin, revela a sua preocupação perante este tipo de histórias, mostrando-se um pouco pessimista ao afirmar que,

Tanto os manuais escolares como os professores tipicamente tratam a história da física de uma forma linear (...) um desenvolvimento mais ou menos em linha recta desde um ponto alto teórico ou experimental para outro, os pontos altos são associados a algum dos grandes nomes do passado. (p. 19).

Resta concordar com os autores anteriormente mencionados de que o uso de pseudohistórias da ciência transportam consigo todos os riscos associados a um retrato da realidade muito pouco rigoroso e até distorcido. Há que ter cuidado ao construir uma narrativa deste género, uma vez que não se trata apenas de uma «história de encantar», mas sim, de uma história com um fim pedagógico. Segundo Allchin (2004), estas histórias com um fim pedagógico,

... explicam através da narrativa. As narrativas históricas da ciência modelam o processo científico mostrando de que forma uma série de acontecimentos *leva* a um certo resultado, tal como uma descoberta famosa. Identificam o que é relevante numa descoberta científica. A narrativa assim explica como funciona a ciência. Quando a narrativa é parcial, a explicação falha. (p.188).

## **5.2. Contra uma pseudohistória mas a favor de uma leitura criativa de textos**

Em seguida iremos analisar o «Romance da Entropia», à luz dos pontos focados por Allchin, como forma de discutir que esta narrativa não se insere naquele grupo de histórias que o autor denominou de pseudohistória. No entanto, o facto de termos construído uma narrativa cujo principal pressuposto foi o rigor científico, não nos impediu de fazermos uma leitura criativa de textos. Na verdade, a nossa narrativa foi o produto destas leituras, que não se limitaram a apreciar o que estava escrito. A nossa leitura dos textos parece encaixar-se na categorização do filósofo Jacques Schlanger sobre a produção de ideias. Categorização esta que nos será de grande ajuda para caracterizarmos as fases pelas quais passámos, durante a construção do «Romance da Entropia». Para Schlanger, citado por Valente (1999), a produção de ideias pode ser vista:

[1] como expressão de uma leitura de discípulo que vem completar o texto, uma co-leitura, uma leitura de obediência na intenção de compreender, de comentar, de interpretar, sem mudar em nada o essencial; [2] ou como expressão de uma leitura crítica, que procura situar-se face ao texto, uma contra-leitura, uma leitura polémica, que pretende examinar o texto nas suas primeiras fraquezas; [3] ou ainda como expressão de uma leitura de autor, leitura de usufruto, leitura de bricolage, de homem que faz mel a partir de tudo para seu

próprio uso, que emprega as ideias expostas nos textos para produzir as suas próprias obras, e que considera os textos dos seus predecessores como matéria a explorar. (p. 103).

Numa primeira fase do trabalho, em que buscávamos os textos constitutivos do nosso *corpus*, passámos pela coleiatura e pela contra-leitura. Com a primeira pretendíamos compreender e interpretar aquilo que liamos como forma de nos aproximarmos mais das ideias que iríamos explorar no «Romance da Entropia». A contra-leitura foi importante para a fase em que tivemos que privilegiar uns textos como sendo mais importantes para nós. Escolha esta que privilegiou, essencialmente, textos que nos ajudassem a desenvolver as ideias com rigor e de forma interessante para a nossa problemática. Nestas duas primeiras etapas, distinguimos desde logo o livro de Hans Christian Von Baeyer para fazer parte do nosso *corpus*, pela sua escrita rigorosa, criativa e interessante. Após estas duas fases de leitura, tão imprescindíveis para nós, passámos à fase que tanto prazer nos deu – a fase da leitura de autor. A passagem pela coleiatura e pela contra-leitura permitia-nos, agora, “empregar as ideias expostas nos textos para produzir a nossa própria obra”.

Sendo a nossa narrativa construída a pensar numa aproximação dos professores às leis da termodinâmica, uma escrita interessante, que leve a uma leitura emotiva, parece-nos essencial. Leitura emotiva que Schlanger, citado por Valente (1999) descreve da seguinte forma:

O leitor é envolvido, é tomado pelo texto e reage vivamente a ele – quer se trate de um leitor ingénuo tomado pela beleza do texto, dum leitor apaixonado que o texto prende na sua própria vida, ou de um leitor sábio que vibra com as ideias que exprimem as palavras, leitor que sonha com as ideias que encontra no texto. A leitura emotiva toca tanto a alma como o espírito, tanto o sentimento como a inteligência; prende-nos no interior do texto e absorve-nos nele, num movimento que ultrapassa a semântica e a sintaxe (...) A leitura semântica e a leitura sintaxe colocam-nos frente ao texto, a leitura emotiva retém-nos nele. (p. 104).

Foi também uma leitura emotiva que sempre nos acompanhou, embora destaquemos como a leitura que mais “nos fez sonhar com as ideias que nele se encontravam”, a do livro de Sadi Carnot. Nesta obra, encontram-se ideias e raciocínios espantosos que fazem uma união perfeita entre a imaginação e o mundo dos fenómenos físicos.

Foram as diferentes leituras que nos permitiram “fazer mel a partir de tudo, empregando as ideias expostas nos textos para produzir a nossa própria obra”. A obra que surgiu corresponde à fruição do estado de romance (ver páginas seguintes) em que nos encontrávamos após tais leituras. Esperamos que o «Romance da Entropia» possa vir a

proporcionar uma leitura emotiva a outros professores, suscitando uma leitura de autor, com a conseqüente produção de novas obras.

### **5.3. «Romance da Entropia»**

Pelo facto da narrativa construída neste trabalho ter por título, «Romance da Entropia», pode pensar-se que se trata de uma pseudohistória. Neste sentido, há que começar por referir que o termo «Romance» é utilizado com o significado que Whitehead lhe dava. Valente (1999) cita a descrição de Whitehead do estado de romance:

O estado de romance corresponde ao estado de primeira apreensão. O assunto tem a vivacidade da novidade; prende por si só através de relações inexploradas com possibilidades meio-reveladas através de vislumbres e meio-ocultadas pela riqueza do material (...) A emoção romântica é essencialmente a excitação conseqüente da transição dos factos descobertos para as primeiras realizações da importação das suas relações inexploradas. (p. 57).

Como já foi referido anteriormente, um dos objectivos do «Romance da Entropia» é o de proporcionar uma maior aproximação entre professores de Física e a história da evolução do conceito de entropia. É nesta mesma linha que se julga que a narrativa em causa se encaixa na definição de romance de Whitehead. Para o autor, o romance não era fomentado nas salas de aula, local onde reinava apenas o estado de precisão. O último, caracterizado pelo treino de um raciocínio disciplinado, sem margem para o estabelecimento de imaginativas relações. Este modo de ensino que não leva em conta o romance, poderá ficar a dever-se a alguma falta de proximidade entre o professor e as matérias que ensina. Segundo Whitehead, citado por Valente (1999):

Agora é altura de prosseguir, para conhecer exactamente o assunto, e para reter na memória as suas características salientes. Este é o estado de precisão. Esta fase é a única fase da aprendizagem no cenário da educação tradicional. Tens que aprender este assunto, e não há nada mais para ser dito no tema da educação. (p. 59).

Whitehead julgava ser possível, mais do que possível, urgente, a comunhão entre os estados de romance e de precisão, no ensino. Para o autor, citado por Valente (1999):

[Durante o estado de precisão] o romance não está morto (...) Terá que ser promovido por uma razão, porque o romance constitui afinal todos os ingredientes necessários daquela

sabedoria equilibrada que é a meta a atingir. Mas há uma outra razão: O organismo não absorverá os frutos da tarefa, a menos que o seu poder de apreensão seja mantido fresco pelo romance. A verdadeira finalidade é a de descobrir na prática aquele verdadeiro equilíbrio entre a liberdade e a disciplina. (p. 59).

Whitehead incluía ainda um outro estado no processo educativo, o qual designava por estado de generalização. Este pressupunha “... uma prática imaginativa, com toda a emoção que lhe é inerente, com um passado de exercício do pensamento disciplinado.” (Valente, 1999, p. 62). Neste estado, o autor faz a união entre os dois anteriores; estado de precisão (pensamento disciplinado) e estado de romance (prática imaginativa). O estado de generalização foi definido por Whitehead, citado por Valente (1999), da seguinte forma:

Um retorno ao romantismo com a vantagem adicional das ideias organizadas e da técnica importante. É a fruição que tem sido a meta da formação precisa.

... [Os alunos] recaem nas aventuras divagantes do estado romântico, com a vantagem de que a mente é agora um regimento disciplinado em vez de uma multidão. Neste sentido, a educação deveria começar na pesquisa e terminar na pesquisa.”

(p. 60, o sublinhado é da nossa responsabilidade)

A pesquisa levada a cabo durante a construção do «Romance da Entropia» baseia-se na procura de relações criativas entre factos, encaixando-se na pesquisa a que Whitehead se referia na passagem anterior. Com esta pesquisa, os conceitos apreendidos ao longo dos anos, de forma disciplinada, tomam um novo valor, adquirindo novos significados. No final da pesquisa, é possível desfrutar de um novo conhecimento que conta com um poderoso ingrediente - a imaginação aliada a um raciocínio habituado ao rigor de certas regras. Esta «fruição», permite ascender ao estado de generalização e o termo «romance» ajusta-se ao estado de romance de Whitehead.

Whitehead considerava o estado de romance uma prioridade para a compreensão. Segundo o autor, citado por Valente (1999):

Não há compreensão sem romance (...) Sem a aventura do romance, na melhor das hipóteses poderá conseguir-se conhecimento inerte sem iniciativa, e na pior das hipóteses conseguir-se-á o desprezo pelas ideias – sem conhecimento. (p. 58).

Tal como se referiu anteriormente, são muitas as dificuldades que se impõem ao professor que deve gerir um ensino construtivista. Da mesma forma e também pelas exigências que tal implica, o estado de romance não é o que habitualmente se vive nas salas de aula. Como considerava Whitehead, as escolas actuais ainda contam com aulas em que



apenas reina o estado de precisão. Para criar o estado de romance, o professor terá que estar intimamente ligado aos temas que vai explorar e a única saída será uma pesquisa, com o significado considerado anteriormente. É neste sentido que se destaca a importância do «Romance da Entropia», sendo que se trata do produto de uma investigação deste género. Através da sua leitura e possível utilização na sala de aula, talvez seja mais fácil para um professor de Física proporcionar aulas com uma atmosfera semelhante àquela que Whitehead, citado por Valente (1999) descreve na seguinte passagem:

A atmosfera de excitação, levantada por considerações imaginativas, transforma o conhecimento. Um facto deixa de ser um facto despido: é investido com todas as suas possibilidades. Não é mais um fardo na memória. (p. 62).

Como forma de discutir se o «Romance da Entropia» se insere naquele grupo de histórias que Allchin denominou de pseudohistórias, analisar-se-á esta narrativa segundo os pontos que o autor (2004) considerou como indicativos de uma pseudohistória.

A primeira característica deste tipo de histórias, apontada por Allchin, refere-se à facilidade do método de investigação. O autor destaca os casos em que não se dá conta dos muitos anos de investigação que antecedem um feito científico, sendo que este é alcançado através da perseguição de regras e de uma lógica dedutiva. Neste ponto, há que começar por referir que, na narrativa «Romance da Entropia», o grande feito refere-se à evolução do conceito de entropia. Como tal, não se poderá afirmar que não se dá conta dos muitos anos de investigação, uma vez que a história tem início no ano de 1796, com várias incursões ao passado e termina no século XX, com um fim em aberto para possíveis alterações à visão do conceito de entropia no futuro.

Ao longo da narrativa, também não se transmite a imagem de que o conceito de entropia surgiu pela simples perseguição de regras ou como fruto de um raciocínio lógico. Realçam-se, como exemplos, os contributos de Carnot, do conde de Rumford e de Mayer. O primeiro, anunciou, na sua obra, que o «calor» fluía sempre do quente para o frio e que o rendimento de uma máquina jamais atingiria 100%. Fê-lo através da admiração que nutria pela máquina a vapor e da grande imaginação sempre presente nos seus estudos. O segundo, apercebeu-se que o movimento de um perfurador de canhões originava a libertação de calor, enquanto supervisionava a fábrica que preparava munições para combater franceses. O terceiro iniciou vários estudos relacionados com o calor ao ficar perplexo com a descoberta de que o sangue, nos trópicos, seria mais vermelho do que na

Europa. Os três casos conduziram a três ideias decisivas para o trilho da evolução da entropia. No entanto, nenhum destes cientistas procurava alcançar um fim pré-definido, sendo que o contexto que os circundava teve um papel preponderante no desenvolvimento dos seus estudos.

Carnot, teve como condicionante o facto de sentir um enorme fascínio pela máquina que revolucionava o mundo e que em França era tão rara. Neste caso, o avanço da tecnologia e a revolução francesa foram determinantes para os estudos do engenheiro francês, na área do calor. Quanto ao desenvolvimento do seu trabalho, não poderia estar mais longe da simples perseguição de regras, fruto de um raciocínio lógico. Saliente-se que todo trabalho de Carnot se alimentou da sua grande imaginação e cresceu acompanhado de uma extrema abstracção. As suas máquinas reversíveis são ideais, e, como o adjetivo adianta, não existem. Inspirado no funcionamento da máquina a vapor, Carnot sonhou com uma possível máquina que funcionasse sem dissipação de energia. Máquinas imaginárias e analogias entre a máquina a vapor e a máquina hidráulica, situadas no polo oposto de qualquer raciocínio lógico, corroboraram os estudos de Sadi Carnot.

Em relação ao conde de Rumford, julga-se que também se deixa bem claro que o mesmo não possuía nenhum propósito pré-definido, na fábrica de canhões, de contribuir para a história do calor. A seguinte afirmação que poderá ser encontrada aquando da leitura do «Romance da Entropia» parece mostrá-lo: “o propósito imediato de fazer canhões não era satisfazer a curiosidade científica mas matar franceses”! (ver p. 86).

Os trabalhos de Mayer tiveram origem numa perplexidade. A sua profissão de médico e a expedição ao Oriente forram as suas duas grandes condicionantes. Mayer estava enganado acerca da cor do sangue em climas tropicais e, numa tentativa de encontrar uma resposta para a sua questão, caiu no mundo da Física (ver pp. 153, 154). O seu objectivo também não era o de chegar ao fim pré-definido de que o calor poderia originar trabalho e vice-versa e só após muito trabalho conseguiu deduzir algo semelhante. A citação do «Romance da Entropia» que se segue parece fazer justiça ao esforço e anos de trabalho que Mayer dedicou até que conseguisse «fazer a sua descoberta»: “Eu (...) investiguei pouco nas distantes partes do mundo, mas preferi ficar a bordo do navio onde podia trabalhar sem interrupção...” (p. 154).

Resta referir que, em nenhuma altura do «Romance da Entropia» está presente a descrição de um estudo científico baseado numa simples perseguição de regras, até porque

não havia uma meta a alcançar. Este conceito desenvolveu-se lentamente, através das respostas dadas às inúmeras questões que eram colocadas sobre o calor.

O segundo sinal de uma pseudohistória, apontado por Allchin, refere-se à falta de descrição do contexto que rodeia o desenvolvimento das teorias. Ao longo de todo o «Romance da Entropia», a descrição do contexto histórico, social e político da época é uma constante. Os exemplos referidos anteriormente servem também para ilustrar este ponto. Os estudos levados a cabo pelos cientistas foram sempre envolvidos por uma contextualização, nomeadamente, descrições sobre os factores que levaram à invenção da máquina a vapor, sobre as revoluções industrial e francesa, ou sobre o clima vivido no meio científico, entre outras.

Allchin salienta a falta de descrição das analogias utilizadas pelos cientistas. Nesta narrativa, é dada ênfase à analogia de Carnot entre a máquina a vapor e a máquina hidráulica. Na analogia, o calor é comparado à água que cai de uma certa altura, provocando o movimento de algo. Ainda neste ponto, deve focar-se o pequeno demónio de Maxwell. Segundo Allchin, nas pseudohistórias não constam argumentos que possam parecer pouco científicos. O demónio de Maxwell representa uma analogia entre o mundo dos átomos e um mundo imaginário (de diabretes sem massa). Claro que se trata de uma experiência pensada porque diabretes sem massa não existem. Pelo facto de ser pensada, pode parecer pouco científica, o que não a impede de constar do “Romance da Entropia”, representando uma das principais fases do processo do pensamento em torno do significado do conceito de entropia, a nível microscópico. Aliás, este tipo de experiências parecem surtir grandes efeitos na busca do conhecimento científico, realçando-se os tantos estudos de Galileu baseados nas mesmas. No livro anteriormente focado, “O Diálogo sobre os dois maiores sistemas do mundo”, há inúmeros exemplos deste tipo de experiências, como a analogia entre a pedra que cai do alto do navio e o objecto que cai do alto da torre de Pisa. Com tal experiência, Galileu tentava acabar com os argumentos contra a possibilidade do movimento da Terra, sendo que esta «experiência pensada» é apenas uma entre os muitos exemplares que se encontram nesta obra. O interesse didáctico do demónio de Maxwell é acrescido, uma vez o seu conhecimento permite o contacto com a natureza diferente da segunda lei da termodinâmica, evidenciando o seu valor. Destaca-se, também, que inúmeras vezes são feitas alusões a argumentos religiosos que se sobrepõem aos científicos.

Salienta-se o caso de William Thomson que defendia fervorosamente a morte térmica do Universo, baseado numa passagem da bíblia.

A terceira característica apontada por Allchin como sinal de uma pseudohistória refere-se ao facto de se eleger um cientista como o principal personagem da história. A este atribui-se a «grande descoberta», realçando que o mesmo não tem falhas de carácter e que é praticamente um génio. Outros personagens poderão surgir, com ideias contrárias às do herói e, portanto, erradas, sendo este último visto como um vilão. Numa primeira fase, deve salientar-se que, do «Romance da Entropia» fazem parte oito personagens principais, e muitas outras que, apesar de não terem o mesmo destaque, não se considera que tenham contribuído menos para o reino da Física. As oito personagens principais traduzem-se nos principais cientistas que, mais directamente, contribuíram para o estudo do conceito de entropia. Na narrativa existe uma sequência, em que, os trabalhos de um cientista dão o mote para os estudos do próximo, salientando, algumas controvérsias criadas entre estes. Há, ainda, a referir que se deixa bem claro que Clausius é denominado por «padrinho da entropia» apenas porque foi ele que deu o nome ao conceito e não porque o tenha desenvolvido solitariamente. No respeitante ao estudo da primeira lei da termodinâmica, será salientado o facto de se tratar de uma «descoberta simultânea» de vários cientistas (ver pp.171-172). Optámos por dar realce aos trabalhos de Mayer e Joule apenas porque destes constam experiências que fazem uso dos motores surgidos com a revolução industrial, o que se coaduna com a ilustração de que os contextos sociais, culturais e tecnológicos influenciam a ciência. Refira-se que a expressão «descoberta simultânea» não transmite que os cientistas levaram a cabo estudos idênticos, mas sim, que chegaram a resultados similares.

Também não há relatos que retratem as personagens como santos. Tenta-se, sempre que possível, destacar os defeitos e as virtudes dos cientistas. Salienta-se o conde de Rumford, descrito como “um realista, traidor, espião,... oportunista,... filantropo, egoísta, maçador,... militar,... inventor, plagiário, especialista no calor... e fundador de um dos maiores locais de exibição do mundo para a popularização da ciência; a «Royal Institution».” (p. 84).

Por outro lado, do «Romance da Entropia» também não fazem parte descrições que retratem os cientistas como génios, realçando-se em diversas ocasiões, as ideias alternativas que possuíam. Por exemplo, Carnot orientava os seus trabalhos através da visão do

calórico. William Thomson acreditava que o Universo não resistiria a uma tão grande dissipação de energia, acabando por desaparecer através de uma terrível «morte térmica». Boltzmann negava a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica, entrando em contradição ao explicar dois paradoxos com base na mesma.

Em relação à visão do cientista como um mártir, igualmente focada por Allchin, poderão existir passagens da narrativa que se assemelhem a tal. Refiram-se algumas alusões relativas ao conde de Rumford, descrevendo que o mesmo não viveu o suficiente para saber que a sua teoria (o «calor» é movimento) foi aceite. Não se pretende atribuir a visão de mártir a este estudioso do calor, mas apenas salientar que, para que uma teoria seja substituída por outra, por vezes, passam vários séculos. É referido, na narrativa, o motivo que levou à não aceitação rápida das ideias de Rumford. A questão é que ele não soube explicar que tipo de movimento era aquele que tão determinadamente defendia. A seguinte passagem parece mostrá-lo de forma clara: “... o facto desta nova visão do calor não ter caído nas boas graças dos cientistas assim que a ouviram, fazendo esquecer a visão do calor como uma substância material, pode ter ficado a dever-se não ao que o conde havia dito, mas sim, àquilo que ele não havia explicado.” (ver p. 93). Parece mostrar-se, assim, que a personagem não é uma vítima, mas alguém que não teve o reconhecimento do seu estudo, em parte, por não o ter conseguido defender da melhor forma.

Em resumo, consideramos que a narrativa “O Romance da Entropia” poderá contribuir para o desenvolvimento dos campos cognitivo, metacognitivo e emocional dos alunos, não constituindo o que Allchin denomina de pseudohistória. Julgamos, ainda, que a mesma poderá ajudar a criar o estado de romance de Whitehead, ilustrado pelo autor, citado por Valente (1999) da seguinte forma:

Crusoe era um mero homem, a areia era mera areia, a pegada era uma mera pegada, e a ilha uma mera ilha, e a Europa era o movimentado mundo dos homens. Mas a súbita percepção das meia-reveladas e meia-escondidas possibilidades relacionando Crusoe e a areia e a pegada e a solitária ilha afastada da Europa constitui romance.” (p.5).

## 2ª Parte

# Romance da Entropia

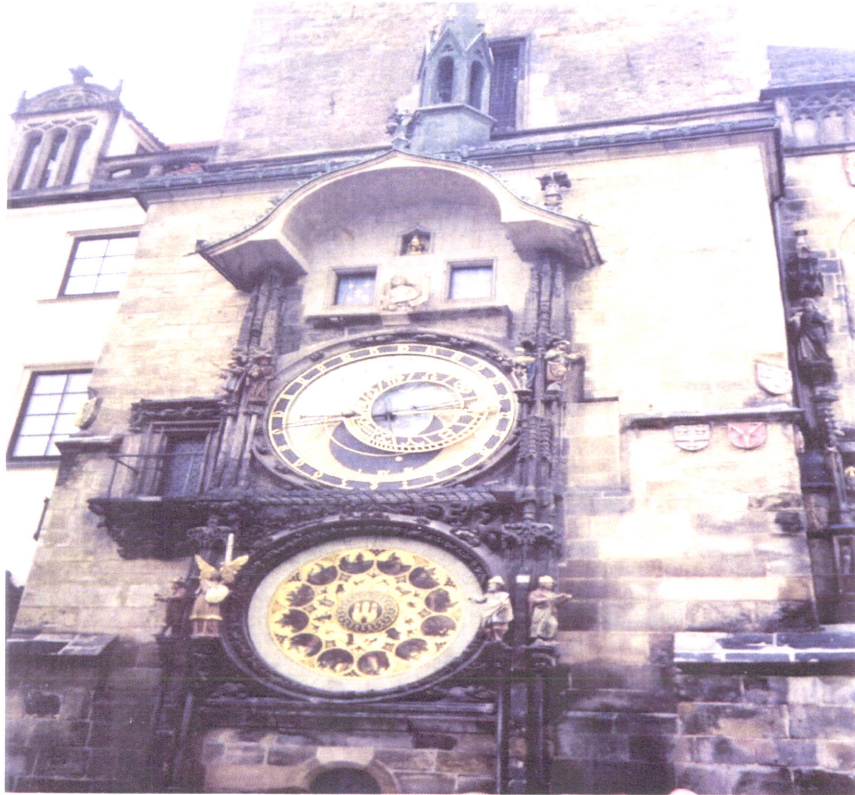


Figura 1- Relógio de Praga

*De hora a hora, a magia reina na praça central da bela cidade de Praga. Há um relógio que repica e mostra as horas, a posição do Sol e as fases da Lua.*

*Ao mesmo tempo, doze apóstolos e outras pequenas figuras organizam-se em movimentos harmoniosos.*

*Os apóstolos movimentam-se ao sabor de uma engrenagem formada pela parafernália de rodas e pesos que se move desordenadamente.*

*Com os seus admiráveis movimentos, o relógio de Praga é uma alegoria da Segunda Lei da Termodinâmica...*



## Capítulo 1 – Introdução

“Desconhecer a 2ª Lei da Termodinâmica é como nunca ter lido uma obra de Shakespeare”

C.P.Snow<sup>1</sup>

Cultura foi, durante muito tempo e, continua a ser para algumas pessoas, sinónimo de uma obra de literatura, de um quadro ou de uma ópera, mas não de uma lei da Física. Mas porque não atribuir a uma obra da Física o mesmo estatuto da arte ou da literatura? Há leis, como a segunda lei da termodinâmica, que não deveriam estar encerradas no universo dos físicos, mas ser exibidas a todos como uma questão de cultura. Talvez seja neste sentido que Snow afirma que “Desconhecer a 2ª Lei da Termodinâmica é como nunca ter lido uma obra de Shakespeare”. Afinal, esta é uma lei que interessa a todos, já que mais não seja porque dá uma forte indicação do decurso dos acontecimentos. O desenvolvimento da mesma fez emergir novas questões sobre o que é uma lei física, estando na base da incorporação da noção de devir na evolução dos sistemas físicos. Ao se desenvolver, a segunda lei da termodinâmica fez, também, nascer um novo conceito. Com o surgimento deste, a lei tomou uma nova forma, indicando que muito provavelmente amanhã haverá mais entropia do que hoje.

E o que é a entropia? Esta é a questão mais óbvia que poderá levantar alguém que leia o parágrafo anterior e nunca tenha ouvido falar em tal, ou talvez até quem já tenha ouvido algo acerca do assunto...

O «Romance da Entropia» pretende explicitar algumas das problemáticas que levaram à emergência do conceito de entropia, tentando exibir a pertinência, o significado e o valor do mesmo. Atendendo ao carácter pedagógico da narrativa em questão, tentar-se-á fazê-lo de uma forma clara, simples e rigorosa. A História da Ciência é a única via possível para escrever um romance destes, em que o par romântico é substituído pela empolgante evolução de um conceito científico. Através desta via tentar-se-á explorar como a questão, “O que é o calor?” (aparentemente ingénuo) despontou inúmeras novas questões que

---

<sup>1</sup> Citado por Atkins (2003, p.129)



conduziram à segunda lei da termodinâmica e ao conceito de entropia. Claro que tais questões contam com o pensamento de muitos Homens que, contribuindo com as suas ideias, enriqueceram o mundo da Física com tão especial conceito. Homens de todas as nacionalidades que ultrapassaram muitas vicissitudes até que o nome *entropia* surgisse. Homens que faziam avançar e recuar as suas próprias ideias, que concordavam e discordavam com as ideias de outros. Enfim, Homens que muito se esforçaram até que uma resposta pertinente surgisse para a ingénua questão, “O que é o calor?” Mach, citado por Valente (1999), reconhece a satisfação de se poder reflectir acerca das diferentes ideias dos muitos Homens que contribuem para a construção de um conceito ou lei científica:

... Devemos considerar como um golpe de sorte que o desenvolvimento da ciência não esteja limitado a uma nação ou a um cérebro; e devemos reflectir sobre as diferentes formas em que estas ideias foram adoptadas por diferentes investigadores com diferentes características pessoais, o ganho que foi acrescentado à ciência através destas diferenças, e o ganho acrescentado à teoria do conhecimento. (p. 496).

Como este é um romance que trata do nascimento de algo, coloca-se a questão; quem são os seus pais e padrinhos? Bem, pais são muitos, o que vai ao encontro do parágrafo anterior e deles se irá falar no desenrolar da trama. Quanto a padrinhos, aqueles que dão um nome, há um que pode ser enumerado. Trata-se de Rudolf Clausius sobre o qual, M.Osietki no livro, *Thermodynamics: History and Philosophy* (p.59), emite a sua opinião de que a escolha do nome terá recaído sobre entropia para que fosse utilizado em todas as línguas sem alteração, incluindo o inglês. Não sendo este um nome vulgar, é importante para a compreensão de todo o enredo começar por traduzir a palavra entropia. O nome do conceito protagonista é de origem grega e em português significa transformação.

A história terá início no séc.XVIII, havendo ao longo do seu desenvolvimento, incursões a séculos passados, vindo acabar no séc.XX. Toda a situação histórica, política e social do mundo influenciou o desenvolvimento do conceito em causa, sendo verdade também o inverso, ou seja, o desenvolvimento deste conceito também tem vindo a ter implicações sociais ao longo dos séculos. Por este motivo, far-se-á sempre que possível, algumas incursões aos contextos político-sociais.

O «Romance da entropia» estará dividido em quatro partes e, atendendo à pretensão de que esta narrativa tenha o carácter de romance, optámos por descrever aqui o corpus de cada um deles. Desta forma;

## Capítulo 2 – O conde de Rumford, a fábrica de canhões e a cosmologia do calor

Este capítulo dá o mote para o desenrolar de toda a narrativa. Numa fábrica de canhões, Benjamim Thomson (conde de Rumford) para a questão, “o que é o calor?” entendeu que esta estranha essência deveria ser algo diferente do que era tido até à data. O *corpus* deste capítulo é constituído pelos seguintes livros:

- Baeyer, H. C. (1998). *Warmth disperses and time passes*. Modern Library.
- Laidler, K. J. (2002). *Energy and the unexpected*. Oxford University Press.

## Capítulo 3 – Da técnica à Física

Deste capítulo extraem-se dois pontos altos da narrativa. O primeiro diz respeito à construção e aperfeiçoamento da máquina a vapor e o segundo aos extraordinários estudos de Sadi Carnot. O *corpus* é formado pelos livros:

- Atkins, P. W. (1994). *The 2<sup>nd</sup> Law: Energy, Chaos and Form*. Scientific American Library.
- Baeyer, H. C. (1998). *Warmth disperses and time passes*. Modern Library.
- Cardwell, D. (1994). *The Fontana history of technology*. Fontana Press.
- Cardwell, D. S. L (1971). *From Watt to Clausius: The rise of thermodynamics in the early industrial age*. Heinemann Educational Books Ltd.
- Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Alianza Editorial.
- Laidler, K. J. (2002). *Energy and the unexpected*. Oxford University Press.

## Capítulo 4 – Todos os caminhos vão dar à entropia

Aqui surge o momento mais esperado de todo o romance. Depois de Mayer e Joule, terem deixado no ar trabalhos que contribuiriam para o enunciado da primeira lei da

termodinâmica, Rudolf Clausius dá nome à entropia. Um pouco antes, William Thomson (lorde Kelvin) havia entrado em cena, agoirando uma terrível morte térmica para o Universo. Do *corpus* do capítulo fazem parte, essencialmente, os seguintes livros:

- Atkins, P. (2003). *EL dedo de Galileu: Las diez grandes ideas de la ciencia*. Editorial Espasa Calpe, S.A.
- Baeyer, H. C. (1998). *Warmth disperses and time passes*. Modern Library.
- Laidler, K. J. (2002). *Energy and the unexpected*. Oxford University Press.
- Smith, C. (1998). *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. Londres: The Athlone Press.

### **Capítulo 5 – O demónio que brinca com moléculas e a inevitável incerteza**

Neste capítulo é posta em marcha a preciosa «experiência pensada» de Maxwell. Há um simpático demónio que passa a fazer parte da história e que distingue a natureza da segunda lei da termodinâmica da de todas as outras leis. Maxwell e Boltzmann são os personagens principais desta parte da narrativa. O último, explora o conceito de entropia a nível microscópico. A segunda lei da termodinâmica, com a sua diferente natureza toma uma nova forma, relacionada com o ínfimo mundo dos átomos. O «Romance da Entropia» termina no final deste capítulo com ilustrações da verificação da referida lei, em diferentes situações. O *corpus* do capítulo conta com os seguintes livros:

- Atkins, P. (2003). *EL dedo de Galileu: Las diez grandes ideas de la ciencia*. Editorial Espasa Calpe, S.A.
- Baeyer, H. C. (1998). *Warmth disperses and time passes*. Modern Library.
- Gribbin, J. (2004). *Deep Simplicity: Chaos, complexity and the emergence of life*. Londres: Penguin books.
- Laidler, K. J. (2002). *Energy and the unexpected*. Oxford University Press.
- Smith, C. (1998). *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. Londres: The Athlone Press.

## Capítulo 2 – O conde de Rumford, a fábrica de canhões e a cosmologia do calor

“A frase mais excitante que se pode ouvir em ciência, a que anuncia novas descobertas não é «Eureka» (encontrei) mas sim «que estranho»...”

Isaac Asimov <sup>1</sup>

### 2.1. Benjamin Thomson ascende a conde de Rumford



Figura 2- Benjamin Thomson<sup>2</sup>  
(1753-1814)

Corria o ano de 1796 quando o conde de Rumford decidiu voltar à cidade que já o havia acolhido e através da qual ele tinha mostrado que era capaz de praticar o bem, apesar de nem sempre o demonstrar... Esta cidade era Munique e, situada na Baviera, atravessava agora tempos difíceis. Após e durante a Revolução Francesa (1789-1795), vários países da

---

<sup>1</sup> Citado em <http://www.h2o.freehosting.net/>

<sup>2</sup> Imagem retirada do livro de Laidler (2002, p. 9)

Europa combatiam as forças republicanas francesas e um destes países era a Áustria. Apesar da Baviera se encontrar fora dos conflitos, temia que fosse invadida devido à sua situação geográfica, estando posicionada precisamente na linha de fogo dos conflitos entre os franceses e os austríacos. Com a fuga do rei que se sentia ameaçado pelos dois países em guerra, o conde de Rumford ficou responsável pela defesa de Munique de possíveis invasões e o que é certo é que tal trouxe grandes contributos para o reino da Física...

O conde de Rumford não era conde de nascença, aliás, segundo Laidler (2002, p.8), este homem cujo nome de nascimento era Benjamin Thomson, nasceu numa família modesta que mantinha uma pequena quinta, no ano de 1753, em Massachusetts. Em 1771 casou-se com uma senhora viúva de algumas posses e a sua residência passou a ser em New Hampshire, na casa que já pertencia à sua mulher e que tinha o nome de Rumford. Este casal não foi, no entanto, feliz para sempre!

Laidler (2002, p.13), refere que William H. Brock, num artigo de 1980, terá descrito Benjamin Thomson como “um realista, traidor, espião, (...) oportunista, (...) filantropo, egoísta, maçador, (...) militar, (...) inventor, plagiário, especialista no calor (...) e fundador de um dos maiores locais de exibição do mundo para a popularização da ciência; a «Royal Institution»”.

Este parêntesis na história serve para ajudar a conhecer um pouco melhor esta personagem e para diminuir a desilusão que se segue; no ano de 1776, Benjamin Thomson abandonou a sua mulher e a filha bebé de ambos para viajar até Inglaterra e aí permanecer durante algum tempo. Por esta altura, a revolução da Independência Americana (1775-1783) estava no seu auge e segundo Laidler (2002, p.10), Thomson forneceu valiosas informações ao governador de Inglaterra acerca da situação na América. Benjamin Thomson actuava como um espião! Desta forma, ele conseguia importantes contactos, entre os quais se encontrava o Rei Jorge III. Mas o seu tempo não era ocupado apenas com estas actividades pouco lícitas. Benjamin Thomson era também um homem que se interessava pela ciência, pelo que aproveitou a estada em Inglaterra para desenvolver algum trabalho nesta área. Laidler (2002, p.10), relata que graças a variadas experiências que fez com pólvora, foi eleito sócio da *Royal Society*, em 1781.

Apesar da sua traição, no ano de 1782 regressou ao seu país, local onde não permaneceu durante muito tempo. Passados dois anos, em 1784, fez uma nova viagem e desta vez até à Baviera. Neste país fez jus à característica de filantropo atribuída por Brock.

Segundo Laidler (2002 p.10), a Baviera atravessava uma altura difícil, marcada por uma grande pobreza e violência nas ruas de Munique. Thomson que nem sempre conseguia fazer a felicidade dos outros, neste período da sua vida melhorou a situação de muitos, fazendo algumas reformas a nível social e económico na Baviera. Por tão grande contributo prestado, foi promovido a general maior do exército da Baviera, ministro de guerra, camarista real, conselheiro privado e chefe da polícia. A gratidão para com ele era tão grande que todos estes cargos não bastavam e Benjamin Thomson atingiu o seu auge ao ser feito conde! E é assim que a partir daqui, passa a existir um conde nesta história e Benjamin Thomson passar-se-á a chamar conde de Rumford. O nome que aparece a seguir ao título foi escolhido por ser o nome da residência de Benjamin Thomson nos tempos em que era casado.

## **2.2. Os canhões a rodar e a água a aquecer**

Laidler (2002, pp.10,11), relata que este conde (um pouco instável), voltou a Inglaterra, onde permaneceu nos anos de 1795 e 1796. Durante este período desenvolveu alguma pesquisa científica relacionada com a luz e com o calor, o que lhe valeu a atribuição de várias medalhas.

Ainda no ano de 1796 o conde de Rumford voltou à Baviera. Por esta altura, em França ocorriam sucessivos movimentos revolucionários que viriam a ficar conhecidos por Revolução Francesa (1789-1799). Napoleão Bonaparte ascendeu ao poder e alimentou a ambição de anexar toda a Europa, sonhando com um império que se estendia de Lisboa a Moscovo. Marcado pela instabilidade e por conflitos constantes, este foi um período crítico para todos os países da Europa. A Áustria era um dos países que fazia parte da coligação que enfrentava França e os conflitos entre austríacos e as forças Republicanas Francesas eram inevitáveis. A Baviera, não conseguindo evitar a situação geográfica que a coloca entre a França e a Áustria, temia vir a sofrer com os conflitos entre estes dois países. Quando o conde chegou a Munique a situação era esta; o rei, sentindo-se ameaçado pelos dois países em guerra, havia fugido e, segundo Laidler (2002, p.11), Rumford foi eleito governador geral, comandante chefe do exército da Baviera e presidente do Conselho de

Regência, responsável pela defesa de Munique. Ciente do seu papel, o conde preparava-se para defender a cidade de possíveis conflitos.

E assim começou a saga... Citando Baeyer (1998, p.3), “o propósito imediato de fazer canhões não era satisfazer a curiosidade científica mas matar franceses”!

Tudo começou quando o conde de Rumford, preocupado em cumprir a missão que lhe havia sido confiada, decidiu, como relata Laidler (2002, p.11), actualizar a artilharia e em particular, preparar-se para o fabrico de canhões. Estava tão empenhado em cumprir da melhor forma o papel que lhe havia sido legado que fazia questão de supervisionar a perfuração dos canos dos canhões. Laidler (2002, p.11), descreve que cada cano era moldado na forma de um cilindro sólido e para ser perfurado prendia-se horizontalmente a um torno mecânico. A broca perfuradora era feita de aço e fixava-se de modo a ficar imóvel, até que um parafuso muito pesado a empurrava em direcção à parte da frente do cano do canhão. Ao mesmo tempo, este último rodava em torno do seu eixo, conseguindo dar cerca de 32 voltas num minuto, à custa do esforço de dois cavalos.

E assim o cenário ficava pronto para o conde esboçar importantes avanços relacionados com o calor...

Baeyer (1998, p.4), descreve o conde como um homem de olhos de cor azul intenso e uma permanente expressão de reticência e de suave desaprovação. Em relação ao seu ar distante, Baeyer (1998, p.4), diz que era o preço a pagar por um tal poder de concentração que lhe permitia reflectir sobre a natureza das coisas até num ambiente como o de um fábrica de canhões!

Bem, mas afinal sobre o que reflectia o conde de Rumford?

O facto de uma grande quantidade de calor ser criada devido ao movimento de fricção entre o cano do canhão e a broca perfuradora aguçou a curiosidade científica do conde. Há que lembrar que Rumford também era cientista e que uma das insígnias atribuídas pela Royal Society, no ano anterior, era devida à pesquisa que havia desenvolvido na área do calor. Segundo Baeyer (1998, p.5), esta entidade misteriosa despertava a curiosidade e o encanto de Benjamin Thomson desde muito cedo e a busca da resposta à grande questão, “O que é o calor?” acompanhou-o toda a vida.

Segundo Baeyer (1998, p.5), ao presenciar a perfuração de canhões, o que mais motivou o conde, levando-o ao ponto de engendrar um aparato experimental naquela fábrica foi a vontade de saber “que quantidade de calor conseguiria ser produzida a partir

do movimento de fricção entre dois metais” (tal como o canhão e a broca). Para levar a cabo os seus intentos, o conde de Rumford terá moldado um cano de canhão com uma forma especial, de modo a que este não permitisse grandes perdas de calor. Construiu, também, uma broca diferente, imaginada de modo a permitir uma maior fricção entre ambos. Mas então como medir a quantidade de calor criada através do movimento de fricção?

De facto, este conde foi ímpar nas suas experiências, tendo em conta que o laboratório era uma fábrica de canhões!

Para conseguir dar resposta às suas próprias questões, mergulhou o engenho (a parte da frente do cano do canhão e a broca) num tanque com água e, mergulhando a mão no interior deste comparava a temperatura da água com a da parte do cano do canhão que havia ficado de fora. Desta forma, ele conseguia perceber que a temperatura da água estava a aumentar e que havia libertação de calor, proveniente do movimento de fricção.

Baeyer (1998), refere que o conde de Rumford enviou, mais tarde, um relatório à *Royal Society* onde escreveu que;

... Eu compreendi, colocando a minha mão dentro de água e tocando o exterior do cilindro, que o calor era gerado e isto não foi muito antes da água que rodeava o cilindro começar a ficar morna. E quase que dá vontade de imaginar o conde de Rumford a saltar de alegria quando... após 2 horas e 3 minutos ter REALMENTE ENTRADO EM EBULIÇÃO. Seria difícil descrever a surpresa e a admiração expressa nos semblantes dos espectadores, ao verem que tão grande quantidade de água fria tinha aquecido e tinha entrado em ebulição, sem a existência de fogo. (p. 5)

A surpresa no semblante dos que assistiram a tal espectáculo, reflecte que o conhecimento científico não se constrói baseado em ideias predefinidas, revelando-se frequentemente algo estranho e inesperado. Citando Isaac Asimov, “A frase mais excitante que se pode ouvir em ciência, a que anuncia novas descobertas não é «Eureka» (encontrei) mas sim «que estranho»...” A surpresa dos que assistiram ao aquecimento da água, sem a presença do fogo, parece ser a ilustração desta frase. A cosmologia do calor desenhava-se na fábrica de canhões, mas da forma mais estranha que qualquer um dos presentes pudesse imaginar.



### 2.3. Os mágicos fluidos imponderáveis

A partir daqui, o conde teria que optar por; explicar esta produção de calor ilimitada à luz das teorias vigentes ou seguir um caminho defendido por alguns, mas que não era o aceite.

Mas, afinal, quais eram as teorias já existentes acerca do calor?

Citando Gibert (1982, p.217), “a noção de calor temo-la de há muito, desde o primeiro homem que se encostou a uma rocha virada ao Sol: aquecia-se!”

Não deve ser falso afirmar que o calor é um dos mais maravilhosos mistérios do Universo. Dada a sua importância e natureza enigmática, o calor consegue exercer o mesmo fascínio na mente ingénuo da mais tenra criança que na mente expedita de um cientista. Despertando a curiosidade de muitos, ao longo dos tempos, várias teorias sobre a natureza desta dádiva que tanto conforto pode dar ao Homem, foram surgindo.

E agora uma pequena viagem no tempo...

Desde tempos imemoriais a magia andou ligada à arte de fazer filtros, bebidas mais ou menos envolventes (e eficientes) e essa arte repartiu o domínio da “química” com as receitas, essencialmente herméticas, destinadas ao fabrico do ouro a partir de fontes menos nobres e, até, à produção do elixir da longa vida... (p.151).

A citação de Gibert (1982) retrata a magia da alquimia, ao mesmo tempo que dá a conhecer o berço da Química. Já nestes tempos imemoriais, em que se tentava fabricar ouro e elixires milagrosos, existiam teorias acerca da natureza do calor. Para os alquimistas, o calor era imaginado como um fluido de natureza material, a que se dava a denominação de flogisto. Este fluido estava presente nos bons combustíveis e era libertado durante a combustão.

No longínquo século V a.C., também o filósofo grego, Empédocles, se debatia com os mistérios do calor. Com este filósofo nasceu a famosa teoria segundo a qual tudo é composto por quatro elementos- fogo, ar, água e terra. O antigo filósofo pensava no calor como um dos constituintes da matéria e, à semelhança dos alquimistas, também Empédocles lhe atribuía uma natureza material. A visão materialista do calor, com nomes como os de flogisto e de calórico em destaque, reinou até ao século XIX, como é salientado por Gibert em diferentes citações. Citando Gibert (1982, p.153) acerca da teoria do flogisto,

“Esta estranha teoria dominou de tal modo certos químicos que no princípio do século XIX ainda era aceite por muitos” Gibert (1982), dá, também, a conhecer um tratado de Física de 1803 onde se pode ler;

O que se chama vulgarmente FOGO não é mais do que um corpo em brasa (...) a sua causa é uma verdadeira matéria (...) é um fluido muito subtil, muito raro e muito elástico (...) ao qual se tem dado sucessivamente os nomes de princípio inflamável, princípio do calor, matéria do calor e que os modernos chamam calórico. (p. 220).

No séc.XVIII, a teoria vigente e considerada moderna era a do calórico. Segundo esta teoria, o calor era visto como um fluido invisível e imponderável, que tinha o nome de calórico. O termo imponderável indica que além de não ter massa, o calor era, também, muito subtil. Subtileza esta que lhe permitia entrar e sair até dos corpos, com a capacidade de passar por entre os interstícios mais apertados. Citando Atkins (2003):

Há alguns séculos muitos pensavam que o calor era um fluido chamado *calórico*, (...) um dos fluidos imponderáveis (sem peso) tão queridos dos investigadores antigos (...) assim como «subtil» no sentido em que podia penetrar em qualquer sítio, inclusivamente através de partículas muito apertadas entre si. (p. 117).

Como substância material que era, o calórico tinha a propriedade de se conservar. Carnot, ao longo da sua obra, ilustra esta propriedade do calórico sempre que descreve a produção de força motriz como resultado do transporte de calórico de uma zona mais quente para outra mais fria. Citando Smith (1998, p.90), “... Carnot (...) representava o calor em termos de uma ‘função de estado’, de forma a que a quantidade de calor no início e no fim de um ciclo de operações era igual.” Este detalhe enganoso e que provinha da crença do calor como matéria, foi o responsável por algumas noites de insónia de William Thomson; afinal, o calor conserva-se ou converte-se?! Segundo Baeyer (1998, p.8), o calórico tinha, ainda, a propriedade de se repelir, da mesma forma que um fluido com propriedades eléctricas. Assim, a adição de calor à matéria deveria resultar numa expansão do material, o que estava de acordo com a experiência de todos. Este era um ponto a favor para a teoria do calórico. Apesar do sucesso desta teoria, o Homem acabou por dar conta de que o calor não poderia ser uma substância e a comprová-lo estão as tarefas mais simples do dia a dia. Basta pensar, por exemplo, que o calor não se consegue fechar numa simples garrada de plástico, tal como se faz com a água. Citando Atkins (1984):

A visão do início do século XIX era a de que o calor era matéria, o fluido imponderável “calórico”, mas agora sabemos que não existe tal “coisa” como calor. Não se consegue isolar o calor numa garrafa ou despejá-lo de um bloco de metal para outro... (p. 23)

## 2.4. Calor: matéria ou movimento?

E agora de volta à fábrica de canhões...

Os defensores da teoria do calórico encontravam uma explicação para a experiência do conde que estava de acordo com o carácter material do calor. Segundo esta visão, o movimento de fricção entre o cano do canhão e a broca perfuradora provocava uma contracção destes materiais. Tal contracção fazia com que o calórico saísse do interior dos corpos para o exterior. O estranho acontecimento estava explicado: o aquecimento da água do tanque era devido à quantidade de calórico que se «escapava» para o exterior. O conde é que não ficou convencido! Após os seus esforços em maquinar um estratagemas que provocasse a agitação da água, estava certo de que esta mesma agitação deveria ser a responsável pelo aumento da temperatura. Se se tratasse de uma substância material, o calor produzido deveria ter um limite, ao invés de se libertar uma tão grande quantidade, sem qualquer enfraquecimento. Para que se acompanhe o raciocínio do conde de Rumford, é importante ler uma outra passagem do seu relatório dirigido à *Royal Society* e que Baeyer (1998), dá a conhecer;

Depois de meditar sobre os resultados de todas estas experiências, somos conduzidos àquelas grandes questões que são tantas vezes o tema de especulação entre os filósofos; o que é o calor? Existe alguma coisa que possa ser chamada com propriedade de calórico? (...) Vimos que uma quantidade considerável de calor pode ser libertada com a fricção de duas superfícies metálicas sem interrupção ou enfraquecimento (...) É rigorosamente necessário acrescentar que qualquer coisa como um corpo isolado que pode continuar a fornecer algo sem limite não pode ser uma substância material e a mim parece-me extremamente difícil, senão perfeitamente impossível, formar uma ideia diferente de algo susceptível de ser excitado e comunicar tal excitação sob a forma de calor (...) excepto se for movimento.(p. 8).

O conde explicava, assim, os resultados da sua experiência e refutava, ao mesmo tempo, a teoria do calórico. Neste relatório, ele foca um ponto que realça a incoerência entre os resultados da experiência realizada na fábrica de canhões e a teoria do calórico. Quando se fala de uma substância material, fala-se de algo finito e que, como tal, ao fim de um certo tempo enfraquece até se esgotar. Com a experiência da fábrica de canhões, o

conde cientista testemunhou uma libertação de calor ilimitada sem qualquer enfraquecimento ou interrupção. Não existindo qualquer outra fonte plausível para a produção de calor, acreditava que o mesmo se devia ao movimento provocado no interior do tanque com água. Assim, o calor não deveria ser uma substância material, mas sim, movimento!

Bem, mas este conde que não fique com os louros da glória sozinho! A hipótese de que o calor é uma forma de movimento já havia sido proposta séculos antes de Benjamim Thomson a anunciar. Segundo Baeyer (1998, p.9), a hipótese terá surgido, talvez pela primeira vez, no século XII. Um pouco mais tarde, por volta de 1600, o filósofo inglês Francis Bacon também terá alvitado que o “calor é um movimento de expansão, não uniformemente de todo o corpo como um todo, mas de pequenas partes dele”. (Baeyer, 1998, p.9). Cardwell (1971, p. I), faz um apontamento sobre este assunto e refere que Bacon estava longe de compreender qual o verdadeiro significado do calor e o que verdadeiramente se escondia por detrás da sua afirmação. Para Bacon, esta sentença significaria algo semelhante a dizer que o calor pertence ao grupo dos fenómenos que normalmente se classificam como movimento, tal como se classificam os leões como membros da família dos gatos. Baeyer (1998, p.9) aponta ainda mais um nome; trata-se de Robert Hooke, um físico inglês do século XVII e que, segundo Baeyer, mantinha uma certa rivalidade com o físico Isaac Newton. Robert Hooke terá, então, afirmado que “...o calor não é mais do que uma ágil e veemente agitação das partes de um corpo...” A esta lista de nomes que defendiam que o calor era movimento, Laidler (2002, p.7), ainda acrescenta mais dois físicos ingleses do século XVII; Robert Boyle e Isaac Newton. Estes terão mesmo pensado no calor como um movimento de átomos constituintes da matéria e Laidler (2002) dá a conhecer uma passagem do filósofo inglês do século XVII, John Locke, onde terá concretizado a visão de Boyle e Newton acerca do calor;

O calor é uma ágil agitação das partes insensíveis de um corpo (átomos), a qual produz em nós aquela sensação a partir da qual dizemos que um objecto está quente; então aquilo que na nossa sensação é calor, no objecto não é mais do que movimento” (p. 7, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Acerca de Locke, Laidler (2002, p.7), ainda acrescenta que apesar de hoje ser reconhecido como filósofo, foi também um grande físico e realizou muito trabalho experimental na área da Química.

De qualquer modo, apesar do conde de Rumford não ter sido o primeiro a afirmar que o calor seria movimento, com ele ficou demarcado um ponto importante na História da Ciência e as suas experiências realizadas num laboratório, onde o principal propósito era fabricar canhões, ficaram reconhecidas até hoje. Segundo Baeyer (1998, p.10), a História da Ciência reconhece o conde de Rumford como um dos principais profetas da Termodinâmica (para quem não sabe, a Termodinâmica é a parte da Física que estuda a relação existente entre os fenómenos caloríficos e mecânicos). Para que se compreenda a justiça de tal reconhecimento basta analisar a proveniência da palavra *Termodinâmica*;

*Termo* é uma palavra grega que significa *calor*,

*Dinâmica* significa *movimento*.

Optando pela hipótese de Rumford, que será objecto de desenvolvimento ao longo do século XIX, de que o *calor* é movimento e juntando os dois termos (calor e movimento) surge a palavra *Termodinâmica*. Refira-se que o termo em causa surgiu apenas no século XIX, pelas palavras de William Thomson.

Mas então, terá o acaso de supervisionar uma fábrica de canhões proporcionado a este conde que já havia sido espião, o privilégio de viver experiências que, conjuntamente com o seu interesse teórico pelo calor, o levaram a fazer avançar a ciência, demolindo antigas teorias? Não foi bem assim e para seu descontentamento, a teoria do calórico reinou ainda durante muito tempo após a realização da sua experiência.

Depois do conde de Rumford ter dado a conhecer os resultados da aventura científica vivida na fábrica de canhões e de lhes ter dado a sua própria interpretação, a teoria do calórico caiu um pouco em descrédito. Esta última era defendida por alguns químicos, entre os quais se encontrava o conceituado cientista francês, Antoine Lavoisier, conhecido como o pai da química moderna. Para estes químicos o calor era visto como uma substância a par do hidrogénio, do oxigénio ou do azoto. Apesar do conde ter provocado uma certa oscilação nos alicerces da teoria do calórico, a mesma conseguiu vingar durante muito tempo. Segundo Laidler (2002, p.12), o cepticismo com que o seu trabalho foi recebido pode ter ficado a dever-se à sua impopularidade como pessoa. Parece que o conde nem sempre era muito agradável e alguns chegavam mesmo a considerar o seu comportamento insuportável.

## 2.5. Afinal o que é que se movia?

Para Baeyer (1998, p.10), o facto desta nova visão do calor não ter caído nas boas graças dos cientistas assim que a ouviram, fazendo esquecer a antiga teoria do calórico, pode ter ficado a dever-se não ao que o conde havia dito, mas sim, àquilo que ele não havia explicado.

Com esta afirmação de que o calor era uma forma de movimento, questões surgiam na mente dos que se interessavam pelo assunto e o conde de Rumford parecia não encontrar respostas. A questão mais óbvia era a de saber o que é que afinal se movia! Mentes mais sagazes ficaram excitadas de curiosidade perante a teoria de Rumford. Baeyer (1998), refere alguns exemplos de questões que provavelmente pairavam no ar e para as quais o conde não encontrava explicação; onde é que se daria o tal movimento e como? Será que este movimento se conseguia ver ou sentir, tal como se sente o calor? Como é que se poderia medir tal movimento? Baeyer (1998), relata que a questões deste género o homem que tão bem engendrou um laboratório numa fábrica de canhões terá respondido;

Estou muito longe de pretender saber como (...) é que aquele tipo de movimento tão particular nos corpos, o qual se supôs constituir o calor é excitado, duradouro e propagado (...) e não devo confundir o leitor com meras conjecturas.  
(p. 10)

Com tanto por explicar, o conde de Rumford ficava privado de uma gloriosa vitória no campo do calor! Mas afinal, qual era a chave que lhe faltava para conseguir construir uma teoria consistente, em que não existissem tantos enigmas aparentemente sem solução? Talvez o único azar de Benjamim Thomson tenha sido viver tão cedo! A chave que lhe faltava era a descrição da matéria como constituída por pequeníssimas partículas denominadas átomos! Se Rumford tivesse considerado como legítima a teoria atómica da matéria, decerto que saberia responder às questões que surgiam (provavelmente até na sua mente). Afinal o tal movimento de que ele falava era o movimento dos átomos que constituíam o metal do canhão e da broca perfuradora! Citando Laidler (2002, p.10), “a total aceitação da ideia de que a matéria era formada por átomos, a qual havia sido antecipada por Maxwell no século XIX, teria que esperar até ao século XX”. Apesar de marcar um grande passo na evolução da história do calor, a visão de Rumford sobre o «calor» era bem diferente da actual. Sem retirar o merecido mérito ao conde Rumford, a

verdade é que ele ignorava completamente, “que o calor era o acaso, o estremecimento caótico das moléculas”! Baeyer (1998, p.12). (O sublinhado é da nossa responsabilidade).

## 2.6. A teoria incompleta de Rumford

Bem, só para situar, há que lembrar que todo este rol de aventuras científicas que tiveram lugar na vida do conde de Rumford começou no ano de 1796, quando ele ficou responsável pela defesa de Munique. Passados três anos, Rumford voltou ao país para o qual já havia trabalhado como espião; Inglaterra. Neste ano de 1799, o conde ergueu mais um importante marco na sua vida que haveria de deixar o seu nome reconhecido. Segundo Laidler (2002, p.12), quando Rumford regressou a Inglaterra juntou-se a uma Associação que visava melhorar as condições dos mais desfavorecidos. Não era a primeira vez que o conde dava a conhecer este seu lado caridoso para com o próximo. Afinal, tinha sido uma actividade do mesmo cariz que lhe tinha valido o título de conde. Laidler (2002 p.12), relata que dentro desta Associação, Rumford propôs-se a fundar uma instituição pública que difundisse o conhecimento científico. Nesta, seriam organizados seminários abertos ao público, onde se aplicaria a ciência a actividades com um fim prático. Tal sugestão, conduziu à inauguração da *Royal Institution* no dia sete de Março de 1799, em Londres. Esta instituição ainda hoje existe e o nome do conde de Rumford encontra assim mais um motivo para não ser esquecido.

A natureza de Rumford não lhe permitia permanecer muitos anos no mesmo lugar e em 1804 rumou para Paris. O químico Antoine Lavoisier (1743-1794), defensor da teoria do calórico, era natural deste país, mas, infelizmente tinha morrido de uma forma trágica no ano de 1794. A sua morte foi um infeliz acontecimento que ocorreu em consequência do cargo que desempenhava como Director Geral de impostos em plena Revolução Francesa. Segundo Baeyer (1998, p.12), foi falsamente acusado de corrupção pelos revolucionários franceses que o prenderam e guilhotinaram. Ao que consta, o conde de Rumford tinha gostos semelhantes aos de Lavoisier tanto no campo científico como no pessoal... Quanto à ciência, o conde partilhou com Lavoisier o gosto pelo estudo do calor e tentou destronar a teoria do calórico defendida pelo químico francês. No campo afectivo, Rumford conheceu a *Madame* Lavoisier e desde logo se encantou! Laidler (2002, p.12), relata que o conde

chegou mesmo a casar-se com a viúva em Outubro de 1805. *Madame Lavoisier* é muitas vezes retratada com o seu primeiro marido, Antoine Lavoisier, em laboratórios de Química. Holton et al. (1980, p.7), faz uma referência ao facto da senhora Lavoisier ter sido mais do que meramente a mulher do químico, ela era também a sua assistente. Detentora de uma grande cultura e inteligência, era ela quem traduzia do inglês para o francês os trabalhos científicos para o marido ler. As ilustrações que apareciam nos trabalhos científicos de Lavoisier, eram também uma obra da sua prendada mulher e tais funções, tornavam-na o braço direito do marido. Tal entendimento entre este casal, talvez possa levar a concluir que a senhora Lavoisier Rumford tenha sido mais feliz no primeiro matrimónio... Apesar de se ter casado com um conde e ter, desta forma, contraído o título de condessa, o casamento não durou mais do que quatro anos. Em 1809, Rumford e a viúva de Lavoisier separavam-se oficialmente.

Com dois casamentos oficiais e duas separações conhecidas, a vida do conde terá sido animada por várias aventuras amorosas. Segundo Laidler (2002, p.13), ele terá conhecido bem de perto muitas senhoras da alta sociedade, incluindo algumas condessas da Baviera e *Lady Palmerston*, mãe do primeiro – ministro de Inglaterra entre os anos de 1855 e 1865. Frutos destas aventuras terão sido alguns, pois, parece que o conde de Rumford teve vários filhos ilegítimos. Segundo Laidler (2002, p.13), estes romances do conde não eram duradouros porque a sua personalidade fazia com que o convívio com as pessoas que lhes estavam próximas não fosse muito agradável. Em contraste, Rumford gostava de ajudar aqueles que nem conhecia mas que precisavam de ajuda.

E assim se aproxima do fim a história da recheada vida do conde de Rumford! No dia 21 de Agosto de 1814 ele morreu com 61 anos de idade. Segundo Laidler (2002, p.13), ao seu funeral compareceram poucas pessoas, não constando entre elas nem a filha nem a segunda mulher (a sua primeira mulher já havia morrido).

É justo recordar o nome deste homem como alguém que deu importantes contributos para o desenvolvimento da ciência, ao se interessar pelo calor. Tal interesse traduz uma visão do mundo físico e daí se considerar que com o conde se iniciou uma cosmologia do calor. Apesar de não ter conseguido explicar alguns pontos da sua teoria, deixou um importante legado à história do calor. Segundo Laidler (2002), Jonh Tyndall, um dos directores da *Royal Institution*, terá escrito, em 1871, acerca dos trabalhos do conde que;



Indubitavelmente alguma coisa mais poderosa contra o materialismo do calor foi alegada, indubitavelmente alguma coisa conclusiva na forma de estabelecer que o calor é aquilo que Rumford considerou, movimento. (p. 12)

## Capítulo 3 – Da técnica à Física

“Investigar é ver o que todos já tinham visto e pensar  
o que ninguém ainda tinha pensado”

Albert Szent Gyargi<sup>1</sup>

### 3.1. As exigências da revolução industrial

É certo que o conde foi contemporâneo de duas revoluções sangrentas e com o seu carácter nem sempre irrepreensível, de uma delas chegou mesmo a tirar partido. Fez-se espião, fornecendo valiosas informações aos ingleses e recebeu em troca a amizade mais influente com que algum dia sonhara, a do rei Jorge III. Mas, teve também o privilégio de ser contemporâneo de um outro tipo de revolução que transformou o mundo para sempre. Revolução Industrial foi o termo escolhido pelos historiadores franceses para esta mudança que substituiu a agricultura por fábricas, o trabalho manual por máquinas e que gerou novos meios de transporte. A grande mudança teve início por volta de 1700 na Grã-Bretanha.

As máquinas para manufacturar tecidos foram uma das primeiras novidades apresentadas ao mundo por esta revolução. Até aqui, esta era uma actividade feminina, totalmente manual e que era empreendida nos seus lares. Para a parte da fiação, as mulheres utilizavam a roda de fiar que já existia desde a Idade Média, mas a tarefa não era fácil. Como relata Cardwell (1971, p.67), a fiação dos fios ficava a cargo das mulheres e delas exigia uns bons olhos e uns dedos muito sensíveis. E assim começava a mudar o modo de vida da população da Grã-Bretanha! As mulheres teriam que se habituar a um trabalho diferente daquele que desempenhavam, provavelmente desde a mais tenra idade. Uma outra novidade eram os locais de trabalho; espaços grandes onde reinava um sem número de pesadas máquinas.

---

<sup>1</sup> Citado por Atkins (2003, p. 134)

As modernas e engenhosas máquinas que surgiam tinham um inconveniente; eram muito pesadas porque eram de ferro e, como tal, não havia força humana que conseguisse propulsioná-las. Mas então como accioná-las e colocá-las em funcionamento?! Ou com a «força» dos músculos de alguns pobres animais que tinham que se esmerar para pôr as máquinas em movimento, ou então, recorrendo à maravilhosa e eficiente Natureza! De entre os inúmeros recursos naturais, elegeu-se o movimento da água para fazer funcionar os teares mecânicos. A energia potencial da água, transformada em energia cinética possuía o poder motriz necessário ao funcionamento das máquinas. Assim, uma condição necessária para que uma fábrica se erguesse num determinado local era a existência de um rio na vizinhança.

A produção de algo traz sempre muitas necessidades acopladas e estava a iniciar-se um período em que produção era a palavra chave. Para produzir eram necessárias máquinas e para fazer as máquinas era necessário muito ferro e assim, uma das necessidades que surgia era a extracção e preparação do ferro. Desta forma, a metalurgia aumentava em grande escala. Mas, onde deveria o Homem do séc.XVIII, sedento de progresso ir buscar o ferro de que necessitava? Em primeiro lugar, tinha que se recrutar um grande número de mineiros! Mineiros que teriam que explorar as minas de hematite e de carvão; as de hematite porque é deste minério que se extrai o ferro e as de carvão porque este minério, em conjunto com o primeiro, permite o fabrico de diferentes tipos de ferro. Inerente a esta nova necessidade vinha um problema que, se de início era vislumbrado como uma desgraça, hoje, qualquer um (físico ou não) lhe pode agradecer por ter proporcionado uma invenção que revolucionou e modificou o mundo para sempre. Além da importância desta invenção, ligada a fins práticos, a mesma estaria mais tarde na origem de uma lei que, citando Atkins (2003, p.142) “resume sucintamente o funcionamento do mundo...” Para que a história não se torne misteriosa demais, pode adiantar-se que; a lei de que se fala é a segunda lei da termodinâmica. Quanto à parte do seu papel no funcionamento do mundo, desvendá-la neste momento, seria como ler a última página da história! Mas qual era, afinal, o problema que se relacionava com a extracção dos minérios?

### 3.2. O flagelo das minas alagadas

O problema é que o carvão e a hematite estavam a ficar alagados no interior das minas, dificultando a sua extracção. Escavadas a grande profundidade do solo, as minas eram arrasadas pelas nascentes de água e, citando Duarte-Ramos (1986, p.68), “esta acumulação de águas no fundo das minas constituía um verdadeiro flagelo”. Identificado o problema, resta saber qual foi a grande solução, descrita anteriormente como a responsável por uma mudança no mundo. A água teria, obviamente, que ser retirada do interior das minas! Mas como?! Como é que o Homem conseguiria retirar tão grandes quantidades de água de um local que se encontrava tão abaixo do nível do solo?

Se desde a morte do conde até aqui a história se tornou um pouco vaga, retratando a humanidade em geral, a situação vai mudar através da apresentação de novas personagens (que não são de inventar). O primeiro nome que surge é o de Thomas Savery, um engenheiro militar francês, que se interessou pela resolução do drama das minas alagadas. Fazendo jus à sua formação como engenheiro, arquitectou um estratagema que (pelo menos teoricamente) conseguia elevar a água para fora das minas. O princípio em que se baseava o estratagema é que já não era uma obra do engenheiro, mas talvez de alguns físicos. O termo *talvez* surge porque não há certezas de quando tudo começou, de quando surgiu a grande invenção, mesmo que não tenha sido posta em prática. Segundo Asimov (1987, p.211), o tal estratagema poderá ter sido pensado, originalmente, num dos primeiros séculos depois de Cristo.

### 3.3. A magia do vapor e a força do nada

Asimov refere-se a um inventor grego chamado Héron da Alexandria, que utilizava a pressão do vapor para realizar actividades como abrir as portas dos templos ou mover esferas, deixando a população abismada e provavelmente a pensar que se tratava de obra dos Deuses! Viajando rapidamente ao longo de vários séculos e parando no ano de 1679, surge mais um nome que, segundo Asimov (1987, p.212), também terá entendido o funcionamento da tal máquina que mudou o mundo. Trata-se de Denis Papin (1647-1718), um físico de nacionalidade francesa, que à semelhança de Héron, também percebeu que o

vapor de água tinha poder suficiente para realizar algumas tarefas. Para testar o poder do vapor de água, encheu um tubo com água, aqueceu-o e foi testemunha de algo que já esperava; o vapor de água formado empurrou um êmbolo no interior do tubo. O vapor de água tinha conseguido fazer algo movimentar-se, da mesma forma que tinha aberto as portas dos templos na época de Héron. Acerca de Papin deve contar-se, ainda, que inventou um protótipo da panela de pressão. Asimov (1987, p.212), conta que ele desenvolveu um aparelho em que a água era fervida no interior de um recipiente com uma tampa bem fechada. O vapor acumulado criava uma pressão que elevava o ponto de ebulição da água e, a esta temperatura mais elevada, os alimentos cozinhavam-se mais rapidamente. Não se sabe se Papin era um bom cozinheiro, mas caso esse tenha sido um dos seus atributos, com este aparelho, havia encontrado um aliado que lhe permitiria preparar mais depressa os seus manjares; uma panela de pressão! Papin deve ter continuado a levar a cabo várias experiências relacionadas com o vapor de água, uma vez que, Duarte-Ramos, (1986, p.67), adianta acerca deste físico que, no ano de 1687, enquanto leccionava na Alemanha, terá descoberto que a condensação do vapor de água gerava o vazio<sup>2</sup>. Mas qual era a vantagem do vazio?

Na altura em que Papin fazia esta experiência já um outro físico de seu nome Otto Von Guericke (1602-1686) e de nacionalidade alemã havia descoberto o poder do vazio através de uma experiência que se tornou célebre. Trata-se da experiência dos dois hemisférios; Guericke formou uma esfera a partir de dois hemisférios de cobre e, após a extracção do ar do seu interior com uma bomba manual, através de um orifício existente num dos hemisférios, surgiu o espanto... Nem a força de quatro pares de cavalos puxados em sentidos contrários conseguiam separar os hemisférios, mas assim que algum ar entrava no meio dos hemisférios, estes separavam-se sozinhos! Então, tudo levava a crer (por mais estranho que parecesse) que, o facto de não haver nada no interior daquela esfera produzia uma força de grande intensidade<sup>3</sup>. Citando Duarte-Ramos, “A pressão do ar e o vácuo sugeriam a ideia de produzir «força do nada»...” (1986, p.67)

---

<sup>2</sup> Quando um recipiente que contém vapor de água é arrefecido, dá-se a condensação do vapor e a água volta ao estado líquido. O vapor de água ocupa um volume muito maior do que a mesma massa de água líquida. Assim, quando se dá a passagem do estado de vapor ao estado líquido haverá uma menor ocupação de volume no interior do recipiente, ficando um espaço vazio ao qual se chama vácuo.

<sup>3</sup> À medida que se vai retirando ar do interior de um recipiente (no caso da experiência de Guericke, do meio dos hemisférios), a pressão do ar no interior deste recipiente vai diminuindo. A pressão interior torna-se

Na sala 120, antiga sala de Filosofia Natural, da imponente Universidade de Évora, ainda hoje se pode contemplar um painel de azulejos que retrata a experiência de Guericke. Admire-se, na figura que se encontra abaixo, o modo como os quatro pares de cavalos tentam separar os hemisférios de Guericke. Certamente que este seria um dos temas a tratar nas lições de Filosofia Natural, na Universidade de Évora, no século XVIII, época de que datam estes azulejos.

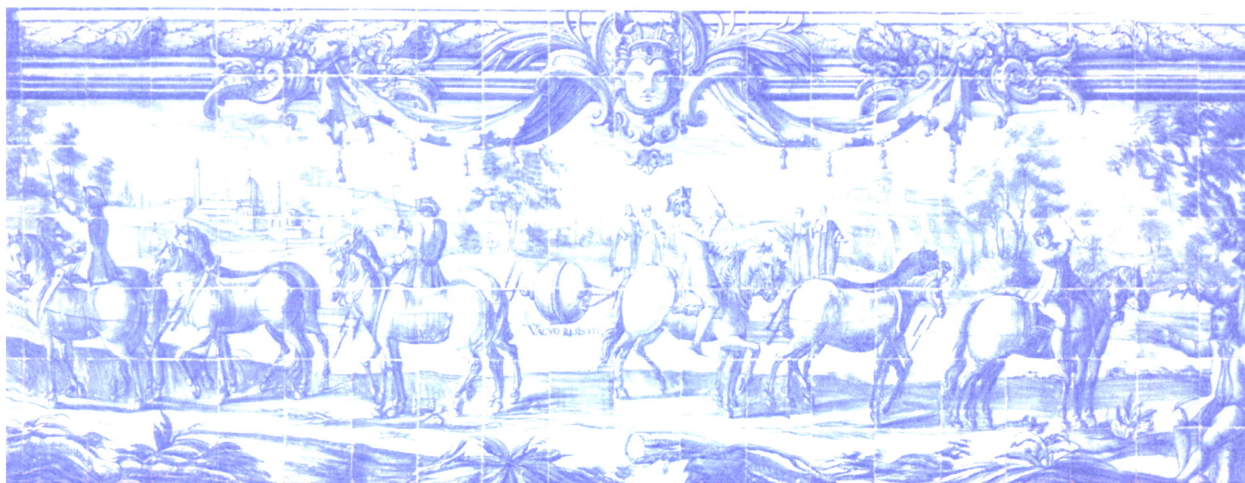


Figura 3 – Azulejos da Universidade de Évora – experiência de Guericke

Com os resultados da experiência de Guericke compreende-se a importância do vazio; este pode ser um recurso para criar uma força intensa! O relato que se segue de Duarte-Ramos, (1986, p.67), parece ser a prova de que o físico Papin poderia ter sido o homem a revolucionar o mundo. Após a realização da experiência que lhe indicou que a condensação do vapor de água poderia ser um meio para produzir o vazio, o físico francês que agora residia na Alemanha para exercer a sua profissão de professor, terá feito uma proposta ao duque de Hesse. Este último aproveitou-a mas de uma forma bem mais modesta do que a que Papin tinha em mente. O físico Papin propôs ao duque a construção industrial de uma máquina que funcionasse a partir da tal força que provinha do vazio (produzido pela condensação do vapor de água). O duque mostrou entusiasmo perante o engenho do físico, imaginando como o seu belo jardim ficaria favorecido se aproveitasse as

---

inferior à pressão exterior e origina-se uma força de grande intensidade. No caso da experiência de Guericke, a pressão exterior exercia sobre os hemisférios uma força de tal intensidade que nem quatro pares de cavalos os conseguiam separar.

argutas ideias de Papin. O único desejo do duque era o de elevar a água de rega do seu jardim e exibi-la nas tantas fontes que ali se encontravam. Papin inventou a tal artimanha que permitia embelezar o jardim do duque. Ao mesmo tempo, deixava de construir a máquina industrial com que sonhava.

### **3.4. Savery e Newcomen entram nas minas**

Interessado pelo drama dos mineiros, o engenheiro inglês Thomas Savery (1650? - 1715) pensou reunir condições para os ajudar e pôs mãos à obra! Recorde-se que os mineiros tinham que enfrentar minas alagadas de cada vez que pretendiam extrair um minério das suas profundezas.

O engenheiro de nacionalidade inglesa, cuja pátria precisava mais do que nunca de minérios para fazer avançar a indústria, engendrou um aparelho que conseguia bombear a água para fora das minas. O funcionamento deste aparelho baseava-se nos princípios já descobertos por Héron, Guericke, Papin e decerto por outros estudiosos que não são aqui focados. Segundo Holton et al. (1980, p.45), a máquina de Savery é denominada por primeira máquina a vapor com sucesso comercial, uma vez que funcionava a partir das potencialidades do vapor exibidas nas experiências anteriormente referidas. Segundo Asimov (1984, p.212), esta máquina foi simpaticamente baptizada por Savery como o «amigo do mineiro», pois o seu fim era o de retirar do interior das minas a água que tanto atrapalhava a função dos mineiros.

O funcionamento da máquina baseava-se em puxar a água do fundo da mina para um cilindro e daqui para o nível do solo. Uma quantidade de água era aquecida numa caldeira e o vapor de água aqui formado passava para um cilindro que continha a água proveniente do fundo da mina. A pressão do vapor que entrava no cilindro empurrava a água através de um tubo e este conduzia-a até ao nível do solo. Em seguida o vapor que ficava no cilindro era arrefecido com água e dava-se a sua condensação, formando-se um vácuo numa parte do cilindro. Posto isto, a tal força vinda do nada surgia (porque a pressão exterior ao cilindro é superior à pressão no interior do cilindro) e forçava a água do fundo da mina a subir para o cilindro. O processo repetia-se várias vezes e a água ia sendo puxada do fundo da mina até ao cilindro e daqui para o nível do solo.

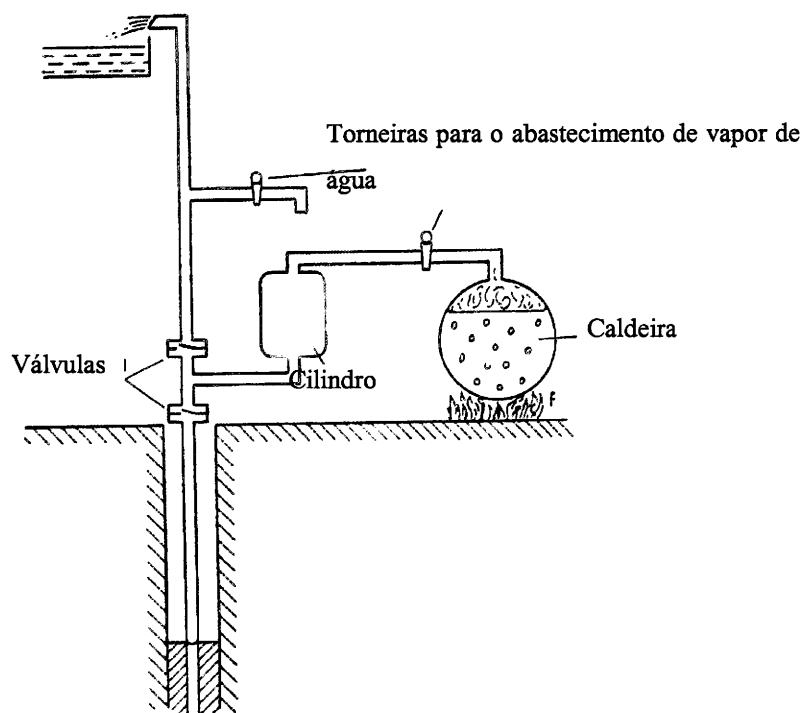


Figura 4 – Máquina de Savery<sup>4</sup>

Pelo relato até parece que tudo estava perfeito e que o drama dos mineiros tinha terminado, mas, não foi bem assim. Segundo Duarte-Ramos, a máquina de Savery não era assim tão amiga dos mineiros como o engenheiro ambicionava. A sua potência era muito fraca e a invenção de Savery não chegou sequer a ter uma aplicação prática nas minas, ficando-se pela tiragem de água dos poços para abastecimento caseiro (1986, p.68). A máquina era pouco eficiente porque, tal como refere Asimov (1984, p.213), o calor proveniente do vapor de água perdia-se de cada vez que o cilindro era arrefecido. Outro grande inconveniente desta máquina prendia-se com o perigo que esta oferecia, uma vez que era utilizado vapor de água a grande pressão, podendo o mesmo rebentar com as tubagens e os depósitos (caldeira e cilindro) da máquina.

Tendo em conta os inconvenientes da máquina de Savery, os mineiros (e todos os interessados no desenvolvimento industrial) continuavam desesperados à espera de algum estratagema mais eficiente a que eles pudessem apelidar verdadeiramente de amigo. E o

<sup>4</sup> Imagem retirada do livro de Cardwell (1971, p.14)



salvador, o homem que conseguiu construir uma máquina mais eficaz para retirar as águas do interior das minas surgiu.

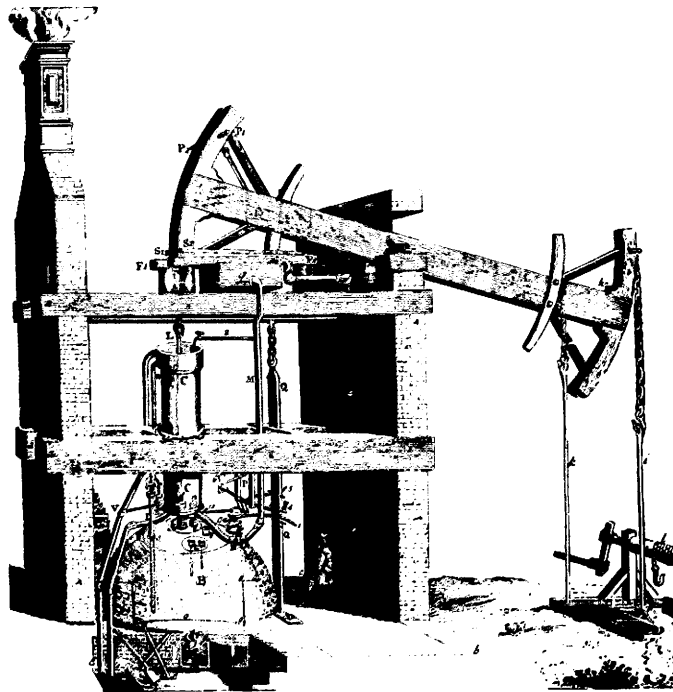
O novo salvador dos mineiros era um modesto ferreiro de nacionalidade Inglesa e cujo nome próprio, por coincidência, era igual ao de Savery; Thomas Newcomen (1664-1729) era o novo nome a fixar por todos aqueles que desejavam salvar os minérios. Duarte-Ramos (1986, p.68) relata que Newcomen visitou as minas de Staffordshire, onde o alagamento tinha proporções dramáticas. Esta visita às minas terá ocorrido por volta do ano de 1690 e, para felicidade dos mineiros, Newcomen era um homem informado. Estava a par das experiências de Papin, o que lhe fornecia o conhecimento de que a partir do vácuo, criado por condensação do vapor de água, se gerava uma força capaz de extrair a água das profundezas das minas. Na posse de tão preciosa informação, Newcomen interessou-se pela resolução do problema que havia presenciado ao visitar as minas.

Uma vez que a máquina inventada pelo engenheiro Savery apresentava dois inconvenientes que a impossibilitava de retirar a água do interior das minas, Newcomen era a nova esperança dos mineiros. Talvez o ferreiro inglês conseguisse construir uma máquina mais eficiente do que a de Savery. A afirmação anterior poderá deixar transparecer a ideia de que o interesse de Newcomen era o de melhorar a máquina de Savery. No entanto, Cardwell (1994, p.121), faz uma nota muito interessante a respeito de tal, dando a conhecer que Newcomen nada sabia acerca de Savery e das suas ideias. O desencontro entre os dois parece quase impossível, uma vez que tanto Thomas Savery como Thomas Newcomen provinham do sul de Devon e que ambos pertenciam a famílias de comerciantes proeminentes.

A invenção de Thomas Newcomen que viria a superar a perigosa máquina de Savery não surgiu de um dia para o outro. Tendo em conta o relato de Duarte-Ramos, poderá inferir-se que Newcomen terá aliado alguma prudência a uma grande dose de persistência ao longo de anos, colmatando com a construção da máquina que ocupava os seus pensamentos desde o dia em que havia visitado as alagadas minas de Staffordshire. No ano de 1702, Newcomen escreveu uma carta ao prestigiado cientista Robert Hooke. A correspondência tinha como fim consultar o cientista acerca da construção de algum tipo de cilindro, através do qual a água da mina fosse forçada a subir. Por detrás deste movimento da água estaria o princípio da «força do vácuo» estudado por Papin e Guericke. A resposta de Robert Hooke é que não foi tão encorajadora como provavelmente Newcomen gostaria.

No entender do grande cientista da época, apesar do princípio que regulava a engrenagem do engenho ter validade científica, ele não aconselhava a construção do mesmo. Posto isto, só alguém com muita persistência e alguma coragem é que levaria o projecto adiante, mas, o ferreiro Newcomen mostrou ser um homem persistente, pois não se deixou desalentar pelo afamado cientista Hooke. Ajudado por um mecânico chamado John Calley, desenvolveu várias experiências relacionadas com a construção do engenho. No ano de 1712 teve a alegria de ver funcionar a sua primeira máquina cuja engrenagem se baseava na formação e condensação do vapor de água. Em 1720, Newcomen atingiu o seu auge, comercializando a sua engrenagem (1986, p.68). Havia algumas diferenças entre esta nova máquina e a anteriormente fabricada por Savery e tais diferenças traduziam-se em grandes vantagens.

Foi referido que a máquina de Savery, além de pouco eficiente era também perigosa, pois o vapor a alta pressão que era necessário produzir para que funcionasse, poderia ser a causa de uma explosão na caldeira ou no cilindro. Na máquina de Newcomen, os riscos de explosão estavam diminuídos porque não era exigida a passagem de vapor a alta pressão para o interior do cilindro. Na sua máquina, havia um braço que de um lado se ligava a um peso e do outro a um êmbolo. Havia, também, um cilindro comprido posicionado por cima de uma caldeira e dentro do qual o êmbolo ligado ao braço se movia. O peso ligado ao braço da artimanha não era mais do que a carga que se pretendia elevar e, se mais tarde a máquina serviu para elevar outro tipo de carga, quando foi concebida a única em que se pensava era a água alojada no fundo das minas. Quando a válvula que ligava a caldeira ao cilindro era aberta dava-se a passagem de uma quantidade de ar à pressão atmosférica para o cilindro e em simultâneo o peso preso a um dos lados da bomba descia, fazendo com que o êmbolo subisse até à parte superior do cilindro. Quando o êmbolo atingia o ponto mais alto do cilindro, uma outra válvula era aberta e uma quantidade de água fria caía sobre o cilindro, permitindo o seu arrefecimento. Com tal arrefecimento, o vapor que estava no cilindro condensava, formando-se um vácuo numa parte do mesmo. Nesta altura, a pressão exterior tornava-se superior à pressão no interior do cilindro, surgindo a tal «força do nada» que era suficiente para fazer com que a carga se elevasse e o êmbolo atingisse o ponto mais baixo do cilindro.



**Figura 5 – Máquina de Newcomen<sup>5</sup>**

A grande diferença entre esta máquina e a de Savery é a de que nesta é utilizada a pressão atmosférica para fazer subir uma carga, enquanto que na de Savery era utilizado vapor a alta pressão para «empurrar» a água desde o cilindro até ao nível do solo. A vantagem era óbvia; não existia mais o perigo de uma explosão na máquina devido à elevada pressão do vapor. Acrescida a esta havia ainda uma outra vantagem; com esta máquina podia elevar-se qualquer carga, enquanto que na anterior a elevação dizia somente respeito à água. Para finalizar a explicação do funcionamento da máquina de Newcomen, resta dizer que a água que ficava no cilindro (resultante da condensação) era drenada para fora deste através da abertura de uma nova válvula. Assim o ciclo estava pronto a recomeçar muitas e muitas vezes!

Citando Cardwell (1994, p.129), a máquina de Newcomen “...satisfazia os três maiores requisitos: era segura, relativamente económica e combatia uma necessidade claramente reconhecida”.

---

<sup>5</sup> Imagem retirada do livro de Purrington (1997, p.81)

Apesar de Newcomen ter inventado uma máquina superior à de Savery, Holton et al. (1980, p.47), relatam uma situação um pouco ingrata para Newcomen. No ano de 1698 a máquina de Savery foi patenteada e, tendo a patente durado 35 anos, Newcomen não conseguiu ganhar dinheiro à custa da sua máquina, pois durante este período de tempo a máquina de Savery gozou de direitos exclusivos. Citando Cardwell (1994, p.129), “O conhecimento tecnológico não estava suficientemente avançado para reconhecer os méritos únicos da máquina de Newcomen...”

Embora mais vantajosa do que a de Savery, a máquina de Newcomen também apresentava inconvenientes. Para elevar uma quantidade não muito grande de carga, consumia-se uma grande quantidade de combustível, pois de cada vez que o braço ia para baixo, tinha que haver um arrefecimento do cilindro para condensar o vapor de água e provocar o vazio. Nos dias de hoje, dir-se-ia que o rendimento da máquina era muito baixo. Aliás, para que haja uma maior precisão, Laidler (2002, p.2) informa que o rendimento desta máquina era de cerca de 1%. Citando Laidler, “ Tendo em conta este baixo valor é surpreendente que algumas máquinas de Newcomen tenham tido um uso prático até à década de trinta do século vinte...” (2002, p.2).

O que é certo é que mesmo com um baixo rendimento estas máquinas marcavam o início de uma nova era. Haveria de chegar o dia (e não estava assim tão longe) em que as mesmas, um pouco melhoradas, proporcionariam até o prazer de viajar, de uma forma mais confortável e rápida do que até aqui.

### **3.5. De uma aula de Física a uma revolução técnica**

Aos dezanove anos o jovem escocês, James Watt (1736-1819), partia para Londres na ânsia de aprender o ofício de fabricar ferramentas. Filho de um carpinteiro e com uma saúde algo débil, James Watt passou a infância no sótão da oficina do seu pai a trabalhar com os utensílios utilizados na carpintaria. Cardwell (1994, p.157) refere que em criança, James Watt mostrava uma habilidade para a matemática pouco comum, um interesse aguçado pela física de Newton e uma grande perícia com instrumentos. É bem possível que a sua vontade de aprender a fabricar ferramentas tenha sido fruto da ligação que com elas tinha e do à vontade com que utilizava tais utensílios.

O ano dourado de James Watt, aquele em que partiu para Londres para aprender a construir ferramentas e passar a praticar o ofício dos seus sonhos, foi o ano de 1755. Ficou um ano em Londres e desejou voltar ao seu país, embora pelo relato de Laidler (2003, p.3) se depreenda que aquando da chegada à Escócia, o pobre Watt tenha tido alguns dissabores, seguidos de anos gloriosos. Agora que havia aprendido o seu ofício de eleição e chegado ao seu país natal, tudo ficaria perfeito após a abertura de um negócio de construção de ferramentas, na cidade de Glasgow. Em virtude da sua inexperiência, Watt teve que enfrentar a associação de construtores de ferramentas da zona que alegavam que ele não poderia abrir um negócio próprio, visto nunca ter trabalhado como aprendiz. O seu desalento não durou muito porque a Universidade de Glasgow ofereceu-lhe a oportunidade de praticar o ofício e Watt depressa se tornou uma pessoa querida neste meio pela sua ingenuidade e persistência. Só para situar no tempo, James Watt foi trabalhar para a Universidade de Glasgow no ano de 1757.

Watt foi um privilegiado em ter recebido a oferta de trabalhar na Universidade de Glasgow, uma vez que segundo Laidler (2003, p.3), nesta altura a Universidade estava recheada de verdadeiros talentos. Será fazer justiça afirmar que a Universidade também foi uma privilegiada ao poder contar com mais um talento chamado James Watt! De entre estes talentosos professores, Laidler destaca o economista e filósofo Adam Smith e o químico Joseph Black que de momento desenvolvia trabalho de grande importância na área do calor. O professor de Física, na altura denominada por Filosofia Natural, chamava-se John Anderson e é este professor que faz a ligação entre Watt e o que o antecede nesta história- as máquinas de Savery e de Newcomen.

Anderson possuía um modelo de uma máquina de Newcomen que utilizava nas suas aulas de Física, com o intuito de explicar aos alunos a engrenagem e os princípios que estavam subjacentes à máquina. Graças a este modelo, James Watt ganhou uma notoriedade que de certeza não passava pelos seus planos quando decidiu ir para Londres aprender o ofício de construtor de ferramentas. O modelo que o professor Anderson possuía da máquina de Newcomen não funcionava bem, o que o impedia de proporcionar, aos seus alunos, as aulas práticas que desejava. Anderson tinha esperança de que Watt o conseguisse ajudar e, de facto não poderia ter feito melhor aposta. James Watt não prestou apenas um favor ao professor Anderson, mas a todos os que ansiavam pelo progresso.

Citando Laidler (2002, p.4), “Enquanto reparava o modelo da máquina de Newcomen, Watt percebeu que este tinha uma falha fundamental.”. Cardwell (1971, p.43) refere que a falha do modelo que levou o professor Anderson a recorrer ao engenhoso Watt relacionava-se com o facto deste funcionar durante algum tempo, ao fim do qual ficava sem vapor e parava. Quando Watt ficou ao corrente da situação não deixou de ficar intrigado; como é que este modelo que supostamente seria uma réplica de uma máquina de Newcomen, que trabalhava satisfatoriamente, poderia ter um desempenho tão inferior ao da máquina real?

Watt, à semelhança de Savery e Newcomen conhecia os trabalhos de Papin e até já tinha desenvolvido algumas experiências baseadas nas do físico francês. Assim, sabia que durante o funcionamento da máquina o vazio era criado através da condensação do vapor de água. Estando igualmente a par do funcionamento da máquina de Newcomen, talvez Watt fosse a pessoa ideal para explicar o porquê da diferença de comportamento entre o modelo e a máquina.

Citando Cardwell (1987),

Watt sabia que o metal frio condensava o vapor e também estava inteirado de que o cilindro pequeno ficaria muito quente quando estivesse cheio de vapor. Por conseguinte ele entendeu que como o volume do cilindro do modelo era muito mais pequeno em proporção do que a área da superfície interior do que era no caso do cilindro grande, o vapor no cilindro pequeno deveria ficar muito mais exposto a uma superfície de metal muito maior, relativamente falando, do que o vapor no cilindro grande. Deveria desta forma arrefecer e condensar muito mais depressa. Assim (...) o cilindro da máquina pequena poderia não funcionar tão eficientemente como o grande. (p. 43).

Este raciocínio de Watt, com o intuito de entender o motivo do modelo ser muito menos eficiente do que a máquina foi o chamariz que precisava para entender que a máquina de Newcomen poderia tornar-se mais rentável. Ele percebeu que o aquecimento e o arrefecimento do cilindro de metal poderia ser o factor que limitava o bom funcionamento do modelo da máquina de Newcomen. Relembre-se que o professor Anderson não conseguia explorar a engrenagem da máquina com os seus alunos, uma vez que o modelo da mesma parava durante o funcionamento. O vapor de água, peça chave para o funcionamento da máquina, gastava-se depressa demais. Segundo Watt, este acontecimento desagradável ficava a dever-se ao facto de, no modelo, o vapor ficar em contacto com uma superfície de metal muito maior do que na máquina. Assim, no modelo, a condensação do vapor era rápida demais, não permitindo que um ciclo de operações

completo ocorresse. Transportando este mesmo raciocínio para o cilindro grande, Watt pensou que talvez fosse possível aumentar a eficiência da máquina de Newcomen.

Para perceber se de facto estava a raciocinar correctamente, Watt deitou mãos ao trabalho e desenvolveu uma experiência que julgou poder fornecer-lhe as pistas de que necessitava. Cardwell (1971, p.44) descreve a experiência de Watt, cujo objectivo era comparar o consumo de vapor em cada ciclo da máquina com o volume de vapor necessário para encher um cilindro igual ao da máquina. Os resultados da experiência mostraram ao astuto Watt algo que ele já esperava; o volume de vapor consumido pela máquina em cada ciclo era muito superior ao volume de vapor necessário para encher o cilindro. Watt sabia que a diferença de valores era devida à quantidade de vapor que era necessária somente para aquecer o cilindro que havia arrefecido após cada condensação. Assim, ele admitia que havia um grande desperdício de vapor porque grande parte era utilizada para o aquecimento do cilindro e, desta forma não se podia esperar que a máquina fosse muito eficiente.

Tendo em seu poder uma pista sobre a causa da ineficiência da máquina de Newcomen, Watt ficou determinado a torná-la mais eficiente. Fez algumas alterações na engrenagem da máquina e com elas, suscitou o nascimento de uma lenda. Citando Cardwell (1987):

A lenda é que Black contou a Watt a sua descoberta do calor latente, e nisso Watt compreendeu a importância de economizar o consumo de vapor enquanto a máquina de Newcomen operava, e para este fim inventou um condensador separado. (p. 41).

O termo lenda surge pelo facto de tal não corresponder à verdade, já que o interesse de Watt pela máquina de Newcomen surgiu com o acaso de ter analisado cuidadosamente o modelo do professor Anderson. Lenda ou não, a história gerada em torno de Watt e Black é de grande interesse, principalmente pedagógico. A mesma, ajuda a explorar conceitos como o de calor latente, capacidade térmica e condutividade térmica, salientando o facto de Watt confundir os dois últimos. Para que melhor se compreenda o teor da lenda há alguns pormenores que têm que ser explicados e a explicação surgirá ao mesmo tempo que se dão a conhecer as alterações de Watt à máquina de Newcomen.

### 3.6. Alterações de Watt à máquina de Newcomen

Como primeira abordagem à resolução do problema (diminuir o desperdício de calor), James Watt estudou qual deveria ser o material ideal para usar na construção do cilindro. O material deveria ser forte para não se danificar ao fim de algum tempo e deveria ter uma baixa «capacidade térmica». A noção de capacidade térmica tinha sido estudada por Black e aqui encontrava-se mais um motivo para surgir a lenda de que por detrás do interesse de Watt pela máquina de Newcomen se encontravam os estudos de Black. No entanto, Cardwell (1987, p.44), refere que Watt terá escrito uma carta onde dizia que tinha ouvido falar da capacidade térmica através de alguns filósofos, sem nunca focar o nome de Black... A noção de capacidade térmica relaciona-se com a quantidade de calor que é necessário fornecer a um material para que este eleve a sua temperatura de 1 °C. O objectivo de Watt era o de construir um cilindro com um material com uma elevada capacidade térmica, de forma a que as perdas de calor fossem minimizadas. No entanto, Watt confundia os termos *condutividade térmica* e *capacidade térmica*, pelo que afirmava pretender um material com uma baixa capacidade térmica. A madeira foi o material eleito para a construção do cilindro, já que se tratava de um bom isolador térmico, considerada por Watt como um material de pequena capacidade térmica. A confusão de Watt entre estes dois conceitos é de extremo interesse. Se o perspicaz fabricante de ferramentas compreendesse o significado atribuído ao conceito de capacidade térmica, diria antes que escolhia a madeira por possuir uma pequena condutividade térmica, ao invés de uma pequena capacidade térmica. O seu objectivo era o de revestir o cilindro de forma a que este não experimentasse grandes variações de temperatura. O material ideal seria aquele que não conduzisse o calor, tal como a madeira. O curioso é que um bom isolador térmico possui uma elevada capacidade térmica, uma vez que terá que se fornecer uma maior quantidade de energia a este material para que eleve a sua temperatura de 1°C do que a outro que seja bom condutor térmico. Tal, leva a crer que Watt não conhecesse o significado de capacidade térmica e apenas estivesse inteirado do de condutividade térmica. No entanto e apesar da confusão entre conceitos, a escolha do material foi acertada. Esta, porém, ainda não era a solução ideal para aplicar à máquina de Newcomen; citando Cardwell (1987, p.44), “Uma economia estava, desta forma, obtida, mas os cilindros de madeira não eram mecanicamente satisfatórios, pois depressa se rachavam”.



A segunda medida tomada por Watt para incrementar a eficiência da máquina de Newcomen foi a medição do volume exacto de água que era necessário injectar no cilindro para provocar a condensação do vapor. O excesso de água que entrasse no cilindro só iria contribuir para o seu arrefecimento e, como consequência, para um desperdício de calor. Para pôr em prática a sua nova hipótese, Watt recorreu à ajuda do professor Black. Cardwell (1987, p.45) dá a conhecer uma nota de Watt; "...depois explicou-me a sua doutrina do calor latente, a qual ele pensou algum tempo antes deste período, (Verão, 1764)..." O calor latente referido por Watt diz respeito ao calor que é necessário fornecer a uma dada massa de substância para que esta mude de estado físico. Cardwell (1987, p.45) descreve o procedimento seguido por Watt para saber qual o calor latente de vaporização da água, ou seja, para saber que quantidade de calor é necessário fornecer a um certo volume de água para que mude do estado líquido ao estado de vapor. Para tal, Watt mediu o excesso de calor existente no vapor, juntando-o a uma massa de água conhecida que se encontrava à temperatura ambiente até começar a ferver. A massa da água aumentou, o que correspondia à quantidade de vapor que havia condensado. Para além da massa, também a temperatura da água tinha aumentado devido ao calor libertado pelo vapor ao condensar. Para saber qual a quantidade de calor que tinha que fornecer a uma quantidade de água para que esta vaporizasse (calor latente), Watt multiplicou o valor da massa da água fria pelo valor do aumento de temperatura que havia sofrido. Na posse deste valor, estava em condições de calcular a quantidade de água que deveria deitar sobre o vapor do cilindro para que este condensasse sem que o cilindro arrefecesse. Era mais um modo de incrementar a economia da máquina de Newcomen!

Estão, também, desvendados os motivos que levaram ao nascimento da lenda! Watt aplicava alguns estudos do professor Black nas suas alterações à máquina de Newcomen. Talvez não seja justo dizer que Watt se interessou pela máquina de Newcomen graças a Black. Por outro lado, os trabalhos do último parecem ter jogado a favor do aperfeiçoamento de Watt à máquina de Newcomen. Citando Cardwell (1987, p.51), "... não há razão para que não possam ter trabalhado as suas ideias independentemente um do outro, mesmo pensando que Watt possa ter beneficiado de algumas discussões ocasionais que possa ter tido com Black." (1987, p.51)

O engenhoso fabricante de ferramentas não se ficou por aqui com as experiências em torno da máquina de Newcomen. Apesar das duas alterações que tinha introduzido na

máquina, tornando-a mais económica, Watt considerava que a sua eficiência ainda estava longe da desejada.

Recorde-se que na máquina em questão, o mesmo recipiente servia para cumprir duas tarefas distintas; numa primeira fase, o vapor era conduzido para o cilindro com o objectivo de empurrar um êmbolo para cima e fazer com que a carga fosse para baixo. Numa segunda fase, o mesmo cilindro era arrefecido com vista a condensar o vapor que lá se encontrava e a provocar o vazio, de modo a que o êmbolo fosse novamente para baixo e a carga para cima. O facto de, o mesmo cilindro ser o receptor do calor e o condensador fez Watt entender que havia um grande desperdício de calor durante o funcionamento da máquina. Era preciso uma quantidade enorme de combustível para a engrenagem funcionar porque quando as paredes do cilindro ficavam quentes à custa do vapor de água, logo eram arrefecidas com água fria para se dar a condensação. Para repetir o ciclo das operações era necessária mais uma grande quantidade de vapor para encher o cilindro e aquecer as suas paredes. Após a descoberta da grande causa da ineficiência da máquina, James Watt propôs-se a arquitectar uma resolução e acabou por esboçar o terceiro modelo da máquina a vapor com uso prático.

### **3.7. A máquina de Watt**

Watt debatia-se, agora, com uma nova causa para a ineficiência da máquina. O facto do cilindro ter duas funções distintas aumentava o consumo de combustível de forma drástica. Então, o persistente construtor de ferramentas propôs o seguinte: em vez de um recipiente com duas funções, a máquina teria que possuir dois recipientes, cada um com sua função. Desta forma, o cilindro que já existia na máquina de Newcomen estava ligado, através de válvulas, a uma caldeira que lhe fornecia o vapor e a um outro recipiente que funcionava como condensador. No interior do cilindro existia um êmbolo que se movia em direcção ao fundo, à medida que o vapor fluía em direcção ao condensador, sempre que a válvula que ligava os dois recipientes estava aberta. Ao chegar ao condensador, o vapor era arrefecido com água fria e passava ao estado líquido. Como resultado desta operação, em ambos os recipientes (cilindro e condensador) era criado o vazio e o êmbolo atingia o fundo do cilindro, pois ao se criar o vazio, a pressão do ar tornava-se superior à do cilindro e

empurrava o êmbolo. Neste ponto, a válvula que ligava o cilindro ao condensador era fechada, a carga que se encontrava no lado oposto ao êmbolo, provocava a subida deste, ao mesmo tempo que se dava a passagem de vapor da caldeira para o fundo do cilindro. Quando o êmbolo atingia a altura máxima do cilindro, um novo ciclo recomeçava.

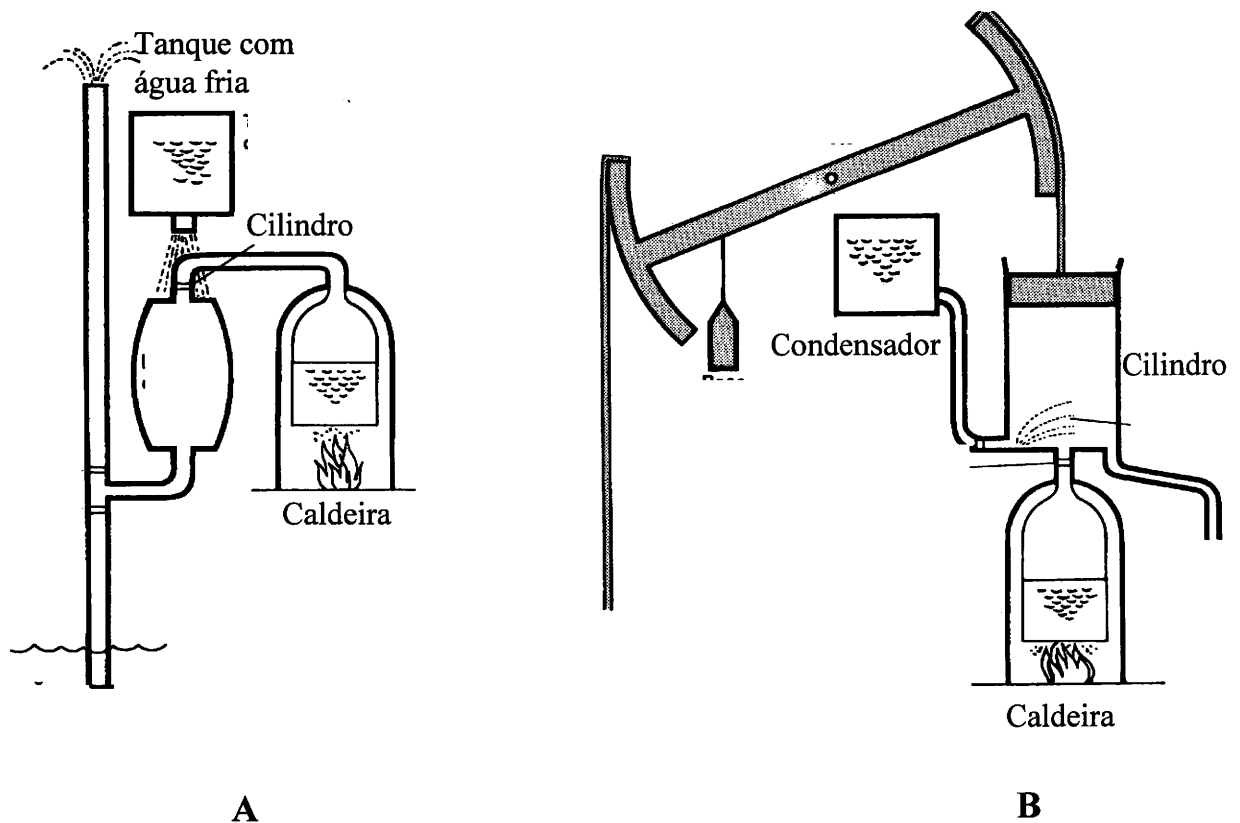


Figura 6- (A) Máquina de Newcomen; (B) máquina de Watt <sup>6</sup>

Com a perfeição que lhe era característica e que talvez tenha sido aguçada pelo seu ofício, Watt encontrou um outro senão na fase em que o ar atmosférico empurrava o êmbolo. O senão prendia-se com a temperatura a que o ar atmosférico se encontrava. Sendo esta inferior à do interior do cilindro, iria provocar o arrefecimento das paredes deste e, como consequência, provocar um desperdício de calor. Watt propunha uma nova alteração à máquina que neste momento já se poderia considerar sua. Se de início, tais alterações faziam parte de um aperfeiçoamento à máquina de Newcomen, por esta altura, uma nova máquina estava a nascer. A nova alteração consistia em fazer com que fosse usado vapor à pressão atmosférica para empurrar o êmbolo até ao fundo do cilindro, em vez de ser o ar a

<sup>6</sup> Imagem retirada de <http://www.intercentres.cult.gva.es>

temperatura mais baixa, a desempenhar esta função. Para tal, o cilindro tinha a parte superior tapada, existindo apenas uma pequena abertura, por onde o êmbolo podia entrar, «proibindo» o ar atmosférico de entrar no cilindro. Por outro lado, abria-se uma válvula que ligava a caldeira ao cilindro e permitia-se a passagem de vapor da caldeira para a parte superior do cilindro. Assim, o vapor à pressão atmosférica, proveniente da caldeira era o único agente a provocar a descida do êmbolo. Citando Cardwell (1994, p.160), “O vapor quente, à pressão atmosférica, era o único agente motriz...”

Este modelo da máquina de Watt cuja grande vantagem em relação às suas antecessoras era a de permitir que o cilindro permanecesse sempre quente e o condensador sempre frio, conseguindo evitar-se grandes perdas de calor, foi proposto, segundo Cardwell (1987, p.49), em Maio de 1765.

Estaria o perfeccionista Watt convencido de que nada mais havia a fazer para melhorar a economia da sua máquina movida a vapor? Houve um outro pormenor que despertou a sua atenção e que o fez entender que a máquina podia ser melhorada. O problema detectado estava relacionado novamente com a fase em que o êmbolo se movia em direcção ao fundo do cilindro, ao mesmo tempo que se dava a passagem de vapor do cilindro para o condensador. Citando Cardwell (1987, p.51), “Quando o pistão está no cimo do cilindro, a válvula é aberta e todo o vapor se precipita para fora do cilindro com a força de um furacão para dentro do condensador, desperdiçando desta forma eficácia”. Ao se aperceber de tal, Watt não ficou satisfeito e uma nova alteração à máquina foi idealizada e posta em prática. O objectivo era levar o vapor a entrar no condensador de uma forma mais calma, sem ser com a tal “força de um furacão”. Como o vapor fluía de um recipiente para o outro devido à sua própria pressão, a medida a tomar seria a de reduzir a pressão do vapor. Na fase em que a válvula que ligava o cilindro ao condensador era aberta e o êmbolo descia em direcção ao fundo do cilindro, a passagem de vapor da caldeira em direcção à parte superior do cilindro era cortada assim que o êmbolo começasse a descer. Não havendo tanto vapor na parte superior do cilindro, o volume tornava-se maior e a pressão do vapor diminuía substancialmente. O êmbolo descia, mas à custa de vapor a uma pressão mais baixa. Quando o ciclo começava novamente com a passagem do vapor para o condensador, a transferência dava-se mais lentamente. Agora o vapor estava a uma pressão reduzida e, uma vez que se havia eliminado a tal “força de furacão”, a eficácia da máquina aumentava. Segundo Cardwell (1987, p.52), esta foi a última causa de ineficiência

apontada por Watt à sua máquina. A medida por ele tomada como forma de a resolver e descrita anteriormente, teve o nome de “princípio de expansão”, sendo posta em prática no ano de 1769.

Com este último aperfeiçoamento, o jovem fabricante de instrumentos que tinha sido considerado pouco experiente para abrir o seu próprio negócio, dava agora o seu nome à mais recente e económica máquina a vapor. E parece que era desta vez que os mineiros podiam regozijar-se por terem uma máquina verdadeiramente amiga, que extrairia com uma eficiência maior do que as anteriormente fabricadas, as águas das minas. Citando Ordóñez (1987, p.11), “O grande êxito de Watt, nome lendário nesta revolução industrial, foi precisamente quadruplicar o rendimento da máquina de Newcomen”.

Para pôr em prática todas as ideias que lhe surgiam e dar continuidade ao seu trabalho, culminando na construção de um máquina a vapor, Watt precisava de um grande apoio financeiro. Segundo Laidler (2002, p.4) esse apoio financeiro era suportado por um próspero fabricante de Soho de nome Matthew Boulton, com quem Watt entrou em sociedade. A patente da máquina que surgiu desta sociedade foi obtida no ano de 1769, o mesmo ano em que Watt havia concluído a última remodelação para aumentar a sua eficiência. A comercialização da mesma teve início em 1774 e, usando a mesma precisão de números que Laidler (2002, p.4), cerca de quinhentas máquinas foram construídas durante a sociedade entre Watt e Boulton. As primeiras máquinas a saírem tinham uma eficiência de 8%, mas pequenas alterações iam sendo feitas e a eficiência das últimas tinha sido incrementada para 19%.

Segundo Duarte-Ramos (1986, p.70), o uso desta máquina teve uma predominância assinalável nas minas de estanho da Cornualha. Citando Holton et al. (1980, p.50), “...Watt conseguiu fazer uma fortuna vendendo ou alugando as suas máquinas aos donos das minas”. Curiosamente, o seu uso nas minas de carvão era bastante reduzido porque a preferência dos proprietários destas minas recaía sobre a máquina de Newcomen. Tendo esta uma instalação mais barata, o elevado consumo de carvão como combustível não era um problema para quem possuía abundantemente este minério. Se de início o objectivo da construção de uma máquina a vapor era o de retirar a água do interior das minas, deixou de o ser na altura em que Watt colocou à disposição do mercado a sua máquina com uma eficiência muito superior às anteriormente manufacturadas.

### 3.8. A máquina a vapor transforma o mundo

Os animais que muito tinham que se esforçar para fazer rodar as pesadas pás que faziam funcionar as máquinas fabris seriam mais poupados. Por outro lado, deixava de haver a exigência geográfica de situar as fábricas perto de rios. Tais facilidades surgiam ao mesmo tempo que a máquina a vapor de Watt estimulava a invenção de outros engenhos baseadas no mesmo princípio, mas com outras funções. Passava a ser possível por exemplo, accionar as máquinas que laboravam nas fábricas. Desta forma, a produção era mais rápida e o progresso industrial florescia. Inglaterra ia mudando de forma mais célere; surgiam fábricas preferencialmente junto das minas de carvão, uma vez que o flagelo do seu alagamento estava resolvido e o combustível mais pretendido para fazer funcionar a máquina a vapor era o carvão. A população deixava de trabalhar nas suas terras para passar a desempenhar actividades fabris e cidades tomavam forma junto das fábricas.

Um outro importante avanço que surgiu com a máquina a vapor e que fez avançar o mundo foi o que se deu no campo dos transportes. Segundo Asimov (1987, p.214), em 1787 terá surgido o primeiro barco a vapor, mas infelizmente, o seu criador, John Fitch não tinha o suporte financeiro necessário para comercializar o novo meio de transporte. Por este motivo, Fitch não viveu o suficiente para ver o furor que o barco a vapor de Robert Fulton fez, ao ser posto em movimento, no ano de 1807. O avanço dos meios de transporte não se fez sentir apenas ao nível marítimo, também os transportes terrestres tiveram uma evolução. O transporte de materiais, como o carvão, que anteriormente era feito em cavalos, passava agora a fazer-se em máquinas movidas a vapor. Surgiram os caminhos de ferro e a condução das pessoas era agora bem mais cómoda e rápida. Citando Duarte-Ramos (1986, p.71), “No início os caminhos de ferro serviam apenas as minas, pedreiras, olarias e outras instalações fabris; contudo, bem depressa foram abertas linhas de caminho de ferro para mercadorias e passageiros, sobretudo nas regiões mineiras”.

As vantagens desta explosão industrial são óbvias; a produção de artigos aumentava, assim como a construção, ao mesmo tempo que as viagens se tornavam mais rápidas. Há que referir, no entanto, que associado a todo este crescimento económico e social, havia uma grande exploração de trabalhadores. Alguns proprietários das fábricas ficavam cegos de ganância e não se importavam que os seus empregados vivessem em condições miseráveis, desde que eles fossem enriquecendo à custa de uma grande produção

e de mão de obra barata. Com o decorrer dos anos, a situação da classe trabalhadora foi melhorando à custa de vários conflitos entre trabalhadores e patrões. Citando Asimov (1984, p.214), “... as condições de trabalho foram incrivelmente cruéis e abomináveis até a sociedade compreender, relutantemente que as pessoas não deviam ser tratadas pior do que os animais”.

Até agora tem-se tratado do modo de vida em Inglaterra, mas não passaram muitos anos até que estas facilidades se estendessem a todo o mundo. Citando Asimov (1984, p.216), “Em 1840 os caminhos de ferro tinham atingido o rio Mississipi; e em 1869, os Estados Unidos podiam ser percorridos de uma costa a outra sobre carris”.

### **3.9. As marcas da Revolução Francesa**

Esta história teve início no ano de 1796, com a partida do conde de Rumford para a Baviera, com o intuito de defender Munique de possíveis invasões francesas. Recorde-se que o elo de ligação entre o conde e os seus estudos sobre o calor foi a fabricação de canhões, cujo objectivo era o de combater franceses! Retorna-se novamente ao ano de 1796, mas desta vez para conhecer um pouco do que se passava no país inimigo por esta altura. Apresentar-se-á, também, um engenheiro que deixou o seu nome bem vincado na história do calor e que nasceu neste glorioso ano, no país em que Revolução e Napoleão Bonaparte eram as palavras do momento.

Em 1789, França era um país mal governado e cheio de dívidas. Os pobres morriam de fome, enquanto que a nobreza vivia luxuosamente. Como resultado de toda esta situação, em Julho deste mesmo ano, a população parisiense revoltou-se contra a nobreza que governava o país. Após a fuga de Luís XVI, contando com a ajuda da Áustria e da Prússia, seguiu-se uma guerra com estes países, da qual França saiu vitoriosa. Com o rei capturado, França passou de monarquia a república. Até ao ano de 1795, as revoluções neste país não cessaram e vários grupos políticos ascenderam ao poder. Neste mesmo ano, a ordem começou a reinar no país e Napoleão Bonaparte ficou responsável pelo comando do exército francês. Mas este comandante era muito ambicioso e o cargo não o satisfez. Proclamou-se Napoleão I, imperador de França, no ano de 1804 e o seu sonho passou a ser o de governar toda a Europa. A sua ambição desmedida levou-o a lutar por um império que se estenderia de Portugal à Rússia. Mas este império não passou de um sonho de Napoleão!

Durante vários anos, o imperador Napoleão invadiu países com as suas tropas e tentou invadir outros, como a Inglaterra. Dada a situação geográfica deste país, o ambicioso imperador preparou uma frota marítima com o objectivo de o atacar, saindo derrotado de tal tentativa. Mas foi a sua derrota na guerra contra a Prússia, a Áustria e a Rússia que destruiu o seu sonho. Após este desaire, Napoleão Bonaparte foi obrigado a abdicar do seu cargo, no ano de 1814.

O preço da ambição desmedida de Napoleão foi a animosidade com os outros países da Europa. Um dos países que não se deixou subjugar pela França e pelo seu ganancioso imperador foi a Inglaterra. Este país, em plena expansão tecnológica com a evolução das máquinas a vapor, era um dos mais fortes adversários de França e agora, todos os franceses teriam que arcar com as consequências da ganância de Napoleão! Assim, França não tinha acesso ao avanço tecnológico vivido em Inglaterra. Citando Ordóñez (1987, p.17), “Vivia-se em França (...) o paradoxo de um grande desenvolvimento no âmbito teórico e um relativo atraso tecnológico”. Segundo Ordóñez (1987, p.17), na ânsia e no desespero de um maior nível técnico, os franceses foram mesmo capazes de atitudes pouco ortodoxas, como a espionagem e posterior cópia da máquina de Watt.



### 3.10. Um pouco da história da família Carnot



**Figura 7- Sadi Carnot <sup>7</sup>**  
**(1796-1832)**

No promissor ano de 1796, a distinta família Carnot residente em França, foi abençoada com o nascimento de um filho. Segundo Atkins (2003, p.132), este nascimento terá surtido uma alegria redobrada, uma vez que o casal francês já havia sentido o desgosto da morte de dois filhos logo após o nascimento. Nicolas Leonard Sadi Carnot foi o nome dado a este infante, que segundo Baeyer (1998, p.36), desde cedo revelou o seu carácter cortês e galante. Prova suficiente deste seu carácter é o episódio relatado por Baeyer, em que aos 4 anos de idade, ao observar Napoleão Bonaparte a atirar pedras a um barco cheio de mulheres, Nicolas terá gritado; “Seu bruto Primeiro Cônsul, pára de importunar as senhoras!”

O pai de Nicolas Carnot era um homem bem posicionado na sociedade francesa da época. O seu nome era Lazare Carnot e exerceu o cargo de ministro de guerra de Napoleão Bonaparte. Era um homem culto, engenheiro de formação e interessado pela ciência, de tal modo que havia publicado um livro científico no ano de 1783. Este livro tinha por título “Experiências nas máquinas em geral”, no qual, segundo Laidler (2002, p.24), Lazare

---

<sup>7</sup> Imagem retirada de <http://www.sciences.univ-nantes.fr>

Carnot terá sugerido que a *vis viva*<sup>8</sup> (nos dias de hoje, energia cinética) era conservada e não podia ser criada.

Sendo o pai de Nicolas Sadi Carnot um homem culto e interessado pela ciência, não é de estranhar que tenha proporcionado a melhor educação ao filho. Sadi Carnot teve uma educação esmerada que passava pela matemática, pelas línguas, pela ciência e pela música. Talvez o jovem Carnot pudesse ser, além de um dos pioneiros da ciência do calor, também um grande artista, fosse a sua vida um pouco mais longa. Segundo Baeyer (1998, p.37), o seu irmão mais novo terá relatado que ele “adorava dança, literatura, artes e que era um excelente violinista”. Aos 18 anos, Sadi Carnot formava-se em engenharia, seguindo as pisadas do pai. Mais concretamente, formava-se como engenheiro militar na École Polytechnique. Note-se que uma formatura na École Polytechnique era só para uns quantos afortunados que pertenciam à elite francesa. Segundo Ordóñez (1987, p.15), a Escola “... expoente máximo do interesse da República pela formação dos jovens em ciências e em técnicas” tinha sido fundada em 1795 e um dos seus directores era Lazare Carnot. A partir de 1804, passou a ter um carácter militar e daí, Nicolas Sadi se ter formado em engenharia militar.

Sadi Carnot abriu novos horizontes à história do calor, ao promover a transição do mundo físico para outro imaginário e artificial. Tudo aconteceu no dia em que o engenheiro francês «perseguiu», através da sua imaginação, o percurso do calor na grande obra do momento – a máquina a vapor. Deste estudo imaginário à engrenagem da máquina a vapor, resultaram leis que serviram para explicar fenómenos que faziam parte do mundo da

---

<sup>8</sup>O termo *vis viva* deve-se ao cientista alemão Leibniz. Para ele, a *vis viva* era uma força que se relacionava com o movimento dos corpos. Segundo (Holton et al., 1980, p.24), Leibniz terá descrito o que entendia por força, num artigo escrito em 1686, da seguinte forma: “... a força deve ser avaliada pela quantidade do efeito que pode produzir, por exemplo pela altura a que um corpo pesado pode ser elevado... e não pela velocidade que se lhe pode imprimir”. Chegou à relação de que esta força seria igual a  $mv^2$  e deu-lhe o nome de *vis viva*. Para ele, esta grandeza não se perdia, nem se destruía e quando a *vis viva* parecia não se conservar ele explicava que “se dissipava por entre as partes pequenas”.

ciência. Citando Ordóñez (1987, p.13), “O que o homem havia construído para outros usos servia pela primeira vez de ferramenta para uma exploração dos fenómenos físicos”.

Para bom grado da ciência, Carnot cedo se apercebeu de que a dedicação à vida militar não era o que mais desejava para si e, após alguns anos de trabalho nesta área, pediu que lhe concedessem um cargo que lhe permitisse viver em Paris. No ano de 1819 teve autorização para residir na capital francesa e, com mais tempo livre, o jovem engenheiro, agora com vinte e três anos de idade, começou a frequentar o Conservatoire d'Arts et Métiers. Ordóñez (1987, p.16), refere que este local era um centro de formação superior, em que as aulas, nocturnas e de carácter prático, recaíam sobre as áreas da Mecânica, da Química e da Física. Há que lembrar que as máquinas a vapor tinham sido idealizadas e construídas por engenheiros ingleses e escoceses e que França não era detentora do avanço tecnológico necessário para a construção das mesmas. Não obstante, estas máquinas eram o centro das atenções dos engenheiros franceses. Como aumentar o seu rendimento é apenas um exemplo dos tantos estudos que os engenheiros gostavam de fazer sobre elas. Segundo Ordóñez (1987, p.19), nas aulas de Química, leccionadas por Nicolas Clément, amigo de Carnot, tratavam-se pormenores tão importantes do funcionamento das máquinas como o comportamento do vapor de água durante a expansão de um êmbolo. Estas aulas, provavelmente, eram reforçadas com os estudos da calorimetria e com os estudos de Boyle e de Gay-Lussac acerca do comportamento dos gases. Os últimos, davam a conhecer como é que um gás se comportava ao se fazer variar factores como a pressão, o volume e a temperatura, noções indispensáveis para quem desejava entender o funcionamento da máquina a vapor. As lições devem ter surtido um impacto tal em Sadi Carnot que no ano de 1824 publicava um livro, no qual constavam as ideias sobre as quais havia reflectido.

O livro que aos 28 anos de idade Sadi Carnot deu a conhecer ao público tinha por título “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”. Segundo Baeyer, Carnot optou por dirigir o livro ao grande público, reduzindo ao mínimo os detalhes matemáticos que interessariam unicamente a cientistas e engenheiros. Por outro lado, não se privou de deduzir uma teoria geral baseada nos estudos que tinha feito em torno da máquina a vapor. Ou seja, detalhes que interessavam unicamente a engenheiros e cientistas. Como resultado, “... o público era muito pouco sofisticado para entender uma teoria geral, e os técnicos demasiado altivos para se aborrecerem com o que parecia ter sido a popularização de um tema complexo” (1998, pp.37, 38). E assim, o livro de Carnot não foi objecto de grande

interesse aquando da sua publicação. Décadas mais tarde, o sucesso da obra foi inevitável; segundo Laidler, Lorde Kelvin terá dito acerca do livro de Carnot que foi uma “época de fabricar dádivas para a ciência” e um outro físico, Joseph Larmor, terá descrito a obra como “talvez a mais original na ciência física” (2002, pp.28,29). Infelizmente, a morte prematura do jovem engenheiro impediu-o de conhecer estes e outros elogios ao seu trabalho.

### **3.11. Reflexões sobre a potência motriz do fogo**

O livro de Carnot, “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”, será agora aberto, folheado e explorado. Apresentar-se-ão alguns excertos da interessante obra de Carnot que serão analisados. O livro por detrás desta análise não é o original, mas sim uma tradução de Javier Odon Ordóñez.

#### **3.11. 1. O fascínio de Carnot pela máquina a vapor**

Se alguma dúvida houver acerca do objecto de estudo de Carnot ao longo do seu livro, basta abri-lo e ler o primeiro parágrafo, onde se dá destaque ao calor e à máquina que revolucionou o mundo. No desenrolar da obra, o engenheiro cientista vai levantando questões acerca da máquina a vapor. Segue-se a sua resposta, envolta de uma explicação que permite ao leitor o acesso aos famosos estudos de Carnot, em torno destas máquinas.

Iniciando a leitura de “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”, obra de Nicolas Sadi Carnot;

Ninguém ignora que o calor pode ser a causa do movimento, que inclusivamente possui uma grande potência motriz: as máquinas a vapor, hoje tão difundidas, são uma prova eloquente daquilo que salta à vista. (p. 35).

Esta foi a forma como o engenheiro Carnot deu início ao seu livro. Neste primeiro parágrafo ele focou os dois centros de interesse do mesmo; o calor e as máquinas a vapor. Curiosamente, Carnot não era um defensor do conde de Rumford na questão do calor, mas sim, um adepto da teoria de Lavoisier. Ele seguia a doutrina de que o calor era uma substância material chamada calórico. Para Sadi Carnot, o calor não era movimento, mas podia ser a causa de um movimento que possuía potência motriz. Neste seu primeiro

parágrafo, dá a conhecer de uma forma resumida o funcionamento de uma máquina a vapor, em que o calor origina trabalho, por ele designado por potência motriz. Aliás, Carnot apressa-se a referir que as máquinas a vapor são uma prova da sua afirmação, deixando transparecer desde logo o seu interesse por tal assunto.

No parágrafo seguinte Sadi Carnot chama a atenção para a importância do calor, apresentando alguns exemplos de efeitos naturais que devem a sua existência a esta misteriosa entidade.

Devem atribuir-se ao calor as grandes transformações que chamam a nossa atenção à superfície da Terra; a ele devem-se as agitações atmosféricas, a ascensão das nuvens, a queda de chuvas e de meteoros, as correntes de água que canalizam a superfície do globo, e das quais o homem só chegou a utilizar uma pequena parte: finalmente os terremotos, as erupções vulcânicas são reconhecidos como resultado do calor. (p. 35).

Esta passagem é de grande interesse, uma vez que salienta a importância do calor nos fenómenos mais significativos que ocorrem à superfície da Terra. Afinal, lembrava Carnot, o calor não é responsável apenas por fenómenos como o funcionamento de uma máquina ou o aquecimento do Homem. A esta misteriosa essência, também se devem atribuir os fenómenos naturais, como a queda de meteoros ou os terremotos. Sobre o parágrafo de Carnot, Ordóñez (1987, p.26), refere que a ideia do calor como causa das transformações naturais que se dão à superfície da Terra era uma opinião mantida por muitos naquela época e mostra o quanto a meteorologia influenciava a ciência.

A introdução das máquinas a vapor no livro, é feita logo no parágrafo seguinte;

Dessa imensa reserva podemos obter a força motora necessária para as nossas necessidades; ao fornecermos combustível em todas as partes, a natureza deu-nos a faculdade de produzir em qualquer momento e lugar o calor e a potência motriz que é sua consequência. O objectivo das máquinas de fogo é desenvolver essa potência, adequá-la aos nossos usos. (p. 35).

Neste parágrafo, além de introduzir o objecto do seu estudo (máquina a vapor) na obra, Carnot mais uma vez, explica de uma forma muito sucinta o seu funcionamento; a partir do calor produz-se potência motriz (trabalho).

Em relação ao mesmo parágrafo, Ordóñez (1987, p.36), faz uma nota, referindo que traduziu “Machine à feu” para máquina de fogo, recusando a tradução de J. Cabrera para “máquina térmica” por considerar que a sua tradução é que está de acordo com a expressão original de Carnot.

Nos parágrafos que se seguem, Sadi Carnot não poupou elogios à máquina a vapor. É empolgante ler o seu livro e sentir o modo como a máquina a vapor o deixava maravilhado. Ao longo de várias linhas, descreve as vantagens desta máquina e chega mesmo a afirmar que; “Despojar a Inglaterra da máquina a vapor, seria (...) arruinar todos os seus meios de prosperidade...” (p. 37) Ficará aqui, apenas o primeiro parágrafo, entre muitos que tecem elogios à máquina em questão;

O estudo de tais máquinas é de um interesse extraordinário, a sua importância é imensa, o seu emprego aumenta todos os dias. Parecem destinadas a produzir uma grande revolução no mundo civilizado. Já a máquina de fogo explora as nossas minas, faz mover os nossos navios, drena os nossos portos e ribeiras, forja o ferro, eleva os fardos mais pesados, etc. Parece que um dia servirá de motor universal e terá preferência sobre a força dos animais, as quedas de água e as correntes de ar. Sobre os primeiros motores tem a vantagem da economia; sobre os outros dois a vantagem de poder empregar-se em qualquer momento e lugar, e não sofrer nunca interrupção no seu trabalho. (p. 36).

Neste primeiro parágrafo, além de falar das inúmeras vantagens do uso da máquina a vapor, Carnot cita alguns exemplos práticos da sua aplicação. Foca também os seus benefícios sobre os primeiros motores pouco económicos e pouco rentáveis. Carnot não deixa de frisar, no início do parágrafo, o interesse do estudo de tais máquinas, interesse este que o havia motivado e o levava agora a escrever um livro.

Tal como referido anteriormente, os elogios de Carnot à máquina a vapor continuaram por mais alguns parágrafos do seu livro e tais elogios não excluíram os inventores da máquina. Veja-se no excerto seguinte como Carnot presta a sua homenagem ao país que viu nascer a máquina a vapor e aos seus inventores;

Se a honra de uma descoberta pertence à nação onde adquiriu todo o seu crescimento e desenvolvimento, esta honra não se pode negar a Inglaterra: Savery, Newcomen, Smeathon, o célebre Watt, Woolf, Trevetick e alguns outros engenheiros ingleses são os verdadeiros criadores da máquina de fogo, já que nas suas mãos adquiriu todos os graus sucessivos de aperfeiçoamento... (p. 38).

Atendendo à situação política que se vivia em França, referida anteriormente e ao antagonismo criado entre este país e Inglaterra, é de alguma forma espantoso o modo como Carnot enaltece Inglaterra, assim como, engenheiros ingleses e escoceses. Tendo como agravante o facto do seu pai ser um homem da política, talvez fosse de esperar uma maior reserva da parte de Sadi Carnot ao falar do «país inimigo». Neste excerto, Ordóñez (1987, p.38) faz uma nota, referindo que Carnot pertencia a um grupo de cientistas que nunca se

pouparam a reconhecer os méritos de Inglaterra e que ele, juntamente com outros franceses, chegou mesmo a traduzir e difundir trabalhos de Watt.

Gradualmente, Carnot vai-se aproximando dos seus intentos; a análise da máquina a vapor. Veja-se em mais um excerto do livro, a forma como este engenheiro introduz algumas questões relacionadas com a eficiência da máquina;

Frequentemente se tem suscitado a questão de saber se a potência motriz é limitada, ou se não tem limites; se os aperfeiçoamentos possíveis à máquinas de fogo têm um fim pré-fixado, que a própria natureza das coisas impede de ultrapassar por qualquer meio que seja, ou se pelo contrário, esses aperfeiçoamentos são susceptíveis de uma extensão indefinida. Durante muito tempo também se tentou saber, e inclusivamente tenta-se saber hoje, se não existirão agentes preferíveis ao vapor de água para desenvolver o vapor motriz do fogo, se o ar atmosférico, por exemplo, não apresentaria, a respeito desta questão, grandes vantagens. Propomo-nos a submeter aqui estas questões a um exame ponderado. (pp. 38, 39).

Neste parágrafo, Carnot levanta algumas questões relacionadas com o aperfeiçoamento da máquina a vapor. A primeira destas questões terá uma resposta nas últimas linhas da sua obra. Com a mesma, Sadi Carnot pretende saber se o trabalho gerado por uma máquina a vapor tem um limite ou não. Limite este que não pode ser ultrapassado independentemente dos aperfeiçoamentos que se façam à máquina. A sua segunda questão é mais concreta e relaciona-se com o mecanismo da máquina. Carnot questiona se a substância utilizada para fazer mover o êmbolo (no caso da máquina de Watt), interfere na eficiência da máquina. Ou seja, a questão vai no sentido de saber se o vapor de água é o agente ideal para produzir trabalho, ou se utilizando uma substância diferente, a quantidade de trabalho aumentaria (a partir da mesma quantidade de combustível). No fundo, o seu objectivo é o de entender se a máquina pode aumentar a sua eficiência, fazendo variar este factor.

### **3.11. 2. Em busca de uma lei geral**

Pronto para analisar as suas questões, Carnot escreve dois parágrafos que resumem o seu trabalho e os contributos que daí advieram para o reino da Física.

A grande diferença entre ele e todos os outros que se interessaram pelo mesmo estudo é a de que em vez de se cingir ao caso particular da máquina a vapor, Carnot pretendia fazer um estudo geral que explicasse todos os fenómenos. Tal estudo diferenciou-

se de todos os outros já realizados! Os excertos que se seguem ilustram o início de uma «revolução» na Física e marcam também a aproximação ao nascimento do conceito protagonista desta história – a entropia.

Não se considerou de um ponto de vista suficientemente geral o fenómeno da produção de movimento por meio do calor. Só se considerou em máquinas cuja natureza e o modo de acção não permitiam mostrar toda a amplitude do que é capaz. Em tais máquinas o fenómeno encontra-se de alguma forma incompleto; é difícil conhecer os princípios e estudar as suas leis. (p. 39).

Para considerar de forma mais geral o princípio da produção de movimento através do calor, é necessário concebê-lo independentemente de qualquer mecanismo, de qualquer agente particular; é necessário estabelecer princípios aplicáveis, não só às máquinas a vapor, mas a qualquer máquina de fogo imaginável, qualquer que seja a substância que se utilize, e qualquer que seja a maneira que se actue sobre ela. (p. 39).

No primeiro parágrafo, Carnot escreve acerca da necessidade do desenvolvimento de uma teoria geral acerca da obtenção de trabalho a partir do calor. Citando Baeyer (1998, p.40), “... Carnot queria encontrar as normas que regiam o funcionamento de chaleiras, máquinas a vapor, e vulcões sem fazer referência aos seus *designs*”. Até aqui, o problema era abordado para o caso concreto das máquinas a vapor e tal abordagem, impedia a extrapolação de leis e princípios gerais, já que o estudo era feito para um caso particular.

Quanto ao segundo parágrafo, o comentário mais pertinente a fazer será uma citação de Baeyer (1998, p.39), que o descreve como “o parágrafo que marca o nascimento da termodinâmica”. Ordóñez (1987, p.39), faz uma nota em relação ao mesmo, alertando que a distinção entre máquina a vapor e máquina de fogo é feita para distinguir uma máquina que funciona unicamente com vapor de água de uma outra que utiliza qualquer outro agente, com vista à obtenção de trabalho.

Sadi Carnot, com a curiosidade natural de um engenheiro, dedicou-se ao estudo da engrenagem das máquinas a vapor. Ao fazê-lo, mostrou que além de engenheiro, também era cientista. A revelação foi feita no momento em que deu a conhecer a sua ansiedade em querer desenvolver uma teoria tão geral para o calor, como o haviam feito Galileu e Newton em relação ao movimento. No parágrafo que se segue, Carnot mostra ser um cientista ao nível dos grandes que o antecederam;

As máquinas que não recebem o seu movimento do calor, as que têm como motor a força dos homens e dos animais, uma queda de água, uma corrente de ar, etc., podem estudar-



se até aos mais ínfimos detalhes mediante a teoria mecânica. Todos os casos estão previstos, todos os movimentos imagináveis estão submetidos a princípios gerais solidamente estabelecidos, e aplicáveis em qualquer circunstância. Este é o carácter de uma teoria completa. Uma teoria semelhante evidentemente falta para as máquinas de fogo. Não surgirá nenhuma até que as leis da física se ampliem e generalizem tanto, que sirvam para conhecer de antemão todos os efeitos do calor quando actua de uma forma determinada sobre um corpo qualquer. (p. 39).

Nestas linhas parece estar a promessa do desenvolvimento de uma nova área da Física, tal como tinha acontecido anteriormente com o desenvolvimento da mecânica! Será que Carnot conseguiu chegar à tal lei geral que regia todas as transformações de calor em trabalho e, lembrando os trabalhos do conde de Rumford, de trabalho em calor?

A tal teoria geral, de facto, desenvolveu-se! E com tal desenvolvimento ampliou-se também um ramo da Física denominado termodinâmica.

### **3.11. 3. Uma analogia entre a água e o calor**

O primeiro passo dado por Sadi Carnot em direcção ao desenvolvimento da teoria geral que relacionava o calor com o trabalho foi uma análise atenta aos dois recipientes existentes na máquina de Watt; o cilindro, a uma temperatura mais elevada e o condensador, a uma temperatura mais baixa.

Para que não se perca nem um pouco do raciocínio de Carnot, que explicação será melhor do que a que se encontra nas suas próprias palavras? No excerto que se segue, Carnot expõe um pormenor que, segundo ele, deve ser alvo da atenção de quem quer entender a lei que rege todas as máquinas que têm inerente a transformação de calor em trabalho;

A produção de movimento nas máquinas a vapor é acompanhada de uma circunstância na qual devemos fixar a nossa atenção. Esta circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico, quer dizer, a sua passagem de um corpo cuja temperatura é mais ou menos elevada, a outro cuja temperatura é mais baixa. Com efeito, o que é que ocorre quando uma máquina a vapor está a funcionar? O calórico, produzido no fogão, atravessa as paredes da caldeira, dá lugar à formação de vapor, ao que de alguma maneira se incorpora. O vapor, arrastando-o consigo, leva-o primeiro para o cilindro, onde cumpre uma função determinada, e depois transporta-o para o condensador, onde passa ao estado líquido por contacto com a água fria que ali se encontra. No último extremo a água fria do condensador apodera-se do calórico produzido na combustão...

Nas operações que descrevemos reconhece-se facilmente o restabelecimento do equilíbrio no calórico, a sua passagem de um corpo mais ou menos quente para um corpo mais frio. Aqui o primeiro desses corpos é o ar aquecido no fogão, o segundo é a água da condensação. O restabelecimento do equilíbrio no calórico realiza-se entre eles, se não completamente, pelo

menos em parte; porque de um lado, o ar aquecido, depois de ter realizado a sua função... escapa-se pela chaminé com uma temperatura menor do que a que havia adquirido através da combustão; e a água do condensador, depois de ter condensado o vapor, abandona a máquina com uma temperatura superior à que tinha antes de aqui entrar. (p. 40).

Antes de mais há que notar que passados aproximadamente vinte e sete anos do conde de Rumford ter realizado as suas experiências e anunciado as suas conclusões de que o calor seria uma forma de movimento, Carnot optava por seguir a teoria do calórico. A verdade é que a teoria de Lavoisier ainda era a que estava em voga. Como referido no primeiro capítulo, existiam detalhes por explicar sobre a teoria do conde que determinavam o seu insucesso e viriam a atrasar a aceitação da mesma por uns bons anos. O facto de Sadi Carnot se ter baseado na ultrapassada teoria do calórico é apenas um pormenor que não tira qualquer validade aos seus estudos. Citando Laidler (2002):

Podemos pensar que pelo facto de Carnot ter baseado os seus argumentos numa ideia incorrecta as suas conclusões seriam falsas. Felizmente não foi este o caso; os seus argumentos puderam ser mais tarde traduzidos em termos baseados na ideia de que o calor não é uma substância mas uma forma de movimento, e as suas conclusões permaneceram válidas. (p. 29).

Carnot interessou-se pela máquina a vapor e estudou-a como ainda ninguém a tinha estudado, descobrindo algo que ainda ninguém tinha descoberto... Até aqui, todos os que estudavam a máquina a vapor, tinham como intuito o aumento do seu rendimento e a única preocupação que tinham em mente era a de reduzir as perdas de calor. Tentavam fazê-lo, alterando o *design* da máquina, os materiais utilizados na sua construção e o tamanho. Citando Baeyer (1998, p.40), “Num esforço para aumentar a eficiência, os pragmáticos engenheiros estudavam formas de diminuir o combustível e aumentar o trabalho produzido”. A diferença entre estes engenheiros e o engenheiro Carnot foi a de que este último conseguiu abstrair-se da imposição de aumentar a eficiência da máquina e estudou-a, simplesmente! Ao fazer este estudo mostrou que a sua alma de investigador se sobrepunha à de engenheiro. Citando Gyargi, “Investigar é ver o que todos já tinham visto e pensar o que ninguém ainda tinha pensado”. De facto, Carnot pensou algo que ainda ninguém tinha pensado, apesar de já todos terem visto o que motivou tal pensamento...

Na verdade, o intuito dos outros engenheiros era o de tentar eliminar o que Carnot descobriu ser fundamental para o funcionamento da máquina. Considerando o calor como uma substância material, Carnot estabeleceu uma analogia entre o calórico e a água e entre a máquina a vapor e a máquina hidráulica. Segundo Baeyer (1998, p.41), Carnot admitiu

que, da mesma forma que o movimento da queda de água na máquina hidráulica provocava o movimento de uma roda, também a queda do calor provocava o movimento do êmbolo, na máquina a vapor. A sua analogia permitiu-lhe tirar mais duas ilações acerca do calor. Por um lado, este deveria conservar-se, da mesma forma que a água, até porque se tratavam de duas substâncias materiais e não deveria existir qualquer motivo que as fizesse «desaparecer». Por outro lado, numa máquina hidráulica, parte da água é jorrada para fora desta, da mesma forma que o calor flui para fora da máquina a vapor. Carnot concluía, assim, que as perdas de calor eram inevitáveis durante o funcionamento da máquina a vapor.

Feita a analogia com a máquina hidráulica e considerando que a produção de trabalho exigia a queda do calórico, Carnot imaginou qual seria o percurso efectuado por esta substância durante o funcionamento da máquina. Segundo ele, o calórico era criado no fogão, originava vapor na caldeira e incorporava-se neste vapor. De seguida, passava para o cilindro, onde cumpria a missão de provocar o movimento do êmbolo e fluía em direcção ao condensador, local onde passava ao estado líquido. Entre estas operações, o calórico atingiria um equilíbrio térmico; por um lado, depois de desempenhar a sua função no cilindro, uma parte escapava-se para a atmosfera a uma temperatura menor do que a que tinha anteriormente, por outro lado, após o desempenho da sua função, a água do condensador, abandonava a máquina com uma temperatura superior à que tinha antes de ali entrar. Ou seja, para que a máquina funcionasse, o calórico tinha que fluir de uma zona mais quente para outra mais fria. A circunstância para a qual Carnot chama a atenção é precisamente esta; durante o funcionamento da máquina há um fluxo (para Carnot tratava-se de um fluxo de calórico, hoje, fala-se em fluxo de energia sob a forma de calor) de um corpo a temperatura mais elevada para outro a temperatura mais baixa. Com este fluxo, surge obrigatoriamente perda de calor da máquina para o exterior. Curiosamente, o que os outros engenheiros tentavam eliminar, Carnot afirmava ser algo imprescindível para que a máquina funcionasse.

Sadi Carnot faz a grande afirmação, na qual já está subjacente o conceito de entropia da seguinte forma:

Assim a produção da potência motriz na máquina a vapor deve-se não a um consumo real do calórico, *mas sim ao seu transporte de um corpo quente para um corpo frio*, quer dizer ao restabelecimento do seu equilíbrio, que supostamente havia interrompido de alguma forma, como por exemplo na combustão, ou por qualquer outra causa. Depressa veremos que este

princípio é aplicável a qualquer máquina que seja posta em movimento por acção do calor. (p. 41).

Neste parágrafo, o engenheiro com alma de cientista reforçava a ideia da exigência dos dois corpos a temperaturas diferentes na máquina. Desta vez, afirmava que por detrás da produção de trabalho a partir do calor, estava subjacente o transporte de calórico de um corpo a uma temperatura mais elevada para outro a uma temperatura mais baixa.

Ainda no excerto anterior, Carnot começou a dar contornos à sua teoria geral, ao afirmar que o princípio se aplicava a qualquer máquina que produzisse trabalho a partir do calor, não estando confinado apenas à máquina a vapor. E o engenheiro explicava o porquê de poder fazer tal generalização e da necessidade da existência de duas zonas a temperaturas diferentes. Veja-se de que forma, no seguinte excerto:

Vimos que nas máquinas a vapor a potência motriz deve-se a um restabelecimento de equilíbrio no calórico; isto não acontece só nas máquinas a vapor, mas em qualquer máquina de fogo, quer dizer em qualquer máquina cujo motor seja o calórico. O calor só pode ser causa de movimento em virtude das mudanças de volume ou da forma que se produzem nos corpos; essas mudanças não se devem a uma temperatura constante, mas a alternâncias entre o calor e o frio: ora bem, para aquecer qualquer substância é necessário um corpo mais quente que ela; para arrefecê-la, um corpo mais frio...

(p. 42, o sublinhado é da nossa responsabilidade).

Não fazendo nunca afirmações sem fundamento, o engenheiro explica neste parágrafo o motivo da exigência dos dois corpos a temperaturas diferentes. Carnot deixa claro que só haverá movimento a partir do calor desde que exista uma alteração do volume dos corpos e que tal só acontece se houverem alterações da temperatura. Desta forma, o agente que provoca a alteração do volume (pode ser o vapor de água ou outro), tem que sofrer variações de temperatura. Estas variações só serão possíveis se o agente alternar entre um corpo que se encontre a temperatura mais elevada do que ele e outro que se encontre a temperatura mais baixa. Para que não se perca nem um pouco do fascinante raciocínio de Carnot, talvez seja pertinente exemplificar a sua explicação com o funcionamento da já conhecida máquina de Watt. O agente utilizado para fazer funcionar a máquina é o vapor de água produzido na caldeira (corpo quente). O vapor passa para o cilindro, onde cumpre a missão de provocar o movimento de um êmbolo. Nesta fase, há um aumento de volume no cilindro e o êmbolo move-se no sentido ascendente. Em seguida, o vapor passa para o condensador (corpo frio) e arrefece (passando ao estado líquido), o volume do cilindro diminui e o êmbolo movimenta-se no sentido descendente. Neste exemplo, tiveram lugar

variações de volume no cilindro, consequência da alternância de temperaturas experimentadas pelo vapor. Tal alternância só foi possível devido à existência de um corpo a temperatura mais elevada (cilindro) e outro a temperatura mais baixa (condensador). Apesar do exemplo eleito ter sido a máquina a vapor é importante ter sempre presente a tese de Carnot; esta teoria aplica-se a qualquer caso em que se gere trabalho a partir do calor.

Desta forma, Sadi Carnot colocava no papel a sua primeira conclusão acerca de todas as máquinas térmicas; para que se produza trabalho a partir do calor, tem que haver um transporte de calórico entre dois corpos; um quente e outro frio. Poder-se-á concluir daqui que, ao contrário do que os outros estudiosos das máquinas julgavam, independentemente de qualquer material, forma ou tamanho que uma máquina possa ter, há sempre dissipação de calor aquando do seu funcionamento.

Feita a descrição do percurso efectuado pelo calórico durante o funcionamento da máquina, era altura para Carnot voltar novamente a atenção para as questões colocadas no início do livro. A julgar pelo que foi lido até ao momento, a curiosidade dos leitores (pelo menos dos actuais) é aguçada pela expectativa da exploração destas questões.

### **3.11. 4. Viagem ao mundo das máquinas perpétuas**

A primeira questão que o arrojado engenheiro colocava (p.42) era a de saber se “a potência motriz do calor é imutável em quantidade, ou depende do agente que se usa para a produzir, da substância intermediária eleita como sujeito da acção do calor?” Na prática, Carnot queria descobrir, deixando transparecer o seu espírito de engenheiro, qual podia ser a eficiência máxima de uma máquina e se tal dependia do agente utilizado para a produção de trabalho.

Com o intuito de explorar esta questão, o engenheiro Carnot iniciou uma odisséia que, baseada em hipóteses e numa grande imaginação, ainda haveria que dar muito que falar. A odisséia que estava prestes a começar era a das máquinas reversíveis. Veja-se em mais um excerto a forma como Carnot iniciou este delicado assunto;

*... Ali onde existe uma diferença de temperatura, pode haver produção de potência motriz. Reciprocamente, onde se puder consumir esta potência, será possível produzir uma diferença de temperatura, poderá provocar-se uma ruptura de equilíbrio no calórico... É um facto experimental que a temperatura dos fluidos gasosos se eleva por compressão e diminui*

por expansão. Aqui temos um meio seguro para alterar a temperatura dos corpos e romper o equilíbrio do calórico tantas vezes quantas se queira com a mesma substância. O vapor de água, empregue de modo inverso ao que se utiliza nas máquinas a vapor, pode considerar-se assim como um meio de romper o equilíbrio do calórico. Para que se compreenda basta reflectir com atenção sobre o modo como se produz a potência motriz pela acção do calor sobre o vapor de água. Imaginemos dois corpos A e B mantidos ambos a uma temperatura constante, sendo a de A maior do que a de B: esses dois corpos, aos quais se pode dar ou tirar calor sem fazer variar a sua temperatura, farão as funções de dois depósitos infinitos de calor. Chamaremos fogão ao primeiro e refrigerador ao segundo.

Se se quer produzir potência motriz pelo transporte de uma certa quantidade de calor do corpo A para o corpo B, poderá proceder-se da seguinte maneira:

1º Retira-se calórico do corpo A para formar vapor, quer dizer, faz-se com que este corpo desempenhe as funções de fogão, ou melhor dito do metal que constitui a caldeira de uma máquina vulgar; suponhamos que o vapor se origina à mesma temperatura do corpo A.

2º Uma vez que se recebeu o vapor com uma capacidade extensível, tal como um cilindro dotado de um êmbolo, aumenta o volume dessa capacidade e portanto do vapor. Ao expandir-se a sua temperatura descera espontaneamente, como ocorre com todos os fluidos elásticos; suponhamos que a expansão continua até que a temperatura seja precisamente a do corpo B.

3º Condensa-se o vapor colocando-o em contacto com o corpo B, e exercendo sobre ele simultaneamente uma pressão constante até que fique completamente no estado líquido. O corpo B desempenha aqui o papel da água nas máquinas vulgares, com a diferença de que condensa o vapor sem se misturar com ele e sem alterar a temperatura.

As operações que acabámos de descrever poderiam realizar-se tanto num sentido como no sentido contrário... Nas primeiras operações teve lugar a produção de potência motriz e o transporte de calórico do corpo A para o corpo B; nas operações inversas, há simultaneamente consumo de potência motriz e retorno de calórico do corpo B ao corpo A. Mas se em ambos os processos se actuou sobre a mesma quantidade de calor, e não se produziu perda nem de potência motriz nem de calórico, a quantidade de potência motriz produzida no primeiro caso será igual à que se gastou no segundo, e a quantidade de calórico que passou do corpo A para o corpo B será igual à quantidade de calórico que volta a passar do corpo B para o corpo A, de modo que se poderia fazer um número indefinido de operações alternativas deste tipo sem produzir em definitivo potência motriz, nem ceder calórico de um corpo a outro. Ora bem se existisse algum procedimento para empregar o calor de um modo mais vantajoso que os usados até aqui, quer dizer, se fosse possível, por qualquer outro método, fazer com que o calórico produzisse uma potência motriz maior do que a obtida na nossa primeira série de operações, bastaria tomar uma parte dessa potência para fazer voltar, pelo método que indicámos, o calórico do corpo B ao corpo A, do refrigerador ao fogão, para restabelecer as coisas ao seu estado primitivo e situar-se em condições de voltar a empregar de novo uma operação completamente análoga à primeira e assim sucessivamente: isto seria não só o movimento perpétuo, mas sim uma criação indefinida da força motriz sem consumo de calórico, nem de qualquer outro agente. Uma criação semelhante é totalmente contrária às ideias recebidas até ao presente, às leis da mecânica...; é inadmissível. Deve-se portanto concluir que *o máximo de potência motriz que se obtém empregando o vapor é também o máximo de potência motriz realizável por qualquer outro procedimento.* (pp. 43-46).

Está provado que esta história está recheada de brilhantes e sagazes mentes! Para além de todas as personagens que já haviam surgido e a haviam enriquecido com notáveis e fascinantes raciocínios, chega o engenheiro Carnot. Como forma de saber se era possível aumentar a eficiência de uma máquina, através da alteração do seu agente, Carnot empreendeu um notável estudo. A partir de um raciocínio totalmente abstracto, o

imaginativo engenheiro apresentou ao mundo uma máquina cujo funcionamento é contrário ao das máquinas habituais.

O engenheiro francês começou por descrever o procedimento das máquinas a vapor reais, em que, as variações de temperatura do vapor de água eram feitas à custa de sucessivas compressões (para aumentar a temperatura) e de expansões (para diminuir a temperatura). Para que todos acompanhassem o seu raciocínio, Carnot esquematizou em três passos como se daria um ciclo de uma máquina que transforma o calor em trabalho, através da compressão e da expansão do vapor de água. Ele pede para que todos imaginem a existência de dois corpos, A e B, o primeiro com uma temperatura superior à do segundo e ambos fontes e também receptores ilimitados de calórico. No primeiro passo, o corpo A fornece a quantidade de calórico necessária para que haja formação de vapor de água. No segundo passo, o vapor de água expande-se e, como consequência, diminui a sua temperatura até atingir a do corpo B. Por último, no terceiro passo, o vapor de água fica em contacto com o corpo B até que a sua passagem ao estado líquido se dê na totalidade. O mecanismo representado nos passos anteriores não é mais do que a representação de um ciclo da máquina a vapor. O corpo A representa a caldeira e o corpo B representa o condensador, com a diferença de que aqui a condensação não se dá com água fria, mas sim com a expansão do vapor e o contacto com o corpo B.

A grande novidade surge quando Carnot, num rasgo de grande imaginação, sugere que os passos poderiam ocorrer pela ordem contrária. Ou seja, sugere que a passagem do calórico se dê do corpo B (condensador) para o corpo A (caldeira). Para que o ciclo oposto ocorresse bastava que fosse o corpo B a ceder o calórico necessário para a formação de vapor e desta vez, este fosse comprimido até atingir a temperatura do corpo A. Ao mesmo tempo que se dá a passagem do calórico do corpo B para o corpo A, há consumo de uma parte da potência motriz. Desta forma, o engenheiro Carnot idealizava uma máquina em que a quantidade de calórico era constante, apenas passava de um corpo para o outro e podia fazê-lo nos dois sentidos, claro que ao idealizar tal máquina, Carnot desprezava qualquer força de resistência. Isto significava que os ciclos podiam dar-se eternamente, com uma produção de potência motriz ilimitada, pois, havia sempre a mesma quantidade de calórico para passar de um corpo ao outro. Uma vez que o processo é cíclico, é conhecido, hoje em dia, por ciclo de Carnot.

Com este raciocínio, o engenheiro pretendia mostrar que a eficiência das máquinas a vapor não dependia do agente que era utilizado para as fazer funcionar. A máquina mais eficiente que se poderia encontrar seria uma máquina que conseguisse funcionar nos dois sentidos, utilizando sempre o mesmo calórico. Para que esta condição fosse satisfeita bastava que existissem dois corpos a temperaturas diferentes, por onde o calórico pudesse fluir. E assim o engenheiro Carnot explicava que a alteração do agente não deveria ser um factor do qual dependesse a eficiência da máquina.

A este tipo de máquinas engendrado por Sadi Carnot foi dado o nome de máquinas reversíveis. No entanto, citando Laidler (2002, p.30), “Ele não usou a palavra «reversibilidade», a qual foi sugerida muito depois por Peter Guthrie Tait”.

Acerca do excerto, Ordóñez (p.46) faz uma nota que não se deve deixar de referir. As palavras *movimento perpétuo* compreendem não apenas um movimento capaz de se prolongar indefinidamente, como também a criação de potência motriz em quantidade ilimitada. Esta nota parece explicar o motivo de Carnot afirmar que tal movimento é contrário às ideias aceites pela mecânica. Não fazendo a devida ressalva poder-se-ia questionar a afirmação de Carnot, atendendo a que a Lei da Inércia pressupõe que os corpos se possam mover eternamente.

Note-se, ainda, que o termo «reversibilidade», neste caso, não significa apenas voltar para trás. A máquina reversível idealizada por Carnot, ao funcionar em sentido contrário, tem que ser reversível em cada passo. Citando Laidler (2002, p.30), “... se uma substância estiver a ser arrefecida reversivelmente, a temperatura externa tem que ser em todos os instantes infinitesimal mais baixa do que a temperatura da substância e como consequência o arrefecimento deve ser infinitamente lento.” Não parece muito viável a existência de uma máquina infinitamente lenta e este processo parece estar condenado a existir apenas na imaginação de cada um. Carnot não estava longe das idealizações da mecânica, em que factores tão reais como as forças resistentes, são normalmente desprezados. Relembre-se a célebre experiência de Galileu realizada na torre de Pisa. A mesma estabelece um paralelo entre Galileu e Carnot, no que respeita ao gosto de ambos pelas «experiências pensadas». À semelhança de Carnot, Galileu baseou os seus estudos em raciocínios abstractos e baseados na imaginação. Normalmente, desprezava a resistência do ar e foi baseado nesta idealização que ditou que dois corpos de massas diferentes, quando largados da mesma altura, deveriam atingir o solo no mesmo instante de tempo.



Com vista a apresentar uma defesa mais consistente para a sua hipótese, Carnot voltou a fazer um estudo dos factores de que depende a eficiência da máquina. Basta folhear um pouco mais do livro e, passadas duas páginas, o engenheiro Carnot retoma o assunto. Veja-se, então mais este exemplo de Carnot;

Imaginemos um fluido elástico, o ar por exemplo, encerrado num vaso cilíndrico *abcd*, provido (...) do êmbolo *cd*; suponhamos ainda os corpos A e B que se mantêm a uma temperatura constante, sendo a de A mais elevada do que a de B; concentremo-nos agora na série de operações que se vão descrever:

1º Contacto do corpo A com o ar encerrado no vaso *abcd*, ou com a parede deste vaso, parede que se supõe transmitir facilmente o calórico. Através deste contacto o ar encontra-se à mesma temperatura do corpo A; *cd* é a posição actual do êmbolo.

2º O êmbolo levanta-se gradualmente, chegando a ficar na posição *ef*. O corpo A e o ar estão sempre em contacto, pelo que o segundo se mantêm a temperatura constante durante a expansão. O corpo A proporciona o calórico necessário para manter a temperatura constante.

3º Retira-se o corpo A, e o ar já não se encontra mais em contacto com nenhum corpo capaz lhe proporcionar o calórico; o êmbolo no entanto continua a mover-se e passa da posição *ef* à posição *gh*. O ar expande-se sem receber calórico, e a sua temperatura diminui. Imaginemos que diminui até se tornar igual à do corpo B: nesse momento o êmbolo pára e ocupa a posição *gh*.

4º Coloca-se o ar em contacto com o corpo B; comprime-se pelo retrocesso do êmbolo que desce da posição *gh* até à posição *cd*. O ar no entanto permanece a temperatura constante, a causa do seu contacto com o corpo B ao qual cede o seu calórico.

5º Separado do corpo B, continua a compressão do ar que, ao encontrar-se assim isolado, eleva a temperatura. Continua-se a compressão até que o ar adquira a temperatura do corpo A. O êmbolo passa durante este período à posição *ik*.

6º Volta a pôr-se o ar em contacto com o corpo A; o êmbolo vai da posição *ik* à posição *ef*; a temperatura permanece invariável.

7º A 3ª operação repete-se, depois continuam as operações 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 4, 5 e assim sucessivamente.

... Todas as operações acima descritas podem realizar-se num sentido e no sentido inverso. Imaginemos que depois do sexto período, quer dizer, com o êmbolo chegado à posição *ef*, faz-se voltar à posição *ik*, mantendo ao mesmo tempo o ar em contacto com o corpo A: o calórico proporcionado por esse corpo durante o sexto período voltará à sua fonte, quer dizer ao corpo A, e as coisas ficam como estavam no final do quinto período. Se agora se separar o corpo A, e se levar o êmbolo de *ik* a *cd*, a temperatura do ar descerá tantos graus como se havia aumentado no quinto período, e será a do corpo B. Evidentemente pode continuar-se uma série de operações inversas das que descrevemos primeiramente: basta situar-se nas mesmas circunstâncias e realizar para cada período um movimento de dilatação em vez de um de compressão e reciprocamente.

O resultado das primeiras operações tinha sido a produção de uma certa potência motriz e o transporte do calórico do corpo B ao corpo A; o resultado das operações inversas é o consumo de potência motriz produzida e a volta de calórico do corpo B ao corpo A: de modo que estas duas séries de operações se anulam, se neutralização de alguma maneira uma à outra.

Agora é fácil de provar a impossibilidade de fazer o calórico produzir uma quantidade de potência motriz superior à que obtivemos na nossa primeira série de operações. Isto demonstra-se com um raciocínio semelhante ao anterior. O raciocínio terá aqui um maior grau de exactidão: no final de cada ciclo de operações, o ar de que

nos servimos para criar a potência motriz leva-se precisamente ao estado em que se encontrava no princípio, algo que não ocorria com o vapor de água...

Elegemos o ar atmosférico como instrumento que devia criar a potência motriz do calor; mas é evidente que os raciocínios teriam sido os mesmos para qualquer outra substância gasosa, e inclusivamente para qualquer outro corpo susceptível de variar a temperatura por compressões e dilatações sucessivas, o que abarca todos os corpos da natureza, ou pelo menos todos os que são apropriados para realizar a potência motriz do calor. Assim, por este raciocínio chegamos a estabelecer a proposição seguinte:

*A potência motriz do calor é independente dos agentes que intervêm para a realizar; a sua quantidade depende unicamente da temperatura dos corpos entre os quais se faz, ..., o transporte de calórico.* (pp. 51-55).

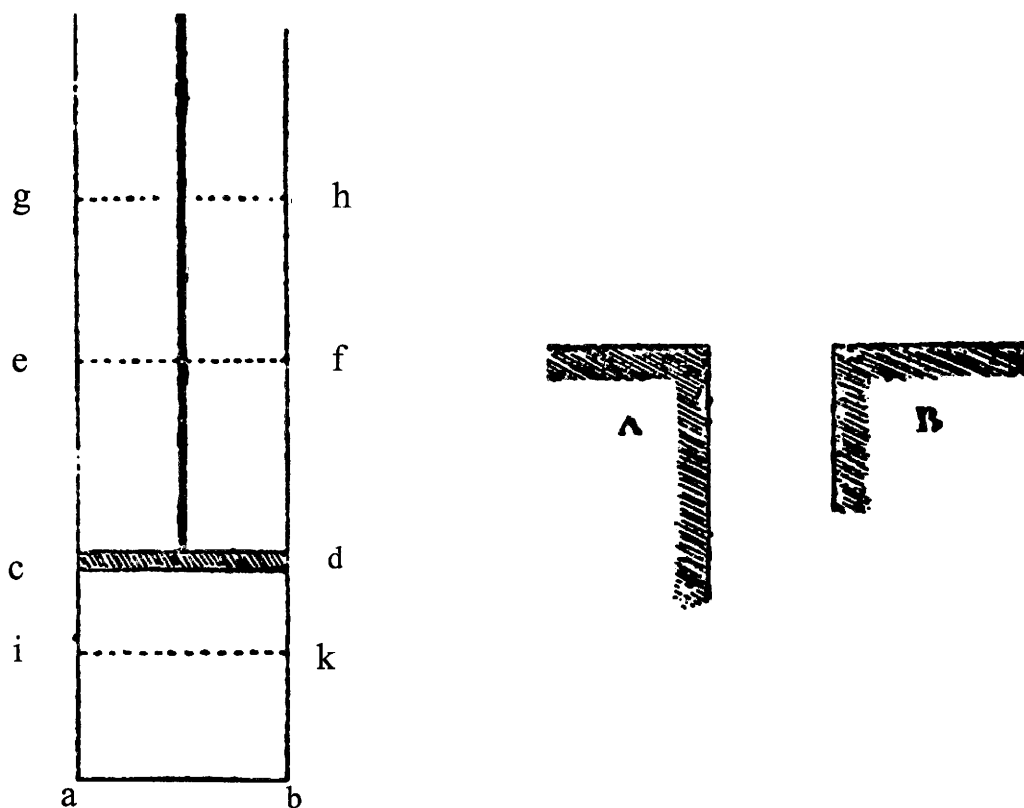


Figura 8- Máquina reversível de Carnot <sup>9</sup>

Com este seu último enunciado, Carnot deixava uma mensagem de ouro a todos os outros engenheiros que tentavam aumentar a eficiência da máquina a vapor. Era escusado alterar materiais, o *design* ou até mesmo os agentes utilizados, tal como o vapor de água. A eficiência da máquina apenas dependia das temperaturas entre as quais trabalhava. O engenheiro militar com espírito de cientista chegou a esta conclusão, recorrendo novamente à sua imaginária máquina reversível. Citando Baeyer (1998, p.44), “O teorema de Carnot é

<sup>9</sup> Imagem retirada do livro de Carnot, traduzido por Ordóñez (1987, p.52)

o exemplo mais impressionante de toda a física do triunfo da teoria sobre a prática, da abstracção sobre a ciência...”

### 3.11. 5. Em busca da máxima potência motriz

Encontrada uma resposta para a primeira questão, Carnot propunha uma outra, com a qual pretendia saber em que condições é que se poderia falar de máxima potência motriz. No seu primeiro enunciado, afirmava que o máximo de potência motriz obtido com o vapor de água era também o máximo de potência motriz alcançado por qualquer outro processo. Agora, Carnot questionava-se acerca do sentido da palavra *máximo*. Veja-se em mais um excerto a forma como o imaginativo engenheiro desenvolve o assunto e encontra uma resposta para a sua própria questão;

... Qual é (...) o sentido da palavra *máximo*? Como é que se reconhecerá que se alcançou esse máximo? Como se saberá que o vapor se utiliza da forma mais vantajosa possível para a produção de potência motriz?

Posto que todo o restabelecimento de equilíbrio pode ser causa de produção de potência motriz, todo o restabelecimento de equilíbrio que se faça sem produção desta potência deverá considerar-se como perdida: ora bem, (...) qualquer variação de temperatura que não se deva a uma variação de volume nos corpos, não pode ser senão um restabelecimento inútil de equilíbrio do calórico; a condição necessária do máximo é portanto *que não se realize nos corpos empregos para realizar potência motriz do calor nenhuma troca de temperatura que não se deva a uma troca de volume*. Reciprocamente, todas as vezes que se cumpra esta condição, obter-se-á o máximo.

Todas as variações de temperatura que não se devam a uma variação de volume ou a uma acção química (...) deve-se necessariamente à passagem directa de calórico de um corpo mais ou menos quente a um frio. Esta passagem dá-se principalmente através do contacto entre corpos a temperaturas diferentes: por isso deve evitar-se sempre que possível um contacto semelhante. Sem dúvida que não se pode evitar completamente; mas, ao menos, é necessário actuar de forma a que os corpos postos em contacto difiram pouco de temperatura.

Quando na nossa demonstração supusemos que o calórico do corpo A era empregue para formar o vapor, considerava-se que o vapor se formava à mesma temperatura do corpo A: assim o contacto só teria lugar entre corpos com temperaturas iguais; a variação de temperatura que ocorre em seguida deve-se à dilatação, como consequência da variação de volume (...) Cumpram-se as condições do máximo. Na realidade as coisas não podem acontecer rigorosamente como supusemos. Para determinar a passagem de calórico de um corpo a outro, é necessário que o primeiro tenha um excesso de temperatura; mas também tal excesso pode considerar-se tão pequeno quanto se queira; na teoria pode considerar-se nulo, sem que por isso estes raciocínios percam a sua exactidão. À nossa demonstração pode fazer-se uma objecção mais real como esta:

Quando se toma calórico do corpo A para produzir vapor e se condensa esse vapor colocando-o em contacto com o corpo B, a água empregue para o formar, que se supunha primeiro à temperatura do corpo A, encontra-se no final da operação à temperatura do corpo B; arrefeceu. Se se quiser voltar a empreender uma operação semelhante à primeira, se se quer criar uma nova quantidade de potência motriz com o mesmo instrumento, com o mesmo vapor, é necessário voltar a pôr as coisas no seu estado primitivo; é necessário restituir à água o grau de temperatura que tinha no principio. Sem dúvida isto pode fazer-se pondo-a em contacto imediatamente com

o corpo A; ora bem, em tal caso há então um contacto entre corpos a temperaturas diferentes e perda de potência motriz: resultaria executar a operação inversa, quer dizer devolver ao corpo A o calórico empregue para elevar a temperatura do líquido.

Pode resolver-se esta dificuldade supondo infinitamente pequena a diferença de temperatura entre o corpo A e o corpo B; a quantidade de calor necessária para levar o líquido à sua primeira temperatura também será infinitamente pequena e desprezável respectivamente à que se necessita para originar o vapor, quantidade sempre finita.

... Se a proposição está demonstrada para o caso em que a diferença de temperaturas dos dois corpos é infinitamente pequena, estender-se-á facilmente ao caso geral. Com efeito, se se pretendesse produzir potência motriz pelo transporte de calórico do corpo A ao corpo Z, sendo a temperatura deste muito diferente da do primeiro, imagináramos uma série de corpos B, C, D, etc. de modo a que as temperaturas intermédias entre A e B fossem escolhidas de forma a que a que as diferenças entre A e B, B e C, etc. fossem todas infinitamente pequenas. O calórico libertado de A chegaria a Z só depois de ter passado pelos corpos B, C, D, etc. e de ter produzido em cada um desses transportes o máximo de potência motriz. Aqui as operações inversas seriam todas possíveis... (pp.46,47).

Nesta fase do seu livro, Carnot explicou que para que se atingisse o máximo de potência motriz era necessário que as variações de temperatura dos corpos fossem devidas exclusivamente a variações de volume provocadas pela compressão e pela dilatação. O engenheiro alertou para o facto de haver uma perda de potência motriz de cada vez que dois corpos a temperaturas diferentes ficam em contacto. De modo a que estas perdas de calor fossem mínimas, Carnot imaginava agora uma máquina, em que o calórico passava por vários corpos, cuja diferença de temperatura entre si era infinitamente pequena. O objectivo era a produção da quantidade máxima de trabalho, enquanto o calórico passava do corpo quente para o corpo frio.

Continuando a leitura do engenheiro Carnot, pode descobrir-se algo mais que completa a informação relativa à máxima obtenção de potência motriz. É logo no parágrafo seguinte que Carnot cede todas as pistas para um aproveitamento máximo do calor;

... Pode comparar-se com bastante exactidão a potência motriz do calor com a de uma queda de água; ambas têm um máximo que não pode ser ultrapassado; qualquer que seja a máquina empregue para receber a acção da água, e qualquer que seja a substância empregue para receber a sua acção. A potência motriz de uma queda de água depende da sua altura e da quantidade de líquido; a potência motriz do calor depende da quantidade de calórico empregue e do que se poderia denominar, e efectivamente nós chamar-lhe-emos assim, da altura da sua queda, a diferença de temperatura dos corpos entre os quais se realiza a troca de calórico. Na queda de água, a potência motriz é rigorosamente proporcional à diferença de nível entre o depósito superior e o inferior. Na queda de calórico a potência motriz aumenta indubitavelmente com a diferença de temperatura entre o corpo quente e o corpo frio; mas ignoramos se é proporcional a essa diferença. Ignoramos, por exemplo, se a queda de calórico de 100° a 50° proporciona mais ou menos potência motriz do que a queda do mesmo calórico de 50° a 0°... (p. 49)

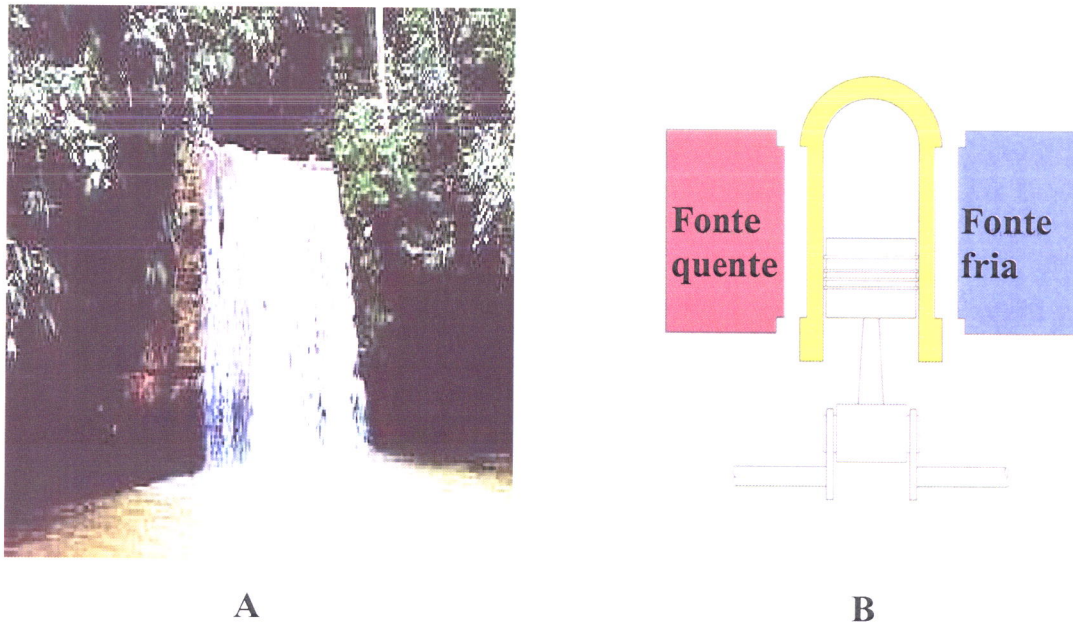


Figura 9 – (A) Queda de água; (B) máquina de Carnot <sup>10</sup>

Neste ponto, o engenheiro estabelece a notável analogia, anteriormente mencionada, entre a máquina hidráulica e a máquina a vapor. A analogia era validada através de dois pontos em comum entre estas máquinas. O primeiro refere-se à queda que, no caso da água, está relacionada com uma altura e no caso do calórico, com uma diferença de temperaturas. O segundo ponto em comum entre os exemplos, prende-se com o facto da queda produzir trabalho ao fazer movimentar algo. A queda de água fazia mover uma roda, enquanto que a queda de calórico fazia mover um êmbolo. A analogia teve especial interesse pelo contributo que trouxe. Tendo conhecimento de que, no caso da máquina hidráulica, quanto maior fosse a altura da queda da água, maior seria o trabalho realizado, Carnot extrapolou a informação para a máquina a vapor. Assim, entendeu que, numa máquina a vapor, quanto maior fosse a altura da queda do calórico, maior seria o trabalho produzido pela mesma. Por queda de calórico, entende-se a sua passagem do corpo a temperatura mais elevada para o corpo a temperatura mais baixa. Desta forma, a altura da queda do calórico seria tanto maior quanto maior fosse a diferença de temperatura dos corpos por entre os quais o calórico fluía.

<sup>10</sup> Imagem A retirada de [www.brasilnoar.com.br/.../pontos\\_tur1.asp](http://www.brasilnoar.com.br/.../pontos_tur1.asp)  
Imagem B retirada do livro de Atkins (1994, p. 15)



O engenheiro transmitia, assim, mais uma pista essencial para todos aqueles cujo interesse era o de saber quais os factores que poderiam levar a uma maior eficiência da máquina a vapor. A partir daqui passava a ser do conhecimento de quem lia o livro de Carnot que a potência motriz aumentava com o aumento da diferença de temperatura entre o corpo quente e o corpo frio. Quanto maior fosse a queda de calórico, maior seria a quantidade de trabalho produzido. Para além desta dica, Carnot ainda fornecia a informação de como seria possível aumentar esta diferença de temperatura entre os corpos. Serão, mais uma vez, as palavras do imaginativo engenheiro a ilustrar este contributo, através do seguinte excerto:

... É necessário que o gás ao expandir-se passe de uma temperatura muito elevada a outra muito baixa, o que existe uma grande variação de volume e de densidade, e consequentemente que o gás se encontre ao princípio a uma pressão muito grande, ou então que adquira ao dilatar-se um volume enorme, condições difíceis de cumprir. A primeira necessita do uso de recipientes muito sólidos para conter o gás debaixo de uma grande pressão e a uma temperatura muito alta; a segunda necessita do uso de recipientes de dimensões muito consideráveis. (p. 88).

Para conseguir aumentar a diferença entre as temperaturas da fonte quente e da fonte fria, o engenheiro aconselha o uso de um gás a alta pressão. Sabendo que quanto maior fosse a pressão a que o gás se encontrava maior seria a sua temperatura, a utilização de gás a alta pressão seria uma forma de aumentar a temperatura da fonte quente (de onde sai o calor). Por outro lado, se o gás se dilatasse e passasse a ocupar um volume enorme, a sua temperatura desceria consideravelmente, uma vez que a uma pressão muito reduzida corresponde uma temperatura baixa. Assim, Sadi Carnot sugeria uma hipótese para aumentar a temperatura do corpo de onde o calor partia (através do uso de alta pressão) e uma hipótese para diminuir a temperatura do corpo para o qual o calor se dirigia (através do aumento do volume). Juntamente com as suas sugestões, Carnot alertava para os inconvenientes que daí advinham. Em relação à primeira, ele lembrava que era necessário o uso de recipientes muito sólidos para suportar os elevados valores de pressão e temperatura. Quanto à segunda sugestão, para quem decidisse segui-la era bom não se esquecer que tal impunha o uso de recipientes de dimensões enormes.

Restava tirar uma dúvida a que Carnot também se propôs responder; será que para uma dada diferença de temperaturas, a quantidade de trabalho produzida, é sempre igual, independentemente de se tratar de temperaturas mais elevadas ou mais baixas? Mais uma

vez, pensa-se que o mais adequado para a exploração da questão será a apresentação das sábias palavras do próprio Carnot. Veja-se, então, mais um excerto;

Vimos que a quantidade de potência motriz gerada pelo transporte de calórico de um corpo a outro dependia essencialmente das temperaturas dos dois corpos, mas não demos a conhecer nenhuma relação entre essas temperaturas e as quantidades de potência motriz produzidas. Em primeiro lugar pareceria bastante natural supor que, para diferenças iguais de temperatura, as quantidades de potência motriz produzidas fossem iguais entre si; quer dizer que, por exemplo, a passagem de uma quantidade de calórico dada por um corpo A mantido a 100° a um corpo B, mantido a 50°, deve dar lugar a uma quantidade de potência motriz igual à que se geraria no transporte do mesmo calórico de um corpo B, mantido a 50°, a outro C, mantido a 0°. Uma lei semelhante seria sem dúvida muito notável, mas não se têm motivos semelhantes para admiti-la *a priori*. Vamos discutir a sua realidade por meio de raciocínios rigorosos.

O ar (...) que ocupa o espaço *abcd* e que se encontra à temperatura de 1°, pode ocupar um espaço *abefe* e adquirir a temperatura de 100° por dois meios diferentes:

1° Pode aquecer-se primeiro sem fazer variar o seu volume, dilatando-o depois mantendo a sua temperatura constante.

2° Pode começar-se por dilatá-lo, mantendo a temperatura constante, aquecendo-o depois quando já adquiriu o seu novo volume.

Sejam *a* e *b* as quantidades de calor utilizadas sucessivamente na primeira das duas operações, sejam *b'* e *a'* as quantidades de calor utilizadas sucessivamente na segunda; como o resultado final dessas duas operações é o mesmo, as quantidades de calor utilizadas numa e noutra parte devem ser iguais; tem-se então

$$a + b = a' + b'$$

*a'* é a quantidade de calor necessário para fazer passar o gás de 1° a 100°, quando ocupa o espaço *abef*.

*a* é a quantidade de calor necessário para fazer passar o gás de 1° a 100°, quando ocupa o espaço *abcd*.

A densidade do ar é menor no primeiro caso do que no segundo, e... a sua capacidade para o calor deve ser um pouco maior.

Sendo a quantidade *a'* maior do que a quantidade *a*, *b* deve ser maior do que *b'*, como consequência, generalizando a proposição diremos:

*A quantidade de calor devida à variação de volume de um gás é tanto mais considerável quanto mais elevada for a sua temperatura.*

Assim, por exemplo, é necessário mais calórico para manter a 100°, a temperatura de uma certa quantidade de ar cujo volume se duplica, que para manter a 1° a temperatura desse mesmo ar durante uma dilatação completamente análoga.

Essas quantidades diferentes de calor produzirão no entanto,..., quantidades iguais de potência motriz para quedas de calórico iguais, tomadas a diferentes alturas na escala termométrica, de onde se pode retirar a seguinte conclusão:

*A queda de calórico produz mais potência motriz nos valores inferiores do que nos superiores.*

Assim, uma dada quantidade de calórico gerará mais potência motriz passando de um corpo mantido a 1°, a outro mantido a 0°, do que esses dois corpos tivessem possuído as temperaturas de 101° e 100°. (pp. 73-75).

Mais uma vez, Carnot é levado pela imaginação e acaba por concluir que uma «queda» de calor entre temperaturas mais baixas é mais eficiente do que entre temperaturas mais elevadas. A leitura do livro de Carnot é fascinante, não apenas pelos estudos que lá se revelam, como também pela argumentação por si utilizada. Neste excerto, Carnot dá a conhecer o intrincado raciocínio qualitativo que desenvolveu até obter uma resposta para a

sua própria questão. É de salientar a importância deste tipo de raciocínio, que se baseia na reflexão cuidada acerca de algo. Claro que por detrás da ímpar argumentação do engenheiro francês encontra-se sempre a sua notável imaginação. Assim Carnot dá a conhecer ao seu público o seguinte: Uma vez que, no segundo caso o gás sofre o aumento de temperatura só após a sua dilatação, a sua densidade é menor e, a quantidade de calor utilizada para aumentar a sua temperatura é superior à utilizada para aumentar a temperatura do ar quando está encerrado num volume menor (maior densidade). Atendendo a que o resultado final é igual utilizando qualquer dos procedimentos, significa que a quantidade de calor utilizada em ambos deve ser igual. Desta forma, a quantidade de calor fornecida ao ar, enquanto este sofria a dilatação, deverá ser menor no segundo caso do que no primeiro, de forma a equilibrar a anterior diferença de valores. Como no segundo caso o ar dilatava-se a uma temperatura inferior à do primeiro caso, a quantidade de calor fornecida ao ar é menor quando este se encontra a uma temperatura menor. É de notar, no entanto, que a quantidade de potência motriz produzida em ambas as situações é igual. Parece, então, que optando pelo segundo procedimento se consegue uma maior eficiência do que optando pelo primeiro.

Foi este raciocínio, qualitativo e abstracto, que permitiu a Carnot concluir que a eficiência de uma máquina aumenta quando os valores de temperatura entre os quais o calor flui são mais baixos. Agora o engenheiro estava em condições de afirmar que se produz mais potência motriz quando o calor flui de um corpo a  $50^\circ$  para outro a  $0^\circ$  do que quando flui de um a  $100^\circ$  para outro a  $50^\circ$ .

Após estas sugestões para aumentar a eficiência da máquina a vapor é altura para analisar o significado da palavra eficiência e entender se a aceção de Carnot é a mesmo dos dias de hoje. Segundo Laidler (2002, p.30), hoje, ao se analisar o ciclo de Carnot, fala-se da eficiência do sistema, entendida como a quantidade de calor absorvido à mais alta temperatura que é transformado em trabalho. Carnot considerava a eficiência da máquina como a quantidade de trabalho produzida quando uma determinada quantidade de combustível era consumida.

Depois de definido o conceito de eficiência, é altura para voltar a uma das questões colocadas por Carnot no início do seu livro; “Frequentemente se tem suscitado a questão de saber se a potência motriz é limitada, ou se não tem limites...” A interessante obra do engenheiro francês está a chegar ao fim, mas, nas suas últimas linhas, Sadi Carnot responde



a esta questão, efectuando alguns cálculos. Explora, ainda, uma outra que se apresenta oportuna neste momento; será que as alterações por si introduzidas à máquina a vapor conseguiriam marcar o surgimento de uma máquina, sem perdas de calor? Em linguagem actual, dir-se-ia; será que uma máquina construída, tendo em conta todas as dicas de Carnot tem um rendimento de 100%?

Lendo o fascinante livro de Sadi Carnot até à última página, pode encontrar-se a resposta a estas questões na seguinte forma:

... Uma vez que um quilograma de carbono produz 7000 unidades de calor e o número 560 se refere a 1000 unidades, é necessário multiplicá-lo por 7, o que dá

$$7 \times 560 = 3920$$

Esta é a potência motriz de um quilograma de carbono.

Para comparar este resultado com os resultados da experiência, examinemos que potência motriz é gerada realmente por um quilograma de carbono nas melhores máquinas de fogo conhecidas.

As máquinas que apresentaram até agora os resultados mais vantajosos são as grandes máquinas de dois cilindros empregues para retirar a água das minas de estanho e cobre de Cornwall. Os melhores resultados que proporcionaram são os seguintes:

56 milhões de libras de água forma elevados um pé inglês por cada 88 libras de carbono queimado. Isto equivale a levantar, por quilograma de carbono, 195 metros cúbicos a um metro de altura e por conseguinte a produzir 195 unidades de potência motriz por quilograma de carbono queimado. 195 é só a vigésima parte de 3920, máximo teórico: por conseguinte só se utilizou 1/20 da potência motriz do combustível.

Tomámos o nosso exemplo entre as melhores máquinas a vapor conhecidas.

A maior parte das restantes são muito inferiores (...) Na prática não se deve esperar poder aproveitar toda a potência motriz dos combustíveis. Os intentos que se fizeram para se aproximar desse resultado foram mais prejudiciais do que úteis, porque escondiam outras considerações importantes. A economia do combustível é só uma das condições que têm que cumprir as máquinas de fogo; em muitas circunstâncias é apenas secundária e deve ceder lugar à segurança, à solidez; à duração da máquina, à limitação do lugar que deve ocupar, ao pouco gasto da sua montagem, etc. Saber apreciar em cada caso (...) as considerações de conveniência e de economia (...), saber discernir o importante do acessório (...) com o fim de chegar com os meios mais fáceis aos melhores resultados, esse deve ser o principal talento do homem chamado a dirigir, a coordenar os trabalhos entre os seus semelhantes e faze-los convergir até um fim útil seja de que tipo seja. (p. 98).

A dada altura da sua obra (p.80), Carnot inicia alguns cálculos, com os quais pretendia saber qual a quantidade de potência motriz gerada a partir de uma quantidade de combustível. Neste excerto, efectuou um cálculo que lhe permitia conhecer o valor teórico da quantidade de potência motriz gerada a partir de 1 quilograma de carbono e obteve um valor de 3920. Neste momento, o engenheiro estava em condições de responder à sua questão inicial; a potência motriz produzida por uma dada quantidade de combustível tem um limite. Conhecido o valor teórico do trabalho gerado a partir de 1 quilograma de

combustível, o engenheiro iniciou uma nova jornada, desta vez para saber se uma máquina real conseguiria produzir a quantidade de trabalho por ele avaliada. Começou por calcular o trabalho gerado pelas máquinas mais eficientes que se conheciam até ao momento. Com tal cálculo, poderão ter surgido sentimentos de desilusão em Carnot, ou talvez o engenheiro já esperasse... O que se passa é que, comparando o valor teórico com o valor obtido para a máquina mais eficiente, verifica-se que o último corresponde a apenas 1/20 do primeiro.

Na posse de tais resultados, Carnot informou os seus leitores, sedentos de uma máquina mais eficiente, que na prática, não é possível aproveitar toda a potência motriz dos combustíveis. Muitos dos esforços levados a cabo pelos anteriores estudiosos das máquinas, não levariam a qualquer aumento da eficiência e quantas vezes não serviriam para piorar a situação, ocultando aspectos importantes da mesma. Nesta linha de pensamento, Sadi Carnot terminou a sua obra com um alerta e um conselho a todos aqueles que ansiosamente se esforçavam por aumentar a quantidade de trabalho gerado a partir de uma certa quantidade de combustível. O seu alerta foi no sentido de não ser possível aproveitar toda a potência motriz existente num combustível, expressão esta que hoje certamente Carnot substituiria por não ser possível transformar todo o calor em trabalho. Sendo esta uma condição inerente às máquinas a vapor, era escusado fazerem-se esforços para a eliminar. Carnot alerta ainda para os perigos de tais esforços, pois na ânsia de eliminar as perdas de calor, os estudiosos da máquina a vapor acabavam por esconder considerações importantes. Provavelmente, quando Sadi Carnot se referiu a estas considerações importantes, pensava na condição essencial da existência de dois recipientes a temperaturas o mais diferentes possível. Tal procedimento leva a perdas de calor inevitáveis! O engenheiro Carnot aconselhava os estudiosos da máquina a vapor a preocuparem-se menos com a economia do combustível. Segundo ele, este seria apenas um dos factores a ter em conta e outras questões como a segurança, a solidez, a duração da máquina, entre outros, não deveriam ser desprezadas. O seu conselho foi direccionado a todos os que desenvolvem qualquer tipo de trabalho. Para ele, a verdadeira sabedoria está em saber analisar as situações de modo a que se atinja o melhor resultado possível.

Com este sábio conselho, o engenheiro Sadi Carnot deu por terminado o seu livro que, infelizmente, viria ser a sua única obra escrita.

### 3.11. 6. A importância dos estudos de Carnot

Neste momento, não devem restar dúvidas de que o livro de Carnot marcou uma nova etapa no mundo da Física. Se depois de ser publicado não teve a merecida valorização, no ano de 1834, o físico francês Clapeyron publicava uma versão da obra que haveria de dar muito que falar. Esta nova versão tinha apenas alguns pormenores matemáticos acrescidos. Os estudos de Carnot eram importantes demais para serem desprezados e, alguns físicos como Clapeyron e William Thomson sabiam-no. Este último, após a busca infrutífera da obra de Carnot pelas ruas de Paris, veio a conhecer a versão de Clapeyron e só mais tarde o original. A aproximação dos fascinantes estudos de Carnot a físicos como William Thomson, constituiu uma condição essencial para o desenvolvimento da segunda lei da termodinâmica. Pela importância dos contributos do engenheiro francês no desenrolar da história que se segue, considera-se útil, neste momento, a apresentação de um resumo dos mesmos.

No seu livro, Sadi Carnot apresenta os estudos por si realizados em torno da máquina a vapor, dos quais se destacam os seguintes:

- O calor provoca movimento que possui potência motriz. Hoje, dir-se-ia: o calor transforma-se em trabalho.
- Para que se produza potência motriz a partir do calor, é necessário que o calórico seja transportado de um corpo quente para um corpo frio. Carnot sabia que só há fluxo de energia sob a forma de calor na presença de dois corpos a temperaturas diferentes. O fluxo dá-se sempre do corpo que está a temperatura mais elevada para o que está a temperatura mais baixa.
- A potência motriz não depende do agente utilizado, nem do material da máquina, nem do seu formato. Apenas depende das temperaturas dos corpos entre os quais se dá o transporte de calórico. Actualmente dir-se-ia: O trabalho gerado a partir do calor, apenas depende das temperaturas dos corpos entre os quais a energia sob a forma de calor flui.
- A potência motriz é máxima quando as variações de temperatura se devem a variações de volume. Sempre que há contacto de corpos a temperaturas diferentes, há perdas de calor. A variação de temperatura a partir da variação do volume constitui uma forma de reduzir tais perdas.

- A potência motriz é maior quanto maior for a diferença de temperatura dos corpos por entre os quais o «calórico» (energia sob a forma de calor) flui.
- Para valores de temperatura mais baixos, a potência motriz é maior. Gera-se mais trabalho quando o «calórico» flui de um corpo a uma temperatura de 50° C para outro a uma temperatura de 0°C do que quando o calórico flui entre as temperaturas de 100°C e 50°C.
- Quanto maior for a pressão a que o agente está sujeito, maior é a sua temperatura e poder-se-á conseguir uma maior diferença de temperatura entre a fonte e o receptor de calor. Aumentando esta diferença de temperatura, a quantidade de trabalho gerada na máquina aumenta e, desta forma, uma máquina a alta pressão será mais eficiente.
- As máquinas poderiam funcionar em sentido contrário ao habitual (do condensador para a caldeira). O trabalho seria máximo porque nestas máquinas não existiram perdas de calor. Esta imaginária máquina de Carnot ficou conhecida por máquina reversível e o próprio engenheiro que a idealizou condenou-a a existir apenas na imaginação de cada um.
- A potência motriz gerada a partir de uma quantidade de combustível tem um valor máximo que jamais poderá ser ultrapassado. Hoje, dir-se-ia que uma máquina não pode ter um rendimento superior a 100%.
- Não se deve esperar poder aproveitar toda a potência motriz dos combustíveis. Existem sempre perdas de calor que não podem ser evitadas. Não é possível transformar todo o calor em trabalho. Hoje dir-se-ia que nenhuma máquina real consegue atingir um rendimento de 100%, uma vez que há perdas inevitáveis de energia sob a forma de calor para o exterior.

### **3.12. Escritos póstumos de Carnot**

Terminada a análise do livro de Carnot, resta saber o que é que aconteceu a este engenheiro nos anos que se seguiram e qual foi o motivo que o impediu de publicar mais trabalhos. Recorde-se que o seu livro foi publicado no ano de 1824. Laidler (2002, p.31) refere que passados três anos desta data, Sadi Carnot foi chamado para o trabalho activo.

Em menos de um ano, conseguiu regressar a Paris e dedicar-se ao que mais gostava; o calor. Infelizmente, não publicou mais nenhum trabalho, pois uma epidemia de cólera roubou este engenheiro cientista ao mundo, em Agosto de 1832. Não fosse a sua morte prematura, aos 36 anos de idade, e talvez a ciência ainda tivesse avançado mais depressa nas mãos de Sadi Carnot. Muitos dos seus papéis foram destruídos, mas outros que se salvaram provam que o engenheiro poderia estar perto de refutar a teoria do calórico. Ordóñez (p.116) dá a conhecer uma carta escrita pelo irmão do engenheiro Carnot, no ano de 1878 e endereçada ao Presidente e membros da Academia das Ciências. Com esta carta, Hippolite Carnot, senador e irmão de Sadi Carnot, pretendia dar a conhecer os trabalhos deste último, entre os quais se destacam o livro anteriormente analisado e as notas que não foram destruídas após a sua morte. Hippolite afirmava que Sadi Carnot teria feito variadas objecções ao materialismo do calórico. A sustentar a sua argumentação, encontravam-se os escritos póstumos de Sadi, onde estariam registadas outras hipóteses, nomeadamente, que o calor seria um movimento vibratório das moléculas. Nas linhas de Hippolite, ainda se poderia ler que Sadi Carnot chegou a fazer uma equivalência entre calor e trabalho, perfeitamente enquadrada na teoria actual. A nota de Sadi que levou o seu irmão a fazer tal defesa é a seguinte:

Ali onde há destruição de potência motriz, existe simultaneamente produção de calor, numa quantidade precisamente proporcional à quantidade de potência motriz destruída. Reciprocamente, ali onde há destruição de calor, há produção de potência motriz. (p. 118).

Esta nota pode ser um sinal de que o engenheiro Carnot estaria prestes a chegar ao caso particular da primeira lei da termodinâmica, de que o calor e o trabalho são convertíveis. Tais rascunhos parecem apresentar fortes indícios de que o engenheiro francês ainda teria acrescentado muito mais à história da termodinâmica, caso a doença não o tivesse impedido. Não obstante, Hippolite Carnot não necessitava de dar a conhecer as notas do irmão para provar a grandiosidade do seu trabalho. Basta ler um pouco do livro explorado anteriormente para se entender o quanto o seu raciocínio era fascinante e coerente. A errada teoria do calórico foi apenas uma ferramenta por ele usada para atingir os objectivos que pretendia e conseguiu fazê-lo na perfeição! Citando Baeyer (1998):

---

Esta ideia errada provavelmente custou a Carnot a oportunidade de se juntar a Galileu, Newton e Maxwell no panteão dos físicos como o autor das leis da termodinâmica, mas a sua visão era tão clara e o seu propósito tão precisamente definido que apesar dos seus atalhos ele merece o título «fundador da termodinâmica». (p. 35).

De facto, Carnot é merecedor do título proposto por Baeyer. Aliado aos contributos prestados à termodinâmica, cedeu a descrição de máquinas irreais, fruto dos mais abstractos pensamentos que se desenrolavam na sua imaginativa mente. Relembre-se que Sadi Carnot começou por se interessar pelo estudo de uma máquina bem concreta - a máquina a vapor. Este estudo trouxe ao de cima o reconhecimento de um grande cientista que se escondia por detrás da capa do engenheiro militar. Quando iniciou os seus estudos, percebeu que o que regia a máquina a vapor era mais do que um simples mecanismo que servia apenas a esta máquina. Entendeu que o que acontecia durante o seu funcionamento, repetia-se sempre que havia produção de trabalho a partir de calor, independentemente do tipo de engrenagem. A dada altura, a motivação de Sadi Carnot deixou de ser o estudo da máquina a vapor e passou a ser o de encontrar uma lei pela qual todas as máquinas em que se gerasse trabalho a partir do calor se regessem. Num misto de grande imaginação e de intricados raciocínios, o engenheiro conseguiu formular a tal lei geral. Esta lei estabelece que em todas as máquinas que se gera trabalho a partir do calor, este flui de uma zona a temperatura mais elevada para outra a temperatura mais baixa. Esta lei geral não é mais do que a 2ª lei da termodinâmica, em relação à qual parece ser justo dizer-se que deve a sua origem a Sadi Carnot. A 1ª lei da termodinâmica surgiu mais tarde e não será demais sentir a injustiça da morte prematura de Sadi Carnot. Por um lado, os poucos rascunhos que sobraram dos estudos do engenheiro deixam antever que talvez ele pudesse estar prestes a entender algo relacionado com a 1ª lei da termodinâmica. Por outro lado, o pobre engenheiro morreu com dúvidas a pairar no espírito e provavelmente a colocar o seu notável trabalho em causa. As suas dúvidas ficavam a dever-se a factos que por ele ainda eram desconhecidos, tais como o conceito de energia e a conversão de uma forma de energia noutra. Citando Baeyer (1998):

Se a energia é conservada, como decreta a 1ª lei, então o calor produzido pelo fogo é convertido em trabalho realizado pela máquina. Se, por outro lado, a produção de trabalho era devida meramente à queda de calórico de um reservatório para outro, como Carnot acreditava erradamente, o calor não seria utilizado. Qual delas é verdadeira, *conversão* do calor, ou *conservação* do calor? (p. 45).

Faltava a Carnot o conhecimento de que o calor é apenas uma forma de transferir energia. Não obstante, julga-se que este fascinante engenheiro francês conseguiria dissipar as suas dúvidas e talvez até dar a conhecer ao mundo muitos outros avanços no reino da Física. Tal opinião surgiu após a leitura do livro “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”, em que Sadi Carnot consegue empolgar e maravilhar os seus leitores, transportando-os através de um mundo imaginário onde analogias e máquinas reversíveis se encontram com máquinas bem reais como a máquina a vapor.

## Capítulo 4 – Todos os caminhos vão dar à entropia

“A energia do mundo é constante. A sua entropia  
tende para um máximo”

Rudolf Clausius<sup>1</sup>

### 4.1. Um pouco da história de Mayer



Figura 10 – Julius Robert Mayer <sup>2</sup>  
(1814-1878)

A termodinâmica tinha sofrido duas perdas incalculáveis com a morte do engenheiro Sadi Carnot e do conde de Rumford. Mas o estudo do calor sempre exerceu um grande fascínio no Homem e pretendentes à descoberta dos seus segredos nunca faltaram. Da mesma forma que os templos demoravam anos a ser construídos, também a história do calor ia tomando forma à medida que os séculos avançavam. Felizmente, houve sempre

---

<sup>1</sup> Citado por Baeyer (1998, p. 62)

<sup>2</sup> Imagem retirada de <http://www.techfak.uni-kiel.de>



alguém que retomou as ideias de Rumford, de Carnot e de tantos outros, fazendo-as evoluir e conseguindo que a aventura do calor prosseguisse e atingisse o seu auge, com a formulação das leis da termodinâmica. Assim, este romance avança e mais personagens se advinham.

O jovem alemão Julius Robert Mayer estava feliz e determinado. Tinha concluído o curso de medicina e já havia decidido que nem a contrariedade do pai o faria desistir desta aventura. Iria exercer, temporariamente, a sua profissão a bordo de um navio e aproveitar para conhecer alguns dos mais longínquos recantos do mundo. Estes acontecimentos decorriam no ano de 1840, altura em que Mayer tinha 26 anos.

O jovem médico aventureiro tinha nascido no ano da morte do conde de Rumford (1814) e, como se fosse um legado, Mayer foi um dos cientistas que deu continuidade às ideias nascidas na fábrica de canhões. Ideias estas que lançavam a hipótese do calor ser uma forma de movimento e deixavam a vontade de medir a quantidade de calor gerada a partir de uma dada quantidade de trabalho. Desde cedo que o recém formado médico, natural da cidade alemã de Heilbronn, se adivinhava cientista. Segundo Baeyer (1998, p.20), o determinado Mayer, com apenas 10 anos de idade, decidiu levar a cabo a construção de uma máquina perpétua! Para levar avante os seus intentos, colocou uma pequena roda hidráulica na ribeira da sua cidade e, através de uma engrenagem por si inventada, tentou aumentar a potência da roda. A sua ideia era levar a que a pequena e frágil roda conseguisse fazer mover máquinas grandes. Pretendia, então, produzir uma enorme quantidade de potência motriz, a partir da pequena quantidade de energia hidráulica que a sua rudimentar roda conseguia aproveitar. Ou seja, Mayer tentava criar energia do nada. Ao ambicionar construir esta máquina que deveria funcionar sem interrupção a partir de energia que provinha do nada, Mayer partilhava com Carnot o sonho de possuir uma máquina perpétua. Apesar de não o ter conseguido e de, provavelmente, na altura o episódio ter custado alguma frustração, Mayer ganhou uma valiosa lição. Citando Baeyer (1998, p.20), “O fracasso do esquema ensinou-lhe uma lição acerca da natureza do trabalho mecânico que ele nunca haveria de esquecer.” Esta curiosa criança haveria de lembrar-se para sempre que a produção de uma quantidade de trabalho exige o consumo de uma outra entidade, numa quantidade pelo menos igual.

## 4.2. O sangue é mais vermelho nos trópicos

Após a sua graduação, Mayer embarcou num navio mercante holandês que rumava em direcção às ilhas de Java, na Indonésia. Segundo Baeyer (1998, p.20), a função do jovem médico seria a de cuidar da saúde dos 28 homens que faziam parte da tripulação do navio. Depois de três meses de viagem, o médico Mayer terá tido a oportunidade de pôr em prática os seus conhecimentos e cumprir a missão a que se tinha proposto ao embarcar no navio mercante. E se o conde conseguiu viver uma aventura científica numa fábrica de canhões, o médico conseguiu proeza semelhante mas a bordo de um navio. A sua aventura começou quando alguns dos homens da tripulação sucumbiam a uma epidemia. Segundo Baeyer (1998), Mayer terá escrito que:

... poucos dias após a nossa chegada (...) espalhou-se uma epidemia (...) afectava os pulmões. Nas abundantes sangrias que eu realizei, o sangue que saiu da veia do braço tinha uma vermelhidão fora do comum, (...) por causa da cor eu acreditei que tinha ferido uma artéria. (p. 20).

Quem diria que este episódio corriqueiro da vida de um médico haveria de contribuir para o enriquecimento da história do calor!

No seu relato, Mayer refere ter realizado sangrias como uma forma de tratamento. Era usual, por esta altura, tal tratamento que consistia em retirar uma quantidade de sangue do corpo do paciente. Julgava-se que juntamente com este sangue saía o mal de que o doente padecia e o método chegava mesmo a ser praticado em pessoas saudáveis, principalmente em climas tropicais, como uma forma de prevenir futuras doenças provocadas pelo calor. O médico alemão poderia ter gozado o resto da viagem, aproveitando para conhecer os países com que sonhava desde a sua infância. Mas, para bom grado da ciência, a partir do momento em que presenciou que o sangue dos seus pacientes apresentava uma cor vermelha fora do comum, o seu espírito aventureiro alargou-se para outros campos. Mayer já não ansiava apenas em conhecer o mundo geográfico, como também o mundo da ciência.

Até viver aquela situação, o aventureiro médico estava convencido de que nos climas quentes, como aquele que se vivia na Indonésia, o sangue deveria ser mais escuro e não mais vermelho, como havia verificado. Segundo Baeyer (1998, p.21), num dos seus exames enquanto estudante, Mayer tinha sido confrontado com esta questão, à qual havia dado uma

resposta contrária ao que a experiência lhe mostrava neste momento. A questão que constava no exame por si realizado dois anos antes deste episódio teria sido a seguinte: “Que influência exerce a humidade permanente e o tempo quente no estado de saúde de uma pessoa?” A esta questão, Mayer terá respondido que, “... o sangue fica mais rico em carbono, mais escuro e a diferença entre o sangue vermelho e o sangue negro é menor.” Ao verificar que na prática se verificava exactamente o oposto daquilo que esperava, o médico não teve mais sossego e a sua aventura continuou, mas num campo diferente. Em vez de conhecer novos países, ambicionava agora por conhecer algo novo, mas, no mundo da ciência. Segundo Baeyer (1998), o próprio terá desabafado este seu novo interesse da seguinte forma:

Eu (...) investiguei pouco nas distantes partes do mundo, mas preferi ficar a bordo do navio onde podia trabalhar sem interrupção, e onde por mais de uma hora senti que estava inspirado, de tal forma que não voltei a ter um chamamento semelhante antes ou depois... (p. 21).

Com tal desabafo do médico, cujo sonho de infância era o de conhecer outros continentes, é impossível não o imaginar no interior do navio, ansiando que o mesmo atracasse num porto. O seu desejo já não era o de conhecer novas terras, mas sim, tirar partido do silêncio que se faria a bordo quando a tripulação saísse. A sós no navio, Mayer poderia deambular por entre um emaranhado de pensamentos, recorrendo a todos os seus livros, apontamentos, conhecimentos e raciocínios de modo a chegar a conclusões que fizessem sentido e estivessem de acordo com o que havia presenciado. Segundo Baeyer (1998, p.20), infelizmente o curioso médico só tinha estudado Física durante um semestre, o que dificultava a sua tarefa.

### **4.3. A Teoria de Lavoisier do calor animal**

Está então na altura de dar a conhecer a que conclusões chegou Mayer, após tanta meditação. O problema que lhe ocupava os pensamentos foi referido anteriormente e prendia-se com a cor do sangue que ele esperava que fosse muito mais escuro num clima quente e húmido como o que se fazia sentir na Indonésia. Segundo Laidler (2002,p.16), enquanto estudante, Mayer tinha tomado conhecimento da teoria de Lavoisier do calor animal, tendo sido a mesma a despontar o resto do seu raciocínio. Segundo esta teoria, o

carbono dos alimentos reagia com o oxigénio do ar durante o processo da respiração e, desta reacção libertava-se o calor necessário para manter o sangue dos animais quente. Após a combustão dos alimentos no interior dos corpos, a quantidade de oxigénio presente no sangue diminuía, dando lugar à formação de dióxido de carbono, pelo que o sangue se tornava mais escuro. O sangue pobre em oxigénio e rico em dióxido de carbono (sangue venoso) seria conduzido pelas veias até ao pulmão. Aqui, uma troca gasosa seria realizada, havendo libertação dióxido de carbono e entrada de oxigénio na circulação, com a consequente mudança de cor do sangue para um vermelho mais vivo. Este sangue oxigenado seria conduzido para o coração através das artérias. Atendendo à quantidade de oxigénio existente no sangue transportado pelas veias e pelas artérias, ao fazer a sangria nos seus pacientes, o doutor Mayer retirava sempre o sangue de uma veia e não de uma artéria. Se optasse pela artéria, seria muito mais difícil fazer parar de sangrar o paciente. Mas então porque teria o sangue transportado pela veia um vermelho tão vivo que levou Mayer a pensar que, por engano, tinha retirado o sangue de uma artéria?

O médico do navio mercante não sossegou até encontrar uma explicação que lhe parecesse razoável. Havia algo que tinha mudado ao longo da viagem, algo a que Mayer não estaria habituado por nunca ter viajado até tão distante destino. Então, o perspicaz médico terá pensado que este factor que se modificara ao longo da viagem poderia estar na origem da alteração da cor do sangue. O factor em causa era o clima, que se tornava cada vez mais quente e húmido à medida que o navio se aproximava dos trópicos. Segundo Baeyer (1998, p.21), com base neste factor, Mayer terá explicado que, sendo o clima mais quente, um corpo não necessita de produzir uma tão grande quantidade de calor. Uma vez que este era libertado a partir da reacção de combustão dos alimentos, com a redução desta reacção, a produção de dióxido de carbono era menor. Visto este gás ser o responsável pela cor mais escura do sangue venoso (transportado pelas veias), o sangue tomava uma cor mais viva. Desta forma, o médico Mayer podia congratular-se por ter encontrado uma explicação para o facto do sangue dos seus pacientes apresentar uma cor diferente daquela a que estava habituado com os pacientes do seu país, expostos a temperaturas muito menores do que as dos trópicos.

A meditação de Mayer sobre tal assunto levou-o a querer saber mais e de uma resposta desenrolavam-se mais questões que acabariam por cair no domínio da Física. A aventura científica a bordo do navio mercante foi de tal forma grande que deixou o nome

do doutor Mayer ligado ao reino da física, apesar dos seus poucos conhecimentos nesta área.

#### 4.4. O “calor” e o trabalho são convertíveis

O jovem Mayer não tinha ficado curioso e interessado sobre os mistérios que o rodeavam apenas aos 26 anos de idade. Há que lembrar que o seu episódio com a roda de água, quando tinha apenas 10 anos já deixava antever uma criança astuta e curiosa. Agora, com 26 anos e a fazer a viagem dos seus sonhos, ocupava os seus pensamentos com o conjunto de processos que se realizavam no interior do corpo humano.

Segundo Baeyer (1998, p.22), ao reflectir sobre o funcionamento de um corpo, Mayer terá percebido que o mesmo não só produzia calor, mas também trabalho. A sua memória ter-lhe-á recordado que, tal como havia presenciado com a experiência da roda de água, o trabalho não é produzido a partir do nada. Então, já que tinha que haver um factor a produzir trabalho, este factor só poderia ser a combustão dos alimentos que também servia para gerar o calor. Desta forma, os alimentos ingeridos sofreriam no interior do corpo uma combustão que originaria calor e trabalho.

Mayer tinha conhecimento da experiência do conde de Rumford e, ao recordá-la, ficou na posse de mais uma peça que talvez servisse para completar o seu *puzzle*. O conde havia descoberto alguns anos antes de Mayer nascer que o movimento de fricção originava calor. Então, o movimento seria mais um factor a juntar aos anteriores e, desta forma, o médico Mayer era levado a pensar que as reacções químicas que se processavam no interior do corpo humano originavam movimento, trabalho e calor e que estes se podiam converter uns nos outros. Citando Baeyer (1998):

Neste aspecto, pensou ele, o corpo é semelhante a uma máquina a vapor, a qual também queima carbono para produzir movimento, trabalho e calor, e assim as suas reflexões voltaram-se da fisiologia para a física. (p. 22).

Da mesma forma que o conde havia demonstrado interesse em medir a quantidade de calor originado a partir de uma certa quantidade de trabalho, Mayer também ambicionava conhecer este valor. Mais do que a medição da quantidade de calor gerado, o doutor Mayer ia mais longe, pretendendo medir o trabalho produzido a partir de uma dada quantidade de

calor. Citando Baeyer (1998, p.23), “Um lavrador negociará tantos ovos por tantos dólares e vice-versa.” O médico cientista tinha percebido que o trabalho se transformava em calor e considerava importante saber que quantidade de trabalho era necessária para originar uma determinada quantidade de calor. Esta quantificação que o médico do navio mercante ambicionava realizar tem hoje em dia a denominação de equivalente mecânico do calor e indica a quantidade de trabalho que é necessário fornecer para que 1 g de água eleve a sua temperatura 1°C.

#### **4.5. De uma crença metafísica a uma revolução em Física**

Segundo Laidler (2002, p.17), o médico regressou a casa no ano de 1841 e na bagagem, não trazia muitas recordações dos países por onde havia passado. Em contrapartida, na cabeça levava um conjunto de ideias nascidas no silêncio do navio e que, embora ainda um pouco confusas, seriam de grande utilidade para o avanço da Física. Ele tinha entendido que a reacção entre o carbono dos alimentos e o oxigénio do ar originava calor e trabalho e que estes eram convertíveis um no outro. Desta forma, o médico cogitava que calor e trabalho eram diferentes formas de uma mesma entidade a que deu o nome de força e à qual hoje em dia se chama energia.

É curiosa a influência que a religião impunha a muitos dos pensadores, entre os quais se encontrava Mayer. Citando Baeyer (1998):

O que o inspirou a devotar toda a sua vida (...) à promulgação da lei da conservação da energia foi o seu significado religioso. Era para ele nada mais do que a resposta à doutrina do materialismo que ele abominava, e a sua crença propulsionou-o até ao resto do caminho da sua trajectória mental. (p. 24).

O que mais chocava Mayer e o revoltava era o facto da teoria materialista negar a existência de uma alma separada da matéria, ele não podia conceber que o mundo fosse composto apenas por matéria. Então, com todo o fervor em defender a sua religião, tentava mostrar a todos que existia algo denominado força que não era material. Citando Baeyer (1998, p.25), “Mayer formulou o seu conceito de energia como uma arma contra o materialismo. Aqui estava algo para além da matéria, algo imaterial, todavia real, uma nova essência imponderável.”

O contributo do doutor Mayer, no que diz respeito à energia, não ficou por aqui. Tendo conhecimento da teoria da conservação da massa do químico Lavoisier, pensou que talvez houvesse algo em comum entre a massa e a energia. Segundo a teoria de Lavoisier, durante uma reacção química a massa total das substâncias mantém-se constante. Tal, é possível porque os reagentes transformam-se totalmente em produtos da reacção, não existindo criação nem destruição da matéria. O mesmo se passaria com a força (energia nos dias de hoje), pensou Mayer. Esta seria uma entidade que se poderia apresentar de várias formas que se transformavam umas nas outras e da mesma forma que a massa, também a força se conservava. E assim, começava a vislumbrar-se a primeira lei da termodinâmica.

Segundo Baeyer (1998, p.25), um quarto de século depois de ter realizado a sua viagem de navio, o doutor Mayer terá enunciado que o mundo seria feito de três componentes indestrutíveis, sendo estes, a matéria, a força e a alma.

Quando regressou da viagem ao Oriente, Mayer não guardou para si as suas ideias, pelo contrário, ele quis dá-las a conhecer ao mundo. Segundo Laidler (2002, p.17), já em casa, o médico redigiu um artigo que continha os estudos por si efectuados e as conclusões a que havia chegado a bordo do navio mercante. Submeteu o seu artigo a uma revista científica alemã, mas o mesmo não fez qualquer sucesso e o editor da revista rejeitou-o, o que valeu a Mayer uma enorme desilusão. A causa do insucesso terá ficado a dever-se aos seus poucos conhecimentos de Física, o que levava a que o artigo não tivesse o teor científico que era desejado e apresentasse até alguns erros elementares. Citando Baeyer (1998):

O seu raciocínio era mais filosófico do que científico, muita da sua física estava errada, e tinha falta de frutos da experiência e da observação. Em particular o artigo tinha falta de quantificação; Mayer nem sequer mencionou o equivalente mecânico do calor. (p. 25).

Claro que o persistente médico não desistiria de partilhar com o mundo os seus estudos, após este primeiro obstáculo.

Segundo Laidler (2002, p.17), o doutor Mayer depressa reconheceu que eram várias as limitações do seu primeiro artigo e dedicou-se à tarefa de o refazer. Passados nove meses submeteu-o a uma outra revista científica também alemã e que, segundo Smith (1998, p.75), entre os seus leitores incluíam-se vários com interesses no campo da medicina. Desta vez, conseguiu publicar o seu trabalho sob o título de “Notas sobre as Forças da Natureza Inanimada” e o auge da sua felicidade chegou no dia 31 de Maio de



1842. Este foi o dia do seu casamento e o dia em que viu publicados os estudos por si realizados a bordo do navio. Este artigo remodelado continuava sem ser muito impressionante do ponto de vista científico porque o médico continuava a sofrer as consequências das poucas lições de Física que havia recebido. No entanto, um progresso em relação ao anterior determinou a sua publicação. Segundo Baeyer (1998, p.26), o doutor Mayer terá mostrado uma rápida evolução na forma de pensar e de escrever. Neste artigo, Mayer já estimava o equivalente mecânico do calor e a sua principal conclusão era a de que “Forças [energias] eram assim indestrutíveis, transformáveis, imponderáveis objectos.” Baseado em crenças religiosas que asseguravam a sua convicção de que a força era algo imaterial e indestrutível, Mayer chegava bem próximo do princípio da conservação da energia.

Em relação à estimativa do equivalente mecânico do calor, segundo Smith (1998, p.75), Mayer terá concluído que “o aquecimento de uma massa igual de água de 0°C a 1°C corresponde à queda de uma massa igual de uma altura de cerca de 365 metros”. Infelizmente, os cálculos que levaram a tais valores não terão sido publicados. Citando Laidler (2002, p.17), “Mayer mais tarde reivindicou que este artigo estabelecia a sua prioridade para o princípio da conservação da energia.” Há que frisar, porém, que o termo *energia* não era utilizado por Mayer, sendo substituído pelo de *força*.

O doutor Mayer continuou a sua pesquisa sobre o assunto e outros artigos se seguiram. No entanto, o médico não era muito bem aceite no meio científico e, segundo Laidler (2002, p.17), inicialmente as suas ideias foram ignoradas ou ridicularizadas. Situação esta que ajudava a que o jovem aventureiro Mayer desse lugar a um homem infeliz; por um lado o seu orgulho era ferido ao ser alvo de tamanho descrédito por parte do meio científico, por outro lado, tragédias pessoais abatiam-se sobre ele. O infeliz médico passou pelo infortúnio de perder um filho e duas filhas que a doença levou, ainda antes dos três anos de idade. Mayer sentia-se cada vez mais deprimido até que, no ano de 1850, não aguentou tanta tristeza e tentou o suicídio. Felizmente não conseguiu levar avante esta tentativa de pôr fim à sua própria vida e uma grande alegria ainda lhe estava reservada. Foi eleito membro da Academia de Ciências Francesa e recebeu uma medalha da *Royal Society* de Londres. Finalmente era reconhecido no meio científico! O médico que acabou por dedicar a vida à ciência morreu com 63 anos de idade, vítima de tuberculose.



Contou-se a história de Mayer, um médico alemão que, partindo de uma perplexidade ao cuidar dos seus pacientes, no ano de 1840, mergulhou num estudo que o levou a entender o “princípio da conservação da força”. Sem que um tivesse conhecimento do outro, em Inglaterra, havia alguém que na mesma altura de Mayer se dedicava ao mesmo estudo. Enveredou, no entanto, por uma via oposta à do médico Mayer e perseguiu interesses totalmente diferentes.

#### 4.6. Um inglês chamado Joule



Figura 11 - James Joule<sup>3</sup>  
(1818-1889)

O inglês de que se fala chamava-se James Prescott Joule e, se Mayer não tinha o reconhecimento que desejava no meio científico, em parte, devido à ausência de trabalho experimental, o trabalho de Joule era assente, essencialmente, neste princípio. Citando Cardwell (1971, p.232), “Conhecimento profundo, raciocínio fechado, grande dom experimental e esmero metuculoso estão todos combinados no seu trabalho.”

É curioso comparar os estudos efectuados por Mayer e Joule, atendendo aos diferentes interesses de cada um deles. O primeiro era médico e interessava-se pelo estudo da fisiologia, a experimentação não o motivava e só por mero acaso é que caiu no domínio da Física. O segundo provinha de uma próspera família inglesa que vendia cervejas e tinha

---

<sup>3</sup> Imagem retirada de <http://www.sciences.univ-nantes.fr>

sido pupilo de um conhecido químico, Dalton. A tecnologia que via avançar no seu país fascinava-o e era na experimentação que tentava encontrar respostas. Estes dois grandes homens desenvolveram trabalhos independentes um do outro e que estavam de acordo com os seus interesses, profissões e contextos. O curioso é que apesar da diferente natureza dos seus estudos, ambos chegaram conclusões que contribuíram para o enunciado da primeira lei da termodinâmica.

Estes dois cientistas nasceram numa época em que o avanço tecnológico não cessava. Mayer, na Alemanha e Joule no país onde a revolução industrial havia tido um papel preponderante. Relembre-se que a grande inovação surgida com a revolução industrial foi a máquina a vapor. Mas se de início esta realizava o sonho dos homens, acelerando a produção nas fábricas ou fazendo avançar os meios de transportes, depressa se exploraram novas formas de fazer avançar ainda mais a tecnologia e, como consequência, a sociedade.

O homem rapidamente se apercebeu de algumas limitações da máquina a vapor. Citando Asimov (1987, p.216) a respeito desta máquina, “não pode fornecer energia eficazmente em pequenas quantidades ou intermitentemente quando se carrega num botão; uma máquina a vapor «pequena», em que a caldeira é ligada ou desligada quando se deseja, é absurda.” A máquina a vapor tinha o inconveniente de ser útil, apenas quando se pretendia produzir em larga escala. Posto isto e como uma invenção leva à outra, o homem depressa meditou sobre uma nova máquina que conseguisse funcionar em pequena escala ou em larga escala, carregando no «mágico» botão que era inconcebível na máquina a vapor. Para esta invenção, recorreu-se a um fenómeno que desde há muito era objecto de encanto pelo seu mistério e que ao longo dos tempos foi revelando a sua utilidade, de tal modo que hoje em dia não se imagina o mundo sem o mesmo. Trata-se da electricidade e um pouco da sua história se seguirá, de modo a que se compreenda todo o contexto que levou Joule a ponderar sobre certos assuntos.

#### 4.7. Da resina com alma até ao motor eléctrico

Segundo Asimov (1987, p.216), terá sido há muitos anos atrás, por volta de 600 a.C. que um filósofo grego de nome Tales, percebeu que um fenómeno bastante curioso ocorria na natureza. Ao tocar numa resina com o nome grego *elektron* e que traduzindo se chama âmbar, o filósofo percebeu que a mesma tinha a capacidade de atrair alguns objectos, depois de ser esfregada com pele. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.111), esta resina proveniente de uma espécie de pinheiro desaparecido há muitos séculos, era bastante cobiçada na Grécia. A mesma era utilizada para fazer contas de colares ou era queimada, de forma a aproveitar o agradável aroma que assim se libertava. Ao reparar nas propriedades atractivas do âmbar, Tales pensou que talvez a essência possuísse alma própria. Vários pensadores sugeriram teorias que pretendiam explicar esta característica, mas apenas em 1600 foi proposta uma explicação que permitiu que as propriedades milagrosas do âmbar proporcionassem um novo avanço na tecnologia.

Segundo Duarte-Ramos (1986, p.112), o médico inglês William Gilbert, com quem a rainha Isabel de Inglaterra se consultava, estudou a propriedade do âmbar descoberta por Tales. Explorando materiais diferentes percebeu que a encantadora propriedade da atracção não era exclusiva da misteriosa resina. Ao fenómeno em causa ele chamou electricidade que provinha do termo grego *elektron*. O médico efectuou experiências com uma pedra saída de um mineral que também demonstrava possuir as tais propriedades «mágicas». Esta pedra veio a ter o nome de íman, cujo significado é, segundo Fiolhais (1992, p.115), «pedra que ama». Os seus estudos com um íman e uma agulha magnética, confirmaram que o primeiro atraía o segundo, fenómeno que veio a ter o nome de magnetismo. Este assunto passou a ser alvo de grande interesse pela parte de vários estudiosos e haveria de estar na base de uma nova máquina com vantagens sobre a máquina a vapor.

O fenómeno começou a revelar a sua utilidade quando aplicações práticas baseadas no mesmo começaram a surgir. Realce-se que aquando da descoberta da misteriosa atracção que o âmbar e o íman produziam, eram estudados apenas casos em que as cargas eléctricas permaneciam num objecto, ao que actualmente se chama de electricidade estática.

A aplicação das propriedades aparentemente mágicas do âmbar ampliou-se quando o professor de anatomia italiano, Luigi Galvani (1737-1798), verificou por acaso que os

músculos das pernas de algumas rãs dissecadas com que trabalhava, se contraíam ao ser tocadas em simultâneo por dois metais diferentes. Segundo Asimov (1987, p.220), o acontecimento terá tido lugar no ano de 1791 e ao mesmo, Galvani chamou electricidade animal por julgar que os músculos entravam em movimento porque possuíam uma propriedade que o permitia. Felizmente, houve quem se interessasse pelos estudos de Galvani e lhes desse continuidade, permitindo que novas questões viessem ao de cima. Então, as rãs de Galvani passaram a ser objecto de interesse de estudiosos, convencidos de que a origem do fenómeno poderia relacionar-se com os dois metais e não com o músculo da perna da rã. À custa do estudo dos pobres batráquios dissecados, uma invenção poderosa que subsiste até aos dias de hoje com grande utilização sugeriu; trata-se da invenção da pilha.

Segundo Duarte-Ramos (1986, p.116), terá sido no ano de 1800 que Volta (1745-1827) deu a conhecer ao mundo a sua grande invenção. Sendo um dos que desconfiava que o fenómeno do movimento da perna da rã se devia aos metais, o físico efectuou experiências, em que juntava diferentes metais, mas no meio deles, em vez de colocar o músculo de um animal, colocava água salgada. No decurso das suas experiências, Volta acabou por construir um dispositivo constituído por conjuntos formados por um disco de cobre e outro de zinco, intercalados com um tecido embebido em água salgada. Apesar de Volta não saber o que estava por detrás do fenómeno, sabia que desta forma conseguia criar electricidade continuamente. Mais tarde, entendeu-se que a electricidade era gerada neste dispositivo à custa de um fluxo de electrões que passava de um elemento da pilha (conjunto de metais) para outro, através da água salgada. Note-se que o electrão só foi descoberto no século XIX, aproximadamente 100 anos após as experiências de Volta.

A evolução neste campo da Física continuava e segundo Duarte-Ramos (1986, p.116), passados vinte anos de Volta ter dado a conhecer a sua pilha, o cientista inglês Michael Faraday, em 1820, anunciava que era possível transformar o magnetismo em electricidade. Faraday tinha entendido que era possível produzir electricidade a partir do movimento de rotação de um íman, em frente de um enrolamento de fio metálico. A partir daqui, o mundo teve uma evolução, ao poder desfrutar da electricidade para fins práticos como a iluminação, a comunicação e até os meios de transporte.

Parece que o misterioso âmbar tinha desvendado algo muito poderoso e talvez se pudesse tirar ainda mais partido de tal poder e construir novos engenhos que conseguissem

superar as falhas existentes na máquina a vapor. E assim foi, o motor eléctrico surgiu. A electricidade gerada pelo íman conseguia movimentar uma roda. Esta podia servir para impulsionar as máquinas que laboravam nas fábricas e que inicialmente eram postas em funcionamento à custa do esforço animal e mais tarde pela máquina a vapor. Uma grande vantagem do uso dos motores eléctricos prendia-se com o facto das máquinas passarem a poder ser ligadas e desligadas quando se entendesse. Por outro lado, as máquinas a vapor exigiam o uso de grandes quantidades de combustíveis fósseis, fonte de energia não renovável, que já no século XIX constituía uma preocupação para o Homem. Por esta altura, a eficiência de ambas as máquinas não tinha sido comparada, até porque a euforia era grande demais para colocar em causa as vantagens do novo motor. Infelizmente, como se descreverá adiante, o jovem James Joule, haveria de descobrir algo preocupante a este respeito...

Os recentes avanços da ciência e da tecnologia, provocavam uma onda de entusiasmo e encantamento generalizada e que se fazia sentir principalmente entre a comunidade científica. Segundo Smith (1998), Benjamim Silliman, um professor de Química Norte Americano, terá publicado num jornal, no ano de 1837 que,

Nada desde a descoberta da gravitação, e da estrutura dos sistemas celestes, é tão maravilhoso como o poder desenvolvido pelo galvanismo quer o contemplemos nas convulsões musculares dos animais, nas decomposições químicas, no brilho solar da luz galvânica, no intenso calor dissipado, e mais do que tudo, na energia magnética. (p. 53).

#### **4.8. Joule rende-se à “euforia eléctrica”**

O jovem Joule, nascido na cidade de Manchester no ano de 1818, acompanhava com interesse o florescimento deste campo da Física e acabou por ser um dos grandes entusiastas do aproveitamento dos fenómenos recém conhecidos. Citando Cardwell (1994, p.309), “Joule foi um dos apanhados na «euforia eléctrica» – o entusiasmo pelo poder eléctrico...” O entusiasmo de Joule pela «euforia eléctrica», deixava transparecer o seu interesse pela ciência que, em parte poderá ter sido aguçado pelo seu tutor, John Dalton (1766-1844), o químico que ficou conhecido como o pai da teoria atómica. O modo como Joule desenvolvia os seus trabalhos, tão referenciado pelos historiadores da ciência, também poderá ter sido reflexo de uma educação guiada por Dalton. Citando Baeyer (1998,

p.33), “Tal como São Pedro é retratado nas pinturas medievais e esculturas segurando uma chave (...) Joule não pode ser imaginado sem um termómetro.” A sua forma de pesquisa baseada na experimentação nunca passou despercebida e se tal era influência de Dalton, uma paixão que nasceu com Joule ou influência da gerência da cervejaria do seu pai, só o próprio poderia responder.

Joule era filho de um próspero cervejeiro e o ter tomado conta do negócio, enquanto jovem, poderá ter sido determinante na sua aproximação com os números. O cliente que havia bebido uma ou mais cervejas no seu estabelecimento não poderia abandonar o local sem que entregasse ao jovem aspirante a cientista que se encontrava atrás do balcão, o equivalente em dinheiro. Citando Smith (1998, p.56), acerca do gosto de Joule pela experimentação e pela quantificação, “Tal perícia prática (...) seria tão importante para o futuro dono de uma cervejaria como para o aspirante a homem da ciência.”

O motor eléctrico constituiu o primeiro foco de interesse de Joule e nada melhor para ficar a conhecer todos os detalhes do mesmo do que construir o seu próprio motor. Assim foi, Joule construiu um motor electromagnético que elevava até determinada altura um peso. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.118), ele pretendia medir a quantidade de electricidade fornecida ao motor para que este conseguisse realizar a função de elevar o peso até uma altura conhecida. Não tendo qualquer meio de calcular a quantidade de electricidade fornecida, optou por calcular o calor libertado nos fios eléctricos e que deveria ser fruto da corrente eléctrica. Para tal, mergulhou o seu enrolamento de fio condutor, ou bobina, num recipiente com água e mediu a elevação da temperatura desta. Ao fazê-lo, descobriu que o calor libertado era proporcional à resistência eléctrica do fio e ao quadrado da intensidade da corrente. Esta conclusão ficou expressa numa expressão à qual Joule empresta o seu nome até aos dias de hoje. Segundo Baeyer (1998, p.29), o jovem cientista terá enunciado a lei que governa a relação existente entre a passagem de corrente e o calor libertado no ano de 1840, quando tinha apenas 22 anos de idade. E se hoje esta lei é conhecida por todos os que se interessam pelo estudo da electricidade, segundo Duarte-Ramos (1986, p.119), no mesmo ano em que enunciou a lei, Joule tê-la-á publicado num artigo, ao qual ninguém deu muita importância.

Prosseguindo as suas investigações, com o seu ingrediente básico sempre presente; a experimentação, James Joule engendrou uma forma de comparar a quantidade de trabalho obtida com uma máquina a vapor e com um motor eléctrico, partindo da mesma quantidade

de substância oxidada. Na base do seu raciocínio estava a convicção de que o motor eléctrico era accionado à custa da oxidação do zinco da bateria. Assim, o princípio de funcionamento do motor eléctrico seria o mesmo da máquina a vapor. No primeiro, o zinco era oxidado, enquanto que na segunda havia queima de combustível. Com tal semelhança no princípio de funcionamento, Joule comparou o trabalho obtido com um motor eléctrico e com uma máquina a vapor, utilizando a mesma quantidade de zinco e de carvão. O espanto e a desilusão foram os sentimentos que se seguiram à tomada de conhecimento dos resultados da experiência. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.119), utilizando a mesma quantidade de zinco e de carvão, o trabalho obtido por um motor eléctrico traduzia-se numa parcela de apenas 1/5 do trabalho obtido com uma máquina a vapor. A antiga máquina a vapor mostrava-se mais eficiente do que o moderno e prático motor eléctrico! Citando Laidler (2002, p.19), em relação a esta descoberta desastrosa de Joule, “Para ele a euforia eléctrica tinha terminado.”

Apesar da desilusão, Joule não dava por terminado o seu trabalho experimental e a investigação em torno do calor libertado pela passagem de corrente eléctrica continuou. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.119), desta vez, ao medir a quantidade de calor libertado, percebeu que quando se dissolvia o zinco da bateria, mesmo sem produção de corrente eléctrica, havia uma quantidade de calor que era libertado. Esta quantidade correspondia à soma do calor libertado nos fios eléctricos com o calor produzido na bateria, quando havia passagem de corrente eléctrica. Uma vez que parte do calor libertado pelo zinco era transportada para os fios eléctricos, quando existia corrente eléctrica, Joule pensou que seria esta a fazer o transporte do calor para os fios eléctricos.

O gosto de Joule pela experimentação não permitia que tomasse como certa uma conclusão retirada a partir de um aparato experimental e assim, arquitectou uma nova experiência. Como forma de reforçar a sua hipótese de que a corrente eléctrica transportava o calor desde a bateria até aos fios eléctricos, engendrou uma nova artimanha que o poderia ajudar a retirar conclusões. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.119), Joule construiu um motor electromagnético, baseado nos estudos de Faraday, de que a corrente eléctrica era produzida a partir do movimento de um íman no meio de uma bobina. Ao se aperceber de que, desta forma a libertação de calor era igual à existente com os aparatos experimentais anteriores, o jovem cientista entendeu que se o calor se devesse ao transporte da corrente eléctrica desde a fonte até aos fios eléctricos, não deveria existir libertação de calor na

bobina, ao contrário do que se verificava com o seu motor electromagnético. Após alguma meditação sobre os resultados das suas medições, Joule começava a acreditar que o calor era criado pela corrente eléctrica e não por ela transportado.

Segundo Laidler (2002, pp.19,20), foi no ano de 1843 que Joule, baseado em todos os resultados que já havia obtido e em busca de mais respostas, imaginou uma experiência que o faria ter algo em comum com o médico Mayer. Instigado pela sua própria curiosidade científica e após tão surpreendentes descobertas, decidiu medir a quantidade de calor que era produzida, a partir de uma quantidade de trabalho mecânico. Para tal, a sua atenção voltou-se para os geradores eléctricos que, ao contrário dos motores eléctricos, convertem o trabalho mecânico em energia eléctrica. Uma vez que o curioso cervejeiro já tinha percebido que a corrente eléctrica produzia calor, ele pretendia determinar a quantidade de calor que era gerada a partir de uma quantidade que ele também mediria de trabalho mecânico, utilizando como intermediário a corrente eléctrica. Habitado a trocar uma cerveja por uma quantidade em dinheiro, Joule queria agora saber quanto é que tinha que “pagar” para obter uma unidade de calor. Pretendia determinar, tal como Mayer, o equivalente mecânico do calor e para tal, mergulhou, numa quantidade conhecida de água, a parte giratória do seu gerador eléctrico, parte esta a que mais tarde se deu o nome de dínamo. Para accionar o gerador era necessário algo que provocasse o movimento de um eixo e Joule utilizou um peso que caía de uma certa altura para desempenhar esta função. Era fácil medir o trabalho mecânico que gerava a corrente eléctrica, bastava medir a altura da queda do peso. A água aquecia e ao medir este aumento de temperatura da água, Joule determinava a quantidade de calor que havia sido criado, a partir da quantidade de trabalho mecânico que também já tinha medido. Citando Laidler (2002, p.20), “Desta forma ele estabelecia a equivalência entre o calor produzido como resultado da rotação da armadura e o trabalho mecânico requerido para a rotação.”

O trabalho de Joule perseguia o mesmo trilho do de Mayer, embora nenhum deles tivesse conhecimento do outro. Ambos tinham calculado o equivalente mecânico do calor e segundo Baeyer (1998), a este propósito Joule terá escrito que,

Não devo perder tempo repetindo e prolongando estas experiências, ficando satisfeito porque os grandes agentes da natureza são, por vontade do criador, *indestrutíveis*; e que sempre que uma força mecânica é despendida, um equivalente de calor exacto é *sempre* obtido. (p. 30).



À semelhança de Mayer, também Joule recorria a argumentos relacionados com as suas convicções religiosas para explicar algo que começava a entender, mas que não conseguia sustentar com a ciência. Quanto aos agentes da natureza, nos dias de hoje, Joule optaria por utilizar o termo *energia*.

Transportado pelo encantamento da “euforia eléctrica”, Joule tinha descoberto que o trabalho mecânico podia originar calor, tendo como intermediário a corrente eléctrica. Foi ainda mais longe, ao medir o equivalente mecânico do calor e, convicto de que este era um valor fixo, optou por não realizar mais experiências com geradores. Uma nova ideia assaltou os pensamentos do investigador inglês e uma nova experiência surgiu através da sua imaginação.

#### **4.9. Na senda de uma experiência mais simples**

Desta vez, Joule acreditava que, sendo o calor gerado pelo trabalho mecânico, tendo como intermediário a corrente eléctrica, então também seria gerado através da transformação directa do trabalho, sem ser necessário recorrer a um agente intermediário. Para entender se o trabalho era directamente convertível em calor, necessitava de engendrar um novo aparato experimental, sem a presença da corrente eléctrica. Tal aparato contou com antigas ideias de um conde que se interessara, tal como Joule, pelo estudo do calor. A ideia em causa é a de que o calor é movimento e o movimento é calor, sendo que bastava produzir movimento para se gerar calor. Foi com base nesta teoria que Joule engendrou um aparato experimental, em que provocava a agitação de uma quantidade de água contida num vaso e esperava que esta elevasse a sua temperatura. Segundo Baeyer (1998, p.31), para a agitação da água, usou um peso preso a um fio que descia até uma distância conhecida. O fio estava enrolado em torno do eixo de uma pá giratória e por sua vez, esta pá estava imersa no vaso com água. A descida do peso preso ao fio, provocava o movimento da pá na água e o conseqüente aumento de temperatura da mesma. Para determinar a quantidade de trabalho realizado, o engenhoso comerciante de cervejas, recorria à medição da altura do peso a partir da qual este era deixado cair. Quanto à quantidade de calor gerado, Joule media o aumento de temperatura sofrido pela água após a agitação. Desta forma, determinava, novamente, o equivalente mecânico do calor e poderia

comparar este valor com aquele que tinha obtido através da outra experiência. Segundo Baeyer (1998, p.33), os resultados obtidos desta forma estavam de acordo com os obtidos indirectamente através da passagem da corrente eléctrica. Tal concordância entre resultados, indicava a Joule que não se tinha enganado ao supor que o trabalho se podia converter directamente em calor.

Segundo Laidler (2002, p.20), Joule conseguiu fazer uma apresentação de alguns dos seus resultados, no ano de 1847, em Manchester, na qual afirmou que, “as hipóteses do calor ser uma substância devem cair sobre o chão (...) acreditando que o poder de destruir pertence ao Criador unicamente (...) eu afirmo (...) que qualquer teoria que demande a destruição da força é necessariamente falsa.” Com este argumento, mais uma vez baseado em crenças religiosas, Joule afirmava duas grandes verdades. Nem o calor é uma substância e nem a força (energia) pode ser destruída.

Com a sua última conclusão, Joule partilhava ideias com um médico alemão de nome Mayer. Ambos tinham entendido que o trabalho se transformava em calor e que a mesma quantidade de trabalho originava sempre a mesma quantidade de calor.

#### **4.10. Disputa entre Mayer e Joule**

Segundo Smith (1998, p.73), em 1848, Mayer tomou conhecimento dos trabalhos de Joule acerca do equivalente mecânico do calor. O médico alemão não terá gostado de saber que um outro estudioso de nacionalidade inglesa, ao se ter debruçado sobre o estudo do calor tinha chegado a conclusões semelhantes às dele e que agora poderia recolher os louros sozinho. Com a persistência que lhe era característica para conseguir impor o seu nome na comunidade científica, o médico desde logo tomou medidas no sentido de reclamar para si os direitos de tal contribuição para a Física. Assim sendo, apressou-se a escrever um carta à academia das ciências francesa, reclamando a prioridade de tais conclusões acerca do calor e do trabalho. Depois de publicada a reivindicação de Mayer, Joule tomou conhecimento de tal e não pôde deixar de discordar das pretensões do médico, utilizando como principal argumento o facto da sua teoria ter sido comprovada através da experimentação, ao contrário da de Mayer.

Joule contava com a amizade de um jovem físico de nome William Thomson que ao ter assistido à sua conferência em Oxford, no ano de 1847, tinha ficado muito interessado pelos seus trabalhos. Segundo Smith (1998, p.73), em sua própria defesa, Joule terá dito num dos dias do mês de Março de 1851 a Thomson que: “Devo ficar inteiramente satisfeito em deixar o senhor Mayer com o gozo do crédito de ter predito a lei da equivalência. Mas seria absurdo dizer que ele a estabeleceu.” A partir daqui, uma disputa estava na berra no meio científico e segundo Laidler (2002, p.25), os cientistas alemães apoiavam Mayer, enquanto que para os ingleses era Joule que se devia regozijar por ter dado tal contributo à Física. O que poderá ser pedagogicamente interessante na disputa são os dois processos de produção de trabalho e de calor. Mayer, baseado no funcionamento do organismo animal, comparável a uma máquina a vapor. Joule, transportado pela euforia eléctrica e efectuando diversos ensaios com motores e geradores eléctricos.

Tal disputa é a evidência de que a lei da conservação da energia não surgiu do raciocínio de um único homem, mas sim de vários que, apesar de diferentes pesquisas em diferentes campos tiraram conclusões que, em conjunto, levaram ao estabelecimento da mesma. Ao contrário de Carnot que conseguiu atingir algo a que mais ninguém tinha dado importância, Joule e Mayer sem qualquer troca de ideias, atingiram a mesma meta. Ambos perceberam que o trabalho se podia transformar em calor e que o calor se podia transformar em trabalho. A partir desta conclusão, uma nova surgiu e que não estava de acordo com a teoria de Carnot; se o calor se transformava em trabalho, não poderia ser uma substância material, seria sim uma «estranha» força da natureza.

#### **4.11. A lei da “conservação da força” é enunciada por Helmholtz**

Um outro médico e físico alemão de nome Hermann Von Helmholtz (1821-1894), após a leitura dos trabalhos de Joule, escreveu um artigo onde explorou o mesmo tema e expô-lo ao público no ano de 1847. Segundo Holton et al. (1980), o mesmo tinha por título “Sobre a conservação da Força” e nele constava a seguinte expressão: “... é impossível criar uma força motriz permanente a partir do nada.” Esta expressão terá sido desenvolvida pelo actual médico alemão numa palestra, anos mais tarde, da seguinte forma:

Chegamos à conclusão de que a Natureza, como um todo, possui uma reserva de força que não pode de qualquer modo aumentar ou diminuir e que, portanto, a quantidade de força na Natureza é precisamente tão eterna e inalterável como a quantidade de matéria. Expressa nesta forma, mencionei a lei geral: “O Princípio da Conservação da Força”. (p. 64).

Mayer, Joule e Helmholtz são apenas três dos muitos nomes a quem se pode prestar o tributo de terem contribuído para a construção da primeira lei da termodinâmica. Citando Kuhn (1977, p. 104), em relação ao estabelecimento desta lei, “... A história da ciência não oferece nenhum exemplo mais marcante do fenómeno conhecido como descoberta simultânea.” Com a expressão *descoberta simultânea*, Kuhn não pretende afirmar que os mesmos estudos foram partilhados por diferentes cientistas. Citando o autor (1977)

... não houve dois dos nossos homens que tivessem dito a mesma coisa. Quase até ao fim do período da descoberta, poucos dos seus ensaios tinham mais do que semelhanças fragmentárias, surgindo em frases e parágrafos isolados. (p. 105).

A pertinência da expressão *descoberta simultânea*, relaciona-se, antes, com a confluência de independentes estudos conceptuais e experimentais que levou à construção da primeira lei da termodinâmica. Por um lado, vários cientistas estavam certos da convertibilidade do trabalho e do calor. Deve salientar-se que os cientistas que afirmavam esta convertibilidade apenas focavam um caso especial da primeira lei da termodinâmica. Citando Kuhn (1977, pp.102, 103), “A convertibilidade do calor e do trabalho é, naturalmente, apenas um caso especial da conservação da energia...” Mais tarde, um outro grupo, no qual se inclui Mayer, Joule e Helmholtz, afirmou acreditar na existência de uma força que se podia manifestar sob diferentes formas, mas que não poderia ser destruída. Esta força viria, mais tarde, a denominar-se energia e com o contributo independente destes homens a lei da conservação da energia começava a delinear-se.

Kuhn (1977, p.104) nomeia doze homens que “num curto período de tempo, apreenderam por si partes essenciais do conceito de energia e respectiva conservação.” A simultaneidade de ideias que em conjunto fizeram nascer uma lei, leva Kuhn (1977, pp.104, 105) a pensar que; “A multiplicidade presente sugere suficientemente que, nas duas décadas anteriores a 1850, o clima do pensamento científico europeu incluía elementos capazes de conduzir cientistas receptivos a uma significativa nova visão da natureza.” A sociedade da época, como se tem retratado até aqui, era um factor de grande influência no desenvolvimento da ciência. Provavelmente, nesta sociedade esconde-se a resposta à grande questão de Kuhn (1977, p.107): “Por que razão, nos anos 1830-50, tantos

experimentos e conceitos exigidos para uma afirmação completa da conservação da energia se encontraram tão perto da superfície da consciência científica?” A evolução dos motores, como forma de solucionar as necessidades da sociedade, parece ter sido um dos factores a contribuir para o surgimento do conjunto de estudos que levaram a uma nova visão da natureza. Kuhn (1977, 109), aponta três factores que poderão dar resposta à sua própria questão. Nomeadamente, a “disponibilidade dos processos de conversão”, a “preocupação com motores” e a “filosofia da natureza”. Os dois primeiros relacionam-se com a evolução dos motores a vapor e eléctricos que estavam em plena expansão. Citando Kuhn (1977, p. 109), “A disponibilidade dos processos de conversão resultou principalmente da corrente de descobertas que dimanaram da invenção de Volta da bateria em 1800.” A forma como Joule, levado pela «euforia eléctrica», conduziu os seus estudos parece retratar a influência que os mesmos tiveram na exploração da conversão da energia. O terceiro factor apontado por Kuhn relaciona-se com as crenças metafísicas tão patentes nos trabalhos de vários cientistas, como Mayer. Citando Kuhn (1977, p.131), “... nos casos de Colding, Helmholtz, Liebig, Mayer, Mohr e Séguin, a noção de uma força metafísica imperecível oculta parece ser prioritária em relação à investigação...” Relembre-se que Mayer defendia fervorosamente a existência de uma força (energia) pela sua natureza metafísica, não material. Segundo Kuhn, este tipo de argumentos metafísicos faziam parte de um movimento filosófico, *Naturphilosophie*. Citando Kuhn (1977, p.134), “Declarações como as dos leibnizianos e as dos pioneiros do século XIX da conservação da energia podem, contudo, encontrar-se muitas vezes na literatura de um segundo movimento filosófico, *Naturphilosophie*.

Kuhn (1977, pp. 101-103) conta os nomes de Mayer, Joule, Colding, Helmholtz, Sadi Carnot, Marc Séguin, Karl Holtzmann, G. A. Hirn, C. F. Mohr, William Grove, Faraday e Liebig como responsáveis pela apreensão do conceito de energia e sua conservação. Uma vez que doze nomes são apresentados e que no «Romance da Entropia» apenas se explorou o trabalho de dois deles, resta apresentar os motivos que levaram a tal. Os estudos de Mayer e Joule tiveram predominância sobre todos os outros por representarem dois exemplos marcantes de duas realidades bem distintas, numa época comum. Ambos viveram na mesma altura, mas em sociedades diferentes, um em Inglaterra e o outro na Alemanha. Nenhum deles tinha formação como físico. Mayer era médico e os seus estudos foram conduzidos através de argumentos do âmbito da fisiologia. As suas

fortes convicções religiosas levavam-no, também, a entrar no domínio da metafísica. Joule, por outro lado, estava ligado à indústria das cervejas e tinha tido aulas com Dalton, factores que poderão ter sido de influência na sua persistência na quantificação e na experimentação. Por fim, ambos se interessaram, embora de formas substancialmente diferentes, pelos motores, a vapor (no caso de Mayer, comparáveis ao organismo animal) e eléctricos, que permitem um melhor retrato da sociedade e do avanço tecnológico vivido na época. Além do mais, os diferentes interesses que estiveram na origem das suas investigações, suscitam fascinantes pensamentos que vão além dos científicos. Pois se a partir do funcionamento do organismo humano, da máquina a vapor e do motor eléctrico, se retiram conclusões comuns, é impossível não pensar que o homem é governado por princípios, leis e mecanismos semelhantes aos destas máquinas.

Em vez de se entregarem a disputas, Joule e Mayer poderiam ter unido esforços e quem sabe não surgissem outros interessantes estudos, teorizados por Mayer e ensaiados experimentalmente por Joule! Segundo Duarte-Ramos (1986, p.136), o físico irlandês, John Tyndall terá escrito acerca da rivalidade que se criou entre a Alemanha e a Inglaterra, em torno de Mayer e Joule que, “Há lugar no céu para ambas as sumidades, um pela concepção do princípio fundamental e outro pela sua comprovação essencial.” Nesta simples frase, Tyndall fazia justiça, realçando a forma de pesquisar de cada um deles; Mayer era um teórico, enquanto que para Joule, pesquisar era sinónimo de experimentação.

Segundo Smith (1998, p.191), Tyndall ainda terá descrito Mayer como “um génio negligenciado, cujos profundos pensamentos sobre as operações da natureza transcenderam e anteciparam as conclusões dos vulgares homens da ciência.”

Hoje em dia, o nome de Joule é mais conhecido do que o de Mayer e, desde cedo que o seu apelido é reconhecido por qualquer aluno que estude Física. A imortalidade do seu nome deve-se, por um lado, à lei que traduz as suas descobertas na relação entre a passagem da corrente eléctrica por um condutor e a resistência que este oferece. Por outro lado, ao facto de Joule constar do Sistema Internacional de Unidades aliado à energia. Não se pense, no entanto, que o seu percurso enquanto cientista foi fácil e que sempre teve a alegria de ver o seu trabalho reconhecido. À semelhança de Mayer, os seus estudos não foram bem aceites e os primeiros artigos que submeteu para uma possível publicação foram recusados. Talvez uma das causas do desinteresse da comunidade científica por Joule se prendesse com o facto deste aspirante a cientista não possuir formação universitária. No

ano de 1847, a sua sorte poderia mudar, ou pelo menos, viria a conhecer alguém que se tornaria no seu mais ilustre admirador.

Segundo Baeyer (1998, p.28), tudo aconteceu quando Joule dava a conhecer à comunidade científica inglesa os seus estudos acerca da relação entre o trabalho e o calor. Ele havia conseguido dar uma conferência acerca do assunto em Oxford, mas a audiência não mostrava qualquer sinal de admiração pelo seu trabalho, pelo menos a audiência em geral. Houve alguém que, partilhando com Joule o entusiasmo pelo estudo dos mistérios do calor, ficou fascinado com o que acabara de ouvir, apesar de colocar em causa alguns pontos desta teoria.

#### **4.12. Joule em lua de mel**

A pessoa que se encontrava no meio da assistência de Joule, animado de interesse e curiosidade sobre os seus estudos chamava-se William Thomson. Era irlandês de nacionalidade e a sua vida profissional não podia ser mais brilhante, já que, com apenas 22 anos de idade era responsável pela cátedra de Filosofia Natural na Universidade de *Glasgow*.

Ao ouvir Joule, este jovem professor, tomava-se de um interesse crescente, não podendo deixar de discordar com muitas das ideias avançadas pelo orador. Estas pareciam contradizer as de um célebre engenheiro militar de nome Sadi Carnot, pelas quais Thomson nutria uma profunda admiração. No entanto, haveria de chegar o dia em que compreenderia que afinal existia um paralelismo entre os estudos de Carnot e os de Joule. Entretanto, uma amizade forte uniria Thomson e Joule, para a qual um simples acaso em férias poderá ter contribuído.

Segundo Baeyer (1998, pp.28,29), este acaso teve lugar dois meses depois, em território francês, mais propriamente, perto do Monte Branco, pico mais alto dos Alpes que se situa junto à fronteira entre a França e a Suíça. Thomson encontrava-se no local porque estava a fazer uma viagem pela Europa, enquanto que Joule estava nada mais, nada menos do que em lua de mel com a sua recente mulher. Ao avistar Joule, Thomson poderá ter ficado um pouco surpreendido ao notar que havia escolhido o mesmo destino de férias que o conferencista que tinha escutado com tanto interesse há pouco tempo atrás. No entanto, a

maior surpresa terá surgido quando se apercebeu que Joule trazia um termómetro na mão e fazia medições. Pobre daquela noiva que em plena lua de mel tinha que aguardar que o marido fizesse todas as medições que julgava importantes para então prosseguir o passeio! Mas afinal o que pretendia Joule medir? Ele estava com um termómetro perto de uma queda de água e media a temperatura da água do cimo da queda e do fundo da queda. O objectivo era certificar-se de que a água estava a uma temperatura maior na parte inferior do que na parte superior, sustentando a veracidade dos seus estudos. Se a temperatura da água aumentava após a queda, estava provado que o seu movimento se transformava em calor. Considerando o movimento como trabalho, Joule ficaria certo que o trabalho se transformava em calor. Por outro lado, corroborava a convicção de que o calor não era uma substância material, mas que era algo que se gerava a partir do movimento. E assim, a teoria do calórico que tanto ajudou Carnot a deduzir resultados muito correctos, caía por terra de uma vez por todas e a justiça era feita ao conde de Rumford!

Segundo Baeyer (1998, p.29), apesar do encontro entre Joule e William Thomson ser real, a veracidade do resto da história não parece estar provada. Não obstante, o que a mesma pretende ilustrar poderá ser pedagogicamente interessante. Por um lado, dá a conhecer a necessidade de Joule em explorar as suas hipóteses através das medições. Por outro lado, o crescente interesse de William Thomson pelos estudos de Joule em torno do calor.



### 4.13. A história do professor que se tornou lorde

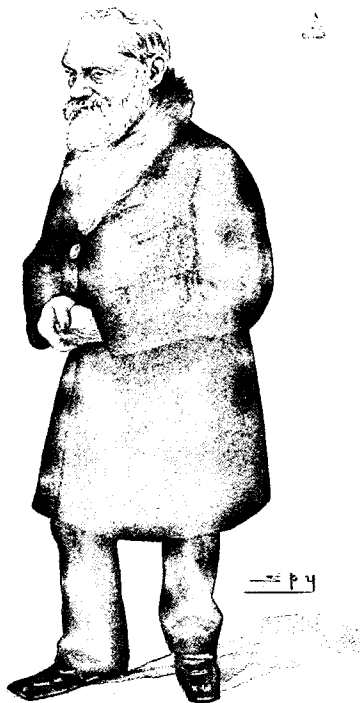


Figura 12 - William Thomson <sup>4</sup>  
(1824-1907)

Thomson não se tinha tornado mais um discípulo dos mistérios do calor só após a conferência de Joule. As discussões em torno deste tema, há muito que ocupavam o seu tempo e o do seu irmão James. Segundo Smith (1998, p.31), William Thomson provinha de uma próspera família escocesa, apesar de ter nascido na Irlanda. O seu pai tinha iniciado a sua vida a trabalhar numa quinta, mas, ao se formar na Universidade de *Glasgow*, tornou-se professor universitário. William era um de entre os seis filhos do casal Thomson e com o seu irmão James, mantinha uma relação especial. Ambos viam na ciência um foco de interesse e também eles queriam descobrir o véu que envolvia os mistérios que rodeavam o calor.

Segundo Laidler (2002, p.20), no ano de 1845 e com 21 anos de idade, William Thomson formava-se com distinção na Universidade de Cambridge.

Resta dizer acerca da história da sua vida que, como reconhecimento dos notáveis contributos que prestou à ciência, no ano de 1892, foi feito lorde. E se esta história já

<sup>4</sup> Imagem retirada do livro de Atkins (1994, p. 4)

contava com a presença de um conde, de agora em diante, o lorde Kelvin, nome pelo qual William Thomson ficou conhecido, desempenhará um papel muito importante no desenrolar da teia.

As longas conversas acerca do calor entre William e James Thomson talvez tenham sido o grande impulso para o desenvolvimento de todo o trabalho do lorde Kelvin nesta área. Trabalho este de tal forma importante que deixou o seu nome como um dos mais estritamente relacionados com a segunda lei da termodinâmica.

#### 4.14. As discussões dos irmãos Thomson

Mas afinal, que tipo de questões levantariam os dois irmãos há mais de um século atrás, acerca do calor?

As questões que motivavam os irmãos Thomson pareciam ser as mesmas que motivavam Carnot, Mayer, Joule e tantos outros. A prova é a pergunta que se segue e que segundo Smith (1998), James terá formulado ao seu irmão mais novo, William:

Gostaria que me dissesse quem é que provou que há uma quantidade definida de efeito mecânico extraído durante a passagem de calor de um corpo para outro. Estou a escrever um artigo (...) acerca (...) da possibilidade das máquinas a vapor funcionarem (teoricamente) sem combustível utilizando repetidamente o calor que é expelido na água quente proveniente do condensador, e deverei entrar no tema do artigo que me mencionaste. (p. 42).

Também James Thomson partilhava o sonho de Carnot de poder construir uma máquina de movimento perpétuo, uma máquina que produzisse trabalho eternamente à custa de uma mesma quantidade de calor. Era bom que ele a tivesse construído, pois ainda hoje o homem poderia desfrutar dela em inúmeras aplicações, como por exemplo, ao fazer-se transportar em carros que se movimentavam à custa do calor libertado nas rodas. Não era necessário abastecer o carro com combustível. O homem agradecia e o ambiente também! Esta indagação de James a William é importante, na medida em que resume os importantes estudos do lorde Kelvin e o seu grande contributo para a termodinâmica. A grande questão que o levou para tão perto do enunciado da segunda lei da termodinâmica foi precisamente a de saber se o calor se transformava em trabalho ou não. Quando encontrou a sua resposta, a segunda lei ficou enunciada!

Por outro lado, este excerto também demonstra o quanto os irmãos Thomson se interessavam pelos estudos de Carnot. Aliás, como se verá, foram os mistérios escondidos atrás dos estudos do engenheiro francês e de Joule que impulsionaram o lorde Kelvin a avançar na aventura da termodinâmica.

#### **4.15. A obra de Carnot traduzida por Clapeyron**

Em relação ao artigo citado por James e que diz ter sido mencionado pelo seu irmão, Smith (1998, p.42), refere que se tratava da tradução do físico francês Émile Clapeyron (1799-1864) da grande obra de Sadi Carnot, “Reflexões sobre a potência motriz do fogo”.

Segundo Laidler (2002, p.31), Émile Clapeyron era um parisiense que tinha tido o prazer de conhecer Sadi Carnot, enquanto estudantes na *École Polytechnique*. Era engenheiro, tal como Carnot, especializado na construção de pontes e de locomotivas. Tendo acesso à obra de Carnot, Clapeyron elaborou uma versão da mesma, adicionando-lhe alguns pormenores matemáticos e, segundo Smith (1998, p.44), tê-la-á publicado no jornal da *École Polytechnique*, no ano de 1834. Um dos pormenores com que Clapeyron tinha enriquecido o seu resumo era a análise gráfica do ciclo de Carnot. Esta representação mostrava a forma como a pressão e o volume do vapor expandido ou comprimido variavam em cada etapa do ciclo. A partir deste gráfico, Clapeyron fazia a análise da máquina a vapor, calculando a quantidade de trabalho produzido, a partir da «queda» de uma unidade de calor.

#### **4.16. William Thomson viaja para Paris**

As investigações dos dois irmãos Thomson sobre o trabalho de Carnot (via Clapeyron) prosseguiram de forma cada vez mais entusiasta, quando o irmão que viria a ser lorde viajou até França. Uma vez que a sua graduação em Cambridge lhe havia proporcionado uma formação meramente teórica, ele procurava ampliar os seus conhecimentos de Física Experimental, em Paris. Segundo Smith (1998, p.44), parte desta sua busca de conhecimento experimental estaria relacionada com a ambição que mantinha

em ocupar a cátedra de Filosofia Natural da Universidade de *Glasgow*. Durante a sua estada na cidade de Paris, trabalharia no laboratório de Física de Victor Regnault (1810-1878), onde segundo Smith (1998, p.44), eram realizadas variadas experiências e em larga escala que visavam a investigação das propriedades de gases e vapores. Segundo Cardwell (1971, p.239), trabalhar neste laboratório também familiarizou William Thomson com a necessidade de criar uma escala de temperatura absoluta, independente das propriedades de uma determinada substância. Thomson ficou de tal forma maravilhado que, anos mais tarde, instituiu o seu próprio laboratório em *Glasgow*.

Uma vez em França, William decidiu partir em busca de algo que faria não só o seu deleite como também do seu irmão James. Entusiasticamente, lorde Kelvin percorreu todas as livrarias em busca da grande obra de Sadi Carnot, mas infelizmente não a encontrou e segundo Smith (1998), mais tarde relatou que;

Fui a todas as livrarias de que me pude lembrar, perguntando pela *Puissance Motrice du Feu*, de Carnot. “Caino? Não conheço esse autor”... “Ah! Ca-rrr-not! Sim, eis aqui a sua obra”, ganhando um volume sobre uma qualquer questão social de Hippolyte Carnot (irmão de Sadi); mas a *Puissance Motrice du Feu*, era totalmente desconhecida. (p. 44).

#### **4.17. O regresso a casa e a busca do zero absoluto**

De regresso a casa, Thomson conseguiu o emprego que tanto desejava. Segundo Smith (1998, p.47), foi no ano de 1846 e com 22 anos de idade que William Thomson viu florescer a sua vida profissional ao ter ingressado como professor na Universidade de *Glasgow*.

Neste mesmo ano, fez-se membro da Sociedade Filosófica de *Glasgow*, à qual o seu irmão James já pertencia. Interessantes discussões se desenrolavam na Sociedade Filosófica e uma delas terá sido em torno da teoria de Carnot-Clapeyron, ou seja, em torno das conclusões de Carnot resumidas e matematizadas por Clapeyron.

Segundo Smith (1998, p.48), uma das questões que suscitavam a curiosidade de todos seria o misterioso desaparecimento de trabalho mecânico durante a transferência do calor (ou «queda») ou durante o movimento de fricção dos líquidos. As respostas chegariam em breve pelas palavras do conferencista James Joule.

Outro foco de interesse para os membros da Academia poderia ser, segundo Smith (1998, p.48), a análise de uma máquina que em vez de vapor utilizava ar. Esta máquina

havia sido concebida por um pastor protestante de nome Stirling (1790-1878) e pelo seu irmão. Mais tarde, o professor Thomson, cuja formação experimental havia adquirido em Paris, viria a revolucionar as aulas de Filosofia Natural da Universidade de *Glasgow*. As aulas, anteriormente teóricas, tornar-se-iam mais dinâmicas com a exploração de um modelo da máquina de Stirling.

Tinha sido, também, durante a formação experimental em Paris que Thomson se tinha inteirado da necessidade da construção de uma escala de temperaturas absoluta. A partir de algumas discussões, em parte, impulsionadas pela análise da máquina de Stirling, Thomson aproximava-se da invenção da escala absoluta. Através da análise desta máquina, ele levantava questões relacionadas com o calor latente. Segundo Smith (1998, p.48), punha em discussão o facto de, durante a formação de gelo não ser necessária a realização de trabalho, uma vez que não há «queda» de calor. Como resposta, o seu irmão James tê-lo-á informado que durante a formação de gelo a água expande e, portanto, há realização de trabalho. Esta resposta tê-los-á deixado ainda mais intrigados, pois se uma quantidade de água dentro de um vaso com um êmbolo congelasse, a expansão provocaria o movimento do êmbolo. Desta forma, haveria realização de trabalho mecânico, sem qualquer perda de calor, uma vez que a congelação ocorria sem variação de temperatura. Os irmãos Thomson estavam perante a idealização de uma máquina de movimento perpétuo que eles sabiam não existir. Sendo que a pressão a que a água estava sujeita ia aumentando, o irmão do futuro barão optou por relacionar a pressão com a temperatura. Segundo Smith (1998, p.48), após este estudo concluiu que, “... o ponto de congelação torna-se mais baixo à medida que a pressão a que a água está sujeita aumenta.” Assim já não era necessário pensar na máquina impossível de movimento perpétuo, uma vez que a temperatura da água se tornava cada vez menor, com o conseqüente dispêndio de calor.

A partir de experiências com gases relacionando a temperatura, a pressão e o volume, no ano de 1848, William Thomson anunciava que a temperatura mais baixa que qualquer substância pode atingir é a de 273,15 abaixo de zero na escala de Celsius. À medida que a temperatura diminui, um gás contrai-se e, a esta temperatura, o seu volume é zero. Citando Baeyer (1998, p.73), “Uma vez que um volume negativo é impossível, aquele mágico – 273.15 graus é a temperatura mais baixa atingível.” E assim, uma escala de temperaturas absoluta, à qual com justiça se deu o nome de escala de Kelvin, passava a

existir. Esta escala era independente das características de uma substância específica, e o valor -273.15 passava a ser o zero absoluto na escala Celsius.

De volta a 1847, eis que chega o grande momento. Thomson desloca-se a Oxford, com o intuito de ouvir uma conferência em que o orador é um estudioso do calor chamado James Joule.

#### **4.18. Thomson assiste à conferência de Joule**

Ao ouvir Joule, Thomson invadiu-se de um crescente interesse por aquele homem que falava acerca de teorias do calor que, no seu entender contradiziam a teoria de Carnot-Clapeyron. Esta última descrevia o calor como uma substância material que conservava o seu valor e que, ao passar de uma zona a temperatura mais elevada para outra a temperatura mais baixa, provocava o movimento de algo, ou seja, produzia trabalho mecânico. Thomson tomava-se de espanto ao ouvir Joule afirmar que o calor e o trabalho eram convertíveis um no outro. Citando Smith (1998):

Thomson estava confrontado com as reivindicações discordantes de Joule e Clapeyron. Dependeria o trabalho produzido por uma máquina a vapor da queda de uma quantidade de calor de uma alta para uma baixa temperatura...? Ou seriam o calor e o trabalho mutuamente convertíveis, não sendo requerida nenhuma queda de temperatura para a produção de trabalho mecânico? (p. 77).

Agora entende-se melhor o porquê do entusiasmo de Thomson ao assistir à conferência de Joule. As questões fervilhavam no seu espírito, pois embora fosse um profundo admirador da teoria de Carnot, não podia deixar de pensar que Joule conseguia explicar o porquê da perda de trabalho mecânico durante o movimento de fricção. A partir daqui, o rumo estava traçado, as suas questões teriam resposta e uma grande lei seria formulada. Citando Cardwell (1971, p.241), “A ciência na realidade é uma questão de perguntar as questões certas; tendo-as perguntado alguém, nalgum lado, encontrará a resposta mais cedo ou mais tarde.”

Segundo Smith (1998, p.79), William Thomson partilhou com o pai o entusiasmo que vivia ao se inteirar das ideias de Joule. Acerca deste, Thomson terá dito que estava “enganado em muitas ideias, mas parece ter descoberto alguns factos de extrema

importância, como por exemplo que o calor é desenvolvido por fricção dos fluidos em movimento.”

Apesar de considerar que Joule se enganava em muitos aspectos, Thomson admirava-o, fazendo-o sentir-se lisonjeado, uma vez que a sua teoria, até aqui, não tinha causado um grande impacto na comunidade científica. Segundo Smith (1998, p.79), Joule terá enviado a Thomson uma cópia dos seus artigos sobre o equivalente mecânico do calor com a seguinte nota adicional: “Tive muito gosto em conhecê-los finalmente, o sr. Strokes e a si, que se interessaram pela minha visão deste tema e espero ser capaz de cultivar este conhecimento que considero tão encantador.” Strokes era um amigo que Thomson havia conhecido em Cambridge, durante os seus tempos de estudante e esta nota é o testemunho de que um grande entendimento e admiração se começava a desenrolar entre Joule e Thomson.

#### **4.19. O deleite de Thomson: Leitura e análise do livro de Carnot**

Segundo Smith (1998, p.86), foi no ano de 1848 que o professor William Thomson teve acesso à grande obra com que há tanto sonhava ter entre mãos e cujas ruas de Paris havia percorrido em sua busca. Com quanto entusiasmo e ansiedade terá Thomson aberto a obra do admirável engenheiro Sadi Carnot, *Reflexões sobre a potência motriz do fogo!* Citando Stengers (2004, Abril),

Nascido alguns dias após a publicação das *Réflexions* em 1824, um jovem escocês desembarcou em Paris em 1845. Um artigo assinado por Clapeyron incitou William Thomson a querer obter o trabalho de Sadi Carnot. Esforço perdido: Mais nenhuma livraria possuía um único exemplar. Que importava, a narrativa de Clapeyron seria suficiente. Com esta redescoberta, surgiram duas décadas de controvérsias. Um primeiro conflito entre Thomson e James Joule resolveu-se naqueles anos. A disputa foi mais violenta entre os físicos britânicos e um professor alemão: Rudolf Clausius. No final da história, o último triunfou: foram enunciados dois princípios da termodinâmica definitivamente adoptados... (p.70).

No dia 2 de Janeiro de 1849, lorde Kelvin preparava-se para dar a conhecer ao público o trabalho que havia desenvolvido desde que tinha tido acesso ao tão desejado livro da autoria de Carnot. O lorde tinha realizado uma análise cuidada desta obra à qual tinha dado o extenso título de *Consideração da Teoria de Carnot da Potência Motriz do Calor; com resultados numéricos deduzidos a partir das experiências de Regnault sobre o vapor.*

Acerca deste título, Cardwell refere que a referência ao nome de Regnault é importante para mostrar como os seus dados experimentais foram determinantes para o estabelecimento da termodinâmica. Regnault, proveu os teóricos da termodinâmica com as bases firmes que estes necessitavam para o desenvolvimento desta área da Física, desempenhando o mesmo papel do que Tycho Brahé em relação aos teóricos do movimento planetário. Citando Cardwell (1971, p.240), “Sem os dados experimentais de Regnault a termodinâmica teria sido impossível, tal como as leis de Kepler não poderiam ter sido estabelecidas sem as efemérides extensivas e acuradas de Brahé.”

Neste trabalho de Thomson eram exploradas as questões que constituíam os alicerces da teoria de Sadi Carnot e a primeira questão colocada em análise dizia respeito à visão deste engenheiro sobre o calor. Relembre-se que para ele o calor era uma substância material e como tal, mantinha a sua quantidade inalterável. Não era susceptível de se converter noutra substância nem de ser gerada por um agente físico. A produção de trabalho era explicada através da «queda» do calor que provocava o movimento de algo. Na sua mais notável analogia, Carnot comparava o calórico à água, argumentado que tal como uma queda de água faz mover uma roda, a «queda» do calórico faz mover um êmbolo. Comparando esta ideia do calor com a de Joule, que considerava o calor uma forma de movimento convertível em trabalho, parecem existir alguns pontos discordantes. O ponto mais evidente e que mais chocava Thomson dizia respeito ao «desaparecimento» do calor, pois se havia uma transformação em trabalho, o seu valor não era conservado!

Segundo Smith, numa primeira análise da questão, Thomson terá considerado mais prudente guiar a sua investigação baseado no raciocínio de Carnot, ao colocar em consideração o seguinte: “não é conhecida nenhuma operação pela qual o calor possa ser absorvido por um corpo sem que se eleve a temperatura deste ou se transforme em latente, e produza alguma alteração na sua condição física.” Não existindo qualquer evidência de uma transformação de calor em trabalho, Thomson concluía que, desta forma, o princípio de Carnot “deve ser considerado ainda a base mais provável para uma investigação da potência motriz do calor.”

Continuando a análise da questão, Thomson seguiu os passos de Carnot, ao convidar os leitores a colocarem em consideração o funcionamento da máquina a vapor, sendo que este é um bom exemplo da obtenção de trabalho mecânico a partir do calor. Feita a análise, o professor de Filosofia Natural retirou a seguinte conclusão:



Percebemos que uma certa quantidade de calor é *deixada cair* do corpo quente, o metal da caldeira, para outro corpo a temperatura mais baixa, o metal do condensador; e que a partir desta transferência de calor resulta um certo desenvolvimento de efeito mecânico. (p.91)

Entendendo que o que se passava na máquina a vapor era extensível a todas as situações em que o trabalho era gerado a partir do calor, Thomson fez o desfecho da análise da questão da seguinte forma: “O agente térmico a partir do qual o efeito mecânico pode ser obtido, é a transferência de calor de um corpo para outro a temperatura mais baixa.” (1998, p.91). Apesar da simpatia que nutria por Joule, o lorde da história seguia a convicção de Carnot de que o calor apenas era transferido e não transformado.

Na consideração à teoria de Carnot, Thomson não poderia ter deixado de analisar uma outra questão que constituía uma das principais preocupações que o engenheiro francês discutia no seu livro; “Será a potência motriz do calor uma quantidade fixa, ou variará com o agente que é utilizado?” Relembre-se que como resposta a tal questão, Carnot havia concluído que o agente utilizado não afectava a eficiência da máquina. O máximo valor (ideal) de trabalho mecânico que uma máquina conseguiria obter não seria alterado, desde que se mantivesse constante a quantidade de calórico e a diferença de temperatura dos dois corpos por entre os quais o calórico fluía. Segundo Smith (1998), na análise desta questão, Thomson introduziu, pela primeira vez, o termo *termodinâmica* ao se referir a máquinas ideais que seriam termo-dinâmicas perfeitas. Uma máquina termodinâmica seria qualquer uma que transformasse o calor (termo) em trabalho (dinâmica). A única forma de Thomson abordar o problema seria a de construir uma máquina termo-dinâmica perfeita, que segundo ele, era “uma máquina através da qual a maior quantidade possível de efeito mecânico pode ser obtida a partir de um dado agente térmico.” O lorde ambicionava construir uma máquina que conseguisse transformar toda a quantidade de calor em trabalho, o que representa uma máquina com um rendimento de 100%.

Ciente de que a máquina termo-dinâmica perfeita constituía uma mera utopia e que qualquer máquina real é menos do que perfeita, William Thomson confrontava-se com um problema que, se de início poderá ter sido causa de preocupação no seu semblante, veio a revelar-se muito importante no desenvolvimento da termodinâmica. A causa do conflito interior do professor Thomson foi relatada pelo próprio da seguinte forma:

Quando o “agente térmico” é assim gasto na condução do calor através de um sólido, o que é que passa a ser o efeito mecânico que pode ter sido produzido? Nada pode ser perdido nas operações da natureza- nenhuma energia pode ser destruída. Que efeito é então produzido em vez do efeito mecânico que é perdido? Uma teoria perfeita do calor exige imperativamente uma resposta a esta questão; todavia nenhuma resposta pode ser dada no presente estado da ciência. Há alguns anos atrás, uma declaração semelhante deve ter sido feita referente ao efeito mecânico perdido num fluido posto em movimento (...) mas neste caso, o alicerce de uma solução da dificuldade foi actualmente encontrada, na descoberta de Mr. Joule da geração de calor (...) Estimulado por este exemplo, podemos esperar que a tão complicada questão na teoria do calor, pela qual estamos presentemente presos, será rapidamente, esclarecida. (p.93).

Note-se que por esta altura, Thomson já utilizava o termo *energia* em substituição de *vis viva* ou *força* anteriormente utilizados. Com “agente térmico”, referia-se à passagem do calor do corpo quente para o corpo frio. O problema com que se confrontava dizia respeito à aparente contradição entre a certeza de que as máquinas perfeitas não existiam e a teoria defendida por Joule de que as forças da natureza eram indestrutíveis. Numa máquina perfeita, uma quantidade de “agente térmico” originava uma quantidade igual de efeito mecânico. Por outro lado, numa máquina menos do que perfeita, uma dada quantidade de “agente térmico” originava uma quantidade menor de efeito mecânico. Convicto de que as máquinas reais eram menos do que perfeitas, Thomson não entendia o que acontecia à quantidade de efeito mecânico «perdido», correspondente à diferença entre o efeito mecânico que poderia ser produzido numa máquina ideal e o que era realmente produzido numa máquina real. Como explicar então a perda de efeito mecânico, se a energia não se destruía? Algum outro efeito teria que surgir em substituição do trabalho mecânico que aparentemente se tinha perdido! Quem teria afinal razão; Carnot, ao defender que o calor se transferia e se conservava ou Joule, ao defender que o calor se transformava? Estas eram as questões com que Thomson se debatia.

Quanto ao esclarecimento por ele tão desejado, chegaria dentro em breve através dos seus próprios estudos e dos de outro professor de nome Clausius...

## 4.20. Clausius une Carnot e Joule



**Figura 13 - Rudolf Clausius <sup>5</sup>  
(1822-1888)**

Enquanto Thomson corria em busca de uma explicação que o ajudasse a acabar com a discórdia entre as duas teorias, num outro país da Europa, alguém se viria a interessar pelo mesmo assunto. A pessoa em causa chamava-se Rudolf Julius Emmanuel Clausius e era um contemporâneo de Thomson, tendo nascido dois anos antes deste. Nasceu numa cidade situada na Prússia, chamada Köslin, actualmente de nome Koszalin, pertencente à Polónia. Napoleão Bonaparte era um nome que Clausius conhecia bem, uma vez que o seu país natal havia sido um dos que tinha conseguido vencer o ambicioso imperador numa longa e sangrenta batalha.

A formação científica de Rudolf Clausius incluía o estudo de Matemática e de Filosofia Natural nas Universidades de Berlim e Halle. Profissionalmente, Clausius aumenta o já elevado número de professores que constam na história. Do seu currículo conta-se o politécnico de Zurique, onde ensinou Física Matemática, assim como as Universidades de Würzburg e Bona. Segundo Laidler (2002, p.34), a pesquisa científica que sempre acompanhou este professor recaía sobre estudos teóricos nas áreas da termodinâmica e da teoria cinética. À semelhança de Thomson, também Clausius se interessou pelos estudos de Carnot, mas também ele teve dificuldade em ter acesso à obra

---

<sup>5</sup> Imagem retirada do livro de Atkins (1994, p. 5)

original e, para ficar a conhecer os alicerces desta teoria, apoiou-se nas análises efectuadas por Clapeyron e Thomson à mesma.

Seria a harmonia entre as teorias de Carnot e Joule possível e estaria a mesma prestes a conseguir-se? Após a exploração de Clausius à aparente contradição, da qual surgiu um artigo publicado em 1850, as teorias passaram de rivais a aliadas. O artigo de Clausius que segundo Laidler (2002, p.35), "...é normalmente considerado como o primeiro a apresentar a segunda lei da termodinâmica..." tinha por título "Sobre a potência motriz do calor, e as leis relativamente à Natureza do Calor que por conseguinte são deduzidas." Neste artigo, Clausius propunha-se a analisar a geração de trabalho a partir do calor, partindo do famoso exemplo da máquina a vapor. Tal como Carnot, a partir desta análise pretendia deduzir leis gerais do calor, extensíveis a qualquer situação de criação de trabalho a partir do calor, sem ficar confinado ao estudo da máquina a vapor.

O público mais preocupado com o dilema levantado por Thomson terá ficado satisfeito ao ler este artigo onde, segundo Smith (1998, p.97), Clausius expressava a opinião de que as dificuldades em acordar as duas teorias não eram tão grandes como Thomson julgava. O seu raciocínio assentava na convicção de que as duas teorias eram equivalentes desde que não se considerasse que não existia uma perda de calor. Segundo Smith (1998), Clausius, no seu artigo, terá colocado a questão da seguinte forma:

É perfeitamente possível que na produção de trabalho ambas possam ter lugar ao mesmo tempo; uma certa porção de calor pode ter sido consumida, e a porção restante ter sido transmitida do corpo quente para o corpo frio; e ambas as porções terem ficado numa relação definida com a quantidade de trabalho produzido. (p.97).

Desta forma, Clausius conjugava as duas teorias; apenas parte do calor originava trabalho, o que explicava que nas *máquinas menos do que perfeitas* a quantidade de trabalho não fosse igual à quantidade de calor que saía da fonte quente, dando credibilidade à teoria de Joule de que o calor se convertia em trabalho. Por outro lado, a restante parte do calor seria transferida da fonte quente para a fonte fria, dando credibilidade à teoria de Carnot de que para haver produção de trabalho, o calor tinha que ser transferido de um corpo para outro a temperatura mais baixa. É claro que a lei da conservação da energia também não corria qualquer perigo; sendo o calor e o trabalho duas formas de energia, não havia qualquer perda e a energia total mantinha o seu valor constante. Afinal, ambos tinham razão e não havia motivos para ter que abdicar de um das teorias! Aliás, o próprio

Carnot teria chegado facilmente à conclusão de que parte do calor se transformava em trabalho se a percentagem desta conversão fosse razoavelmente elevada. Citando Baeyer (1998, p.50), “Tivessem as máquinas a vapor sido dramaticamente mais eficientes, ele [Carnot] certamente teria notado o desaparecimento de calor do saco da energia.”

Tal como referido anteriormente, o outro grande interesse científico de Clausius era a teoria cinética que não deixou de focar neste mesmo artigo ao referir, segundo Smith (1998, p.98), que “... o movimento de partículas existe, e o calor é a medida da sua *vis viva*”. Relembre-se agora o antigo conde de Rumford, cujas ideias nascidas na fábrica de canhões não soube defender graças à não referência destas pequenas partículas. Clausius citava-as no seu artigo e a relação das mesmas com o «calor» ficaria cada vez mais em voga de agora em diante.

#### **4.21. O primeiro enunciado da segunda lei da termodinâmica**

Segundo Smith (1998, p.98), na segunda parte do seu artigo, Clausius analisava a tese de Carnot de que o trabalho era produzido a partir da transmissão de calor de um corpo quente para um corpo frio, mantendo a sua quantidade inalterável.

Clausius já havia demonstrado anteriormente que a quantidade de calor que chegava à fonte fria não era a mesma que havia partido da fonte quente, visto uma parte ter sido utilizada para gerar o trabalho.

Em relação à primeira parte da questão, também ele, não poderia deixar de anuir que para haver produção de trabalho, o calor teria que passar de um corpo para outro menos quente. Segundo Baeyer (1998, pp.50-52), se por um lado Clausius estava convicto de que Carnot não se havia enganado ao escrever acerca da «queda» de calor, por outro lado, a justificação por este apresentada para a validar já não fazia sentido. No contexto teórico em que Carnot desenvolveu as suas ideias dominava a ideia da conservação do calórico. Na prática, Clausius via-se perante uma certeza mas não sabia o modo de justificar a sua veracidade. Citando Baeyer (1998, p.51), “Em ciência, uma verdade que não pode ser provada chama-se lei.” Seguindo este princípio referido por Baeyer, Clausius aceitou a tese de Carnot de que todas as máquinas depositam calor num reservatório frio e chamou-lhe segunda lei da termodinâmica. Não obstante, Clausius libertou-se da certeza que a

certificava como lei e imaginou o que aconteceria se uma máquina funcionasse sem que parte do calor fosse depositada no recipiente frio. Smith (1998, p.99) descreve a experiência pensada por Clausius como forma de explorar o assunto. O professor Clausius convidou os seus leitores a imaginarem duas engrenagens, I e II, que funcionavam a partir da queda do calor de um corpo A (mais quente) para um corpo B (mais frio). A engrenagem I produzia uma quantidade de trabalho superior à da engrenagem II e o trabalho produzido em I seria utilizado para fazer a engrenagem II funcionar ao contrário. Clarificando melhor, Clausius pedia para que todos imaginassem um fluxo de calor de B para A em II, à custa do trabalho produzido pela engrenagem I. Como a quantidade de trabalho produzida em I era superior à produzida em II, a quantidade de calor que passaria de B para A seria superior à que passava de A para B.

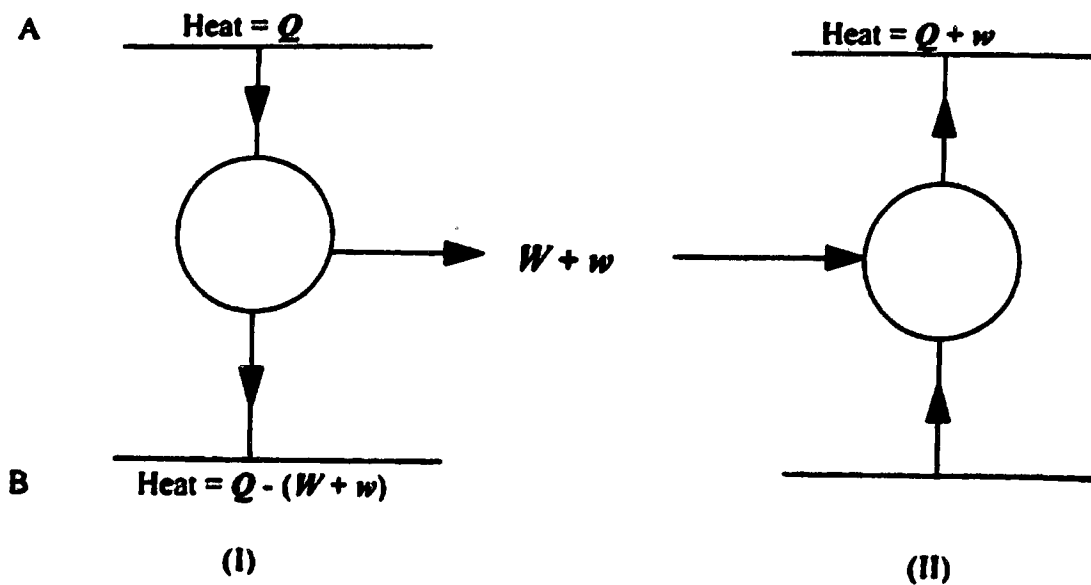


Figura 14- Máquina reversível de Clausius<sup>6</sup>

Na mente de Clausius pairava uma engrenagem em que o calor passava do frio para o quente, sem dispêndio de qualquer outra entidade. Visto esta imaginária máquina contradizer a natural tendência da passagem do calor do quente para o frio, Clausius optou por aceitar a tese de Carnot, estabelecendo a segunda lei da termodinâmica de uma forma

<sup>6</sup> Imagem retirada do livro de Smith (1998, p. 98)

mais simples: “O calor flui naturalmente do quente para o frio, mas não em sentido contrário.” Baeyer (1998, p.52), sublinha que o termo *naturalmente* utilizado por Clausius serve para clarificar que a passagem do quente para o frio se dá sem dispêndio de trabalho, ou seja, sem o recurso a qualquer fonte de energia externa. Não é falso dizer-se que o «calor pode fluir do frio para o quente», mas nunca naturalmente. Esta passagem exige a existência de uma fonte de energia, tal como o demonstra a formação de cubos de gelo num congelador, à custa da energia eléctrica. Como forma de ilustrar a experiência pensada de Clausius, Baeyer (1998, p.51) imagina um aparelho que conseguisse, de alguma forma, transformar o calor dissipado por um frigorífico em electricidade. O resultado seria um frigorífico a trabalhar eternamente sem qualquer fonte de energia externa. Claro que tal não é possível e todos terão que conviver com a infeliz notícia de que o «calor» que «se espalha» pelo universo (ou se dissipa) não se pode reciclar.

Não é necessário imaginar-se uma máquina de movimento perpétuo para se entender que o calor flui naturalmente do quente para o frio e nunca ao contrário. Basta recorrer a dados do senso comum para se concordar com a asserção anterior. Faz parte da experiência de todos que uma sopa quente em cima da mesa não ficará mais quente e que o copo de sumo com cubos de gelo que se encontra ao lado não ficará mais frio. O calor flui da sopa para o meio que a rodeia e que se encontra a temperatura mais baixa. Por outro lado, não há qualquer esperança em retirar calor ao copo de sumo, se o ambiente que o rodeia se encontra a uma temperatura mais elevada e se o processo se realizar naturalmente. Pelo menos até hoje, nunca se conseguiu proeza contrária! É neste sentido que Solomon (1992, p.126) defende que a segunda lei da termodinâmica deverá ser explorada, na sala de aula, antes da primeira lei. Citando a autora (1992, p.126) relativamente à aprendizagem dos alunos face às leis da termodinâmica, “Seria surpreendente se a sua termodinâmica intuitiva não tentasse explicar e predizer o curso da energia transferida e transformada de uma forma simples.”

## 4.22. Thomson rende-se à teoria de Joule

A publicação de Clausius contribuiu para que William Thomson reflectisse de uma forma diferente sobre as questões que anteriormente colocava em causa. Com estas questões mais esclarecidas, novas dúvidas surgiam na sua mente e, apesar de não imaginar, estava prestes a anunciar ao mundo algo que se esconde por detrás de qualquer fenómeno que envolva a transformação do calor em trabalho.

Repare-se que Clausius, no seu artigo, havia realizado uma análise da teoria de Carnot e, uma das fontes utilizadas para o efeito tinha sido o artigo de Thomson. Neste artigo, realçava-se a aparente contradição entre Carnot e Joule e o desfazer desta contradição foi o primeiro estudo apresentado por Clausius, no ano de 1850. Tal, leva a reflectir acerca do modo com as dúvidas de Thomson direccionaram o raciocínio de Clausius de forma a que, no desenlear da sua explicação novas questões se impusessem e importantes estudos surgissem. Não há dúvida de que os trabalhos de Thomson terão sido muito importantes no desenrolar dos de Clausius, da mesma forma que este terá fornecido parte do estímulo que Thomson necessitava para fazer avançar a sua investigação. É de frisar, ainda, a importância de todo o raciocínio de Sadi Carnot e de Joule nos trabalhos de ambos os professores, Thomson e Clausius. Citando Atkins (2003, p.136): “... a termodinâmica é um Amazonas de conceitos (...) uma confluência de muitos rios...”

Após a leitura de alguns estudos sobre o calor, entre os quais se encontrava o de Clausius, William Thomson iniciou a escrita de uma nova dissertação acerca das suas mais recentes conclusões. Este artigo tinha como título “Sobre a Teoria Dinâmica do Calor”. Neste trabalho, o professor Thomson dava-se como rendido em relação à aceitação da teoria de Mayer e Joule, sobre a convertibilidade das «forças». Após longa reflexão sobre o assunto, havia entendido que deveria anuir com a hipótese de que o trabalho se gerava a partir da transformação do calor. Esta conversão era apelidada por Thomson de teoria dinâmica do calor, atendendo a que o calor se transformava em movimento.

Novamente, o desejo de uma máquina ideal vinha ao de cima, pois com este engenho tudo seria mais simples de explicar, uma vez que todo o calor se transformava em trabalho. Não sendo o mundo imaginário que exige uma explicação, mas sim o real, era necessária a análise da «máquina menos do que perfeita». Segundo Smith (1998, p.101), Thomson não ponderava a possibilidade do trabalho «perdido» nas máquinas «menos do



que perfeitas», poder ser convertido em calor que se libertava, por exemplo, junto às peças que entravam em fricção. William Thomson acreditava, antes, que, dramaticamente, esta parcela de trabalho não poderia ser reciclada pela mão do ser humano. Por detrás da convicção de que o ser humano jamais conseguiria recuperar o trabalho «perdido» encontravam-se, mais uma vez, fortes crenças religiosas e novamente, a união entre a religião e a ciência era perfeita para explicar o grande e engenhoso mecanismo do mundo. O Homem jamais teria o poder de conseguir restaurar os dons do Criador, e portanto, jamais conseguiria restaurar uma *energia da natureza*, como era o trabalho, apenas Deus conseguiria o restabelecimento da energia.

Segundo Smith (1998, p.101), toda a exploração que Thomson realizou em torno do assunto passou a basear-se no axioma de que “Tudo no mundo material é progressivo”. A informação incluída nesta expressão era preciosa e dramática. Preciosa porque apesar de não ter qualquer hipótese de reutilizar a energia «perdida», o Homem podia utilizar em seu benefício a energia de «qualidade». O ser humano tinha a hipótese de aproveitar os dons que o Criador lhe oferecia da melhor forma, como por exemplo, através da construção de máquinas a vapor onde era possível converter o calor em trabalho útil ao Homem. O lado dramático surgia quando se pensava que uma parte da energia se dispersava *progressivamente* de forma a que o Homem não a pudesse utilizar mais. Segundo Smith (1998, p.101), o termo “progressivo” de Thomson poderia mostrar-se algo radical e delicado frente à sociedade, pelo que o professor decidiu não o pronunciar publicamente.

Como alternativa, a sua máxima passou a ser, “A dissipação Universal da Energia Mecânica”. Quando a expressão se tornou do conhecimento público, a energia passou a ser vista como algo que se degradava, “... a energia sustentava a conotação de uma decadência na natureza...” (Smith, 1998, p.102). Alguns, viam nesta explicação de Thomson o retrato do mundo. Segundo Smith (1998, p.102), os estudantes presbiterianos compreendiam que a doutrina estava totalmente de acordo com a degradação que acontecia no mundo, através de almas perdidas, corrupção e morte. Também a sociedade (principalmente inglesa) se revia nesta degradação de energia. Para Thomson existiam dois tipos de energia; a que podia «cair» e ser aproveitada (de melhor qualidade) e a que não conseguia realizar trabalho e, por este motivo, se dizia degradada (de baixa qualidade). Segundo Baeyer (1998, pp.118, 119), a estratificação social tão retratada, por exemplo, nos romances de Jane Austen, estava de acordo com esta classificação da energia. Existia uma classe social de «alta

qualidade» e uma classe social de «baixa qualidade». Tal como a energia, para que alguém da baixa sociedade ascendesse à alta sociedade era necessária uma grande «ajuda exterior». Por outro lado, da mesma forma que era fácil a «queda» do calor, a facilidade com que se «caía» de estrato social era outro dos grandes temas da literatura.

Até agora, o modo como Thomson explorava a história do calor estava a ter muito mais impacto em toda a sociedade do que tinha tido com os estudos de Carnot, Mayer, Joule ou Clausius. A causa era a facilidade com que as pessoas relacionavam a história da energia com a sua própria história.

### 4.23. O fim do mundo

Tomado de novo por argumentos religiosos, Thomson informava o seu público da existência de boas e más notícias nos meandros do mundo da energia. Segundo Smith (1998), o professor Thomson terá escrito no seu artigo que:

Acredito que demonstrei que o trabalho *é perdido para o homem* irrecuperavelmente [quando a condução ocorre]; mas não é perdido no mundo material (...) embora nenhuma destruição de energia possa ocorrer no mundo material sem um acto do supremo governador, podem ocorrer transformações que removem irrecuperavelmente do controlo do homem fontes de potência ... (p.110).

Desta forma, o professor Thomson anunciava ao mundo as boas e as más notícias. A quantidade da energia total do Universo não diminuía, alertando para o facto do «trabalho perdido» não desaparecer do mundo material. Esta informação traduzia a primeira lei da termodinâmica. As más notícias prendiam-se com o facto da energia se ir dispersando e deixar de ser útil à espécie humana, de cada vez que se dava uma transferência do quente para o frio. Esta ideia «assustadora» traduz a segunda lei da termodinâmica.

O artigo de lorde Kelvin acabou por ter grandes repercussões que não ficaram restritas à comunidade científica. O mundo ficou assustado quando Thomson anunciou que a energia do Sol haveria de chegar ao fim e que nesse dia o Universo acabaria. Segundo Smith (1998), Thomson dava o mote da seguinte forma:

Acredito que a tendência no mundo material seja tal que o movimento se torne disperso (...) Acredito que nenhuma acção física possa alguma vez restaurar o calor emitido pelo Sol, e que esta fonte não seja inexaurível; também que os movimentos da Terra e outros planetas estão a perder vis viva (...) e que embora alguma vis viva possa ser restaurada por exemplo para a Terra, através do calor proveniente do Sol, ou por outros meios, que a perda não possa ser *exactamente* compensada e eu penso que provavelmente é sob-compensada. O que muitos escritores, por exemplo Pratt, dizem, que vulcões e outras fontes de efeito mecânico são encontradas para compensar as perdas, é (acredito) absurdo; uma vez que primeiro é preciso mostrar que as perdas (...) podem produzir efeitos apreciáveis na rotação (...) da Terra dentro do curto período de tempo durante o qual o homem a habita (...) a permanência das formas presentes e dos acontecimentos do mundo físico é limitada. (p. 111).

Em relação a este excerto do artigo de Thomson não se pode deixar de notar que a recorrência à religião era uma constante no seu trabalho. Segundo Baeyer (1998, p.114), no rascunho relativo a este artigo, a exposição do lorde era feita recorrendo a uma passagem da bíblia que focava a mudança e a decadência. Nos seus argumentos relativos às leis da termodinâmica, Thomson nunca abdicava da vertente religiosa, o que parece criar uma contradição na sua forma de ver um mundo. A sua justificação em relação às leis da termodinâmica não parece ser coerente com a afirmação de que “não ficarei satisfeito até ter construído um modelo mecânico do tema que estou a estudar.” (Baeyer 1998, p.115) ou, relativamente aos trabalhos de Mayer, “Estou sempre a dizer que quando se pode medir aquilo do que se está a falar, e expressá-lo em números sabe-se qualquer coisa; (...) quando não se consegue expressar em números, o conhecimento é (...) insatisfatório.” (Baeyer 1998, p.115).

Baeyer (1998, p.115), salienta que foi Helmholtz quem deu a conhecer ao mundo a terrível catástrofe prevista por William Thomson. E por detrás desta desgraça estava a segunda lei da termodinâmica! O futuro lorde acreditava que toda a energia se iria transformar naquele calor indisponível para o homem. Relembre-se que este calor é aquele que passa para o corpo frio e cuja passagem espontânea para o corpo quente é «proibida». Na essência da sua horrenda previsão estava, então, a convicção de que todos os corpos ficariam à mesma temperatura. Neste dia, até o Sol tinha arrefecido e o seu calor não poderia mais ser transferido por não ter para onde ir; não existia nenhum corpo mais frio! Todo o calor deixava de poder realizar a sua «queda» e não haveria mais realização de trabalho mecânico. Esta previsão assustadora ficou conhecida como a «morte térmica» e o seu carácter trágico virou para si a atenção de todos. Escreveram-se livros, que ninguém queria deixar de ler, com o argumento imperdível da morte térmica do Universo. Holton et

al. (1980, p. 95), citam os exemplos de *La Fin du Monde* do astrónomo francês Camille Flammarion e a *Máquina do Tempo* do escritor inglês Herbert G. Wells.

Felizmente para todos, o fim do mundo não estava assim tão próximo e a prova é que já passou mais de um século e o Sol continua a transferir energia sob a forma de calor para a Terra. Citando Baeyer (1998, p.119), “Mesmo Thomson, por esta altura lorde Kelvin, viveu o suficiente para perceber o quanto se tinha enganado.” Baeyer (1998, p.119), refere-se a uma conferência que Thomson assistiu na Royal Society de Londres, no ano de 1904, em que o orador era Ernest Rutherford. Este físico terá fascinado e sossegado a sua assistência ao dar a conhecer uma nova fonte de energia- a radioactividade.

#### 4.24. Conclusões de Thomson

Na posse da preciosa informação relativa às duas leis da termodinâmica, o professor Thomson levantou duas questões, a partir das quais expôs as grandes conclusões a que tinha chegado através dos seus estudos. Segundo Smith (1998, p.121), Thomson questionou-se se;

“Será possível obter trabalho continuamente retirando calor de um corpo até todo o seu calor ter sido removido?”

“Será possível obter trabalho arrefecendo um corpo abaixo da temperatura do meio onde ele se encontra?”

Segundo Smith (1998), o professor Thomson explicou a sua primeira questão numa nota de rodapé da seguinte forma:

... terá que se admitir que uma máquina (...) produza efeito mecânico arrefecendo o mar ou a Terra, sem limite além da total perda de calor do mar ou da Terra, ou, na realidade, de todo o mundo material. (p. 121).

O professor Thomson deixava bem claro que não é possível transformar uma quantidade de calor totalmente em trabalho. Parte do calor dispersa-se e, apesar de não desaparecer da natureza, o homem jamais poderá utilizá-lo para realizar trabalho. Transforma-se num calor «proibido» ao ser humano.

Em relação à segunda questão, Thomson respondeu sem demora que tal jamais poderia acontecer, aproveitando para, em jeito de resposta enunciar que: “É impossível

através de um agente inanimado extrair efeito mecânico a partir de qualquer porção de matéria arrefecendo-a abaixo da temperatura dos objectos mais frios que a rodeiam”.

Com esta sentença, William Thomson deixava por escrito o seu próprio enunciado da segunda lei da termodinâmica.

Se o contrário acontecesse, o homem poderia aproveitar a imensa energia dos oceanos para seu benefício e o imaginário navio de Fiolhais (1992, p.153) poderia ser real. Um navio que navegava pelos mares à custa do calor que ia sendo retirado das águas e transformado em trabalho. À medida que o calor ia sendo retirado às águas, icebergues surgiriam e a visão seria a de um navio a avançar “... deixando atrás de si enormes icebergues.” (Fiolhais 1992, p.153).

Thomson formulava, desta forma, a segunda lei da termodinâmica. Mas, não tinha esta já sido enunciada por Clausius de outra forma? Analisada bem a questão, os dois enunciados não eram assim tão diferentes e a aceitação de um implicava a aceitação do outro. Aliás, citando Atkins (2003, p.138), “ter dois enunciados da segunda lei da termodinâmica não é muito económico”. Thomson estava convicto de que era inevitável um desperdício de calor sempre que se gerava uma quantidade de trabalho. Por outro lado, este desperdício só existirá se o calor flui da fonte quente para a fonte fria. Clausius afirmava que o calor fluía do quente para o frio, o que significa que tem que haver um desperdício de calor. Afinal ambos viam a segunda lei pelo mesmo prisma!

#### **4.25. Clausius reformula a segunda lei**

Após a publicação do artigo que punha fim a um conflito entre duas grandes verdades, Clausius preparava-se agora, passados quatro anos, para publicar uma nova dissertação, onde quantificava as ideias apresentadas no artigo anterior. Relembre-se que no artigo publicado no ano de 1850, Clausius afirmava que a máquina a vapor deveria ser vista como um mecanismo que absorvia calor de um reservatório quente, sendo parte deste calor transformada em trabalho e a outra parte transferida até um reservatório frio. Tendo conseguido harmonizar as teses de Joule e Carnot, segundo Baeyer (1998, p.58), no ano de 1850, Clausius anunciava que a energia se conserva e que o calor flui naturalmente do quente para o frio. Uma vez que a primeira destas duas proposições já havia sido

quantificada por Helmholtz, o professor alemão considerava que o enunciado da segunda, meramente qualitativo, determinava uma certa falta de congruência entre as duas. Os estudos de Clausius buscavam agora a matemática que faltava para reformular a segunda lei da termodinâmica de modo a tomar o mesmo formalismo da primeira lei. No ano de 1854, estava pronto para dar a conhecer ao mundo os seus mais recentes estudos, através da publicação de um artigo que, segundo Baeyer (1998, p.58), tinha por título “Acerca de uma forma diferente da segunda lei da termodinâmica.”

Com o intuito de quantificar a segunda lei da termodinâmica, Clausius entendeu que deveria regredir até à primeira percepção que havia tido da mesma. Desta forma, o professor de Matemática e Física voltou ao postulado de que, parte do calor que saía da fonte quente se transformava em trabalho e o restante era depositado num recipiente frio. Feita a análise da lei por este prisma, Clausius pretendia quantificar a parte do calor que era transformada em trabalho e a parcela que se dirigia para a fonte fria. Como ponto de partida, o professor Clausius sabia que “a lei da conservação da energia exigia que a soma das duas quantidades desconhecidas deveria ser igual à energia usada e a segunda lei que nenhuma das duas fosse zero...” Baeyer (1998, p.58).

Como forma de simplificar a situação, Clausius debruçou-se sobre o estudo de uma imaginária máquina reversível. Segundo Baeyer (1998, p.58), deste estudo saiu a brilhante dedução de que numa máquina deste género, o quociente entre o calor retirado à fonte quente e a temperatura a que esta se encontra é igual ao quociente entre o calor que flui para o recipiente frio e a temperatura a que este se encontra. Partindo do estudo de uma máquina reversível, Clausius havia descoberto uma equação que poria em marcha a quantificação da segunda lei da termodinâmica. Para este caso, o quociente entre a parcela de calor transformada em trabalho e a temperatura a que tal se realizava tinha o mesmo valor do quociente entre a parcela de calor que fluía para a fonte fria e a temperatura a que esta se encontrava. William Thomson podia congratular-se pela utilização que Clausius fazia da sua escala de temperaturas absoluta, sendo a única para a qual a equação era válida.

Estando consciente de que no mundo real apenas funcionam máquinas irreversíveis, o professor Clausius teria que transportar o seu raciocínio para este tipo de máquinas. Sabendo que, espontaneamente, o calor flui sempre para um corpo a temperatura mais baixa do que aquele onde se encontrava, Clausius percebeu que depois da passagem para a

fonte fria, o denominador da equação iria diminuir. Como consequência, o quociente aumenta e Clausius deduziu que, para máquinas irreversíveis, o quociente entre o calor e a temperatura aumenta. Mais uma vez, toda a dedução de Clausius que tão intrincada parece à primeira vista, é muito fácil de entender e explica a mais básica actividade do dia-a-dia. Imagine-se novamente o prato de sopa que se encontra em cima de uma mesa Utilizando os valores do exemplo de Baeyer (1998, p.60), realize-se que uma caloria de calor é transferida do prato de sopa que se encontra a uma temperatura de 330 kelvin para o meio que o rodeia, que pode ser a cozinha e que se encontra a uma temperatura de 300 kelvin. O quociente de Clausius aumenta de  $1/330$  para  $1/300$ . E novamente, até à data, não se conhece qualquer caso de um processo irreversível e espontâneo em que o quociente entre o calor e a temperatura diminua!

Segundo Baeyer (1998, p.60), após vários estudos, nos campos da Química e da Física, do comportamento de gases, de sólidos e de líquidos, da literatura publicada e da sua própria experiência sobre a transferência de calor em processos reversíveis e irreversíveis, Clausius obteve sempre os mesmos resultados. Tais resultados imprimiram coragem suficiente a este professor para anunciar que: “O calor sobre a temperatura absoluta é constante nos processos reversíveis e aumenta nos irreversíveis.” Satisfeito com a quantificação da segunda lei, Clausius apelidava o seu mais recente estudo de “Uma forma diferente da segunda lei.”

Segundo Baeyer (1998, p.57), Clausius deixava-se conduzir pelo princípio da parcimónia, que se baseia, tal como o nome indica, na escassez de algo. Segundo o físico Holton, que deu nome ao princípio, nele se incluem as teorias que fornecem o máximo de informação no mínimo formalismo. Guiado pelo princípio da parcimónia, Clausius ainda não estava completamente satisfeito com a última formulação da segunda lei da termodinâmica. Citando Baeyer (1998, p.57), “Como um poeta em busca da frase perfeita ele voltou ao assunto vezes sem conta até que: A sua formulação final é um monumento à parcimónia.”

## 4.26. O nascimento da entropia pelas mãos do padrinho Clausius

Tinham passado onze anos desde a publicação do artigo de Clausius “Acerca de uma forma diferente da segunda lei da termodinâmica”, no qual se fazia uma quantificação da lei. Agora, no ano de 1865, Rudolf Clausius preparava-se para publicar um outro artigo no qual apresentaria as conclusões finais a que tinha chegado sobre o assunto iniciado nos anteriores trabalhos publicados, nos anos de 1850 e 1854. Segundo Baeyer (1998, p.60), o novo artigo tinha por título “Sobre as várias formas das leis da termodinâmica convenientes para aplicações.” Veja-se a forma como o professor Clausius atribuiu um nome ao quociente entre o calor e a temperatura deduzido no seu anterior artigo e introduziu a palavra entropia no dicionário de qualquer país dos cinco continentes. O excerto que se segue é uma citação de Baeyer (1998) e refere-se a uma passagem do artigo de Clausius publicado em 1865.

... Uma vez que eu penso que é melhor dar nomes a quantidades como esta, que são importantes para a ciência, a partir das línguas anciãs, de forma a que possam ser introduzidas sem alteração em todas as línguas modernas, proponho chamar à magnitude S a *entropia* do corpo, da palavra grega τροπή, *transformação*. Formei intencionalmente a palavra entropia de forma a que fosse o mais semelhante possível à palavra energia, uma vez que ambas as quantidades (...) estão tão proximamente relacionadas uma com a outra no seu significado físico, uma certa semelhança nos seus nomes parece-me vantajoso. (p.61).

Em primeiro lugar há que clarificar que Clausius passou a representar o quociente entre o calor e a temperatura explicitado no seu artigo anterior através da letra S. Não satisfeito com a denominação de tão importante formalismo através de uma simples letra, optou por lhe dar um nome que não fosse susceptível de ser traduzido para qualquer outra língua. Neste sentido, a escolha do professor Clausius recaiu sobre uma palavra que provinha do grego e cuja sonoridade se parecia com energia, com a qual este quociente tem uma tão grande afinidade física. Um outro factor determinante na escolha do nome foi o facto de *entropia* significar *transformação*, atendendo a que o cálculo do quociente entre o calor e a temperatura pretende investigar a alteração sofrida pelos corpos entre os quais se dá uma transferência de energia sob a forma de calor.

Expostas as justificações há que realçar a importância do nascimento da entropia, descrito neste artigo. A partir daqui tudo se tornaria mais fácil, já que, o tão vago quociente poderia ser substituído pela palavra entropia. Clausius poderia substituir a anterior formulação da segunda lei da termodinâmica por outra bem mais floreada e de certeza bem



mais a seu gosto. A lei tomaria a seguinte forma: Nos processos reversíveis a entropia permanece constante e nos processos irreversíveis aumenta.

#### **4.27. O último enunciado da segunda lei**

Segundo Baeyer (1998, p.62), o princípio da parcimónia, pelo qual Clausius se guiava, não permitia que ele se sentisse totalmente satisfeito com este enunciado da segunda lei. Atendendo a que em qualquer processo que envolva transferência de calor, a entropia total do sistema aumenta, Clausius poderia abreviar o enunciado, estendendo-o a todo o Universo e construir o enunciado que Baeyer caracterizou como “um monumento à parcimónia”. Desta forma, o professor Clausius passou a enunciar a segunda lei da termodinâmica da seguinte forma: “a entropia total do Universo tende para uma máximo”.

Segundo Baeyer (1998, p.62), o artigo escrito por Clausius, em 1865, terminava com a compilação das duas leis da termodinâmica;

1. A energia do Universo é constante.
2. A entropia do Universo tende em direcção a um máximo.

#### **4.28. A divina entropia**

O auge da história do calor foi sem dúvida atingido quando os estudos dos tantos homens que se interessaram por este assunto confluíram para o mesmo ponto, originando um conceito que haveria de immortalizar a palavra *entropia*. A pequena palavra entropia consegue contar a história do mundo, o que faz com que este conceito seja único e maravilhoso. Qualquer acção que se pratique, a qualquer hora do dia ou da noite e em qualquer ponto do globo contribui para um aumento da entropia global do Universo. Por detrás desta exigência encontra-se a certeza de que, espontaneamente, o calor flui do quente para o frio. Para que a transferência inversa se dê, como no caso de um frigorífico, em que o calor flui do frigorífico (fonte fria) para a cozinha (fonte quente) é necessário uma fonte de energia externa. Neste caso, a fonte de energia é a electricidade, que garante que a entropia do sistema total aumente e que o processo não seja espontâneo. Assim, a entropia tem o dom de prever se um fenómeno é espontâneo ou não, indicando, por exemplo, em

que direcção se deve dar uma reacção química, citando Atkins (2003) acerca da segunda lei da termodinâmica:

...por exemplo para determinar se se deve usar carbono para reduzir um mineral (...) ou se se deve utilizar uma electrólise (...) não há nada a que não se possa aplicar e nunca falhou. Hoje é considerada como uma rocha de estabilidade absoluta, com validade universal e perpétua. (p. 141).

#### 4.29. A excepção não confirma a regra

Apesar da validade universal e absoluta da segunda lei da termodinâmica, descrita por Atkins, ao longo dos séculos foram feitas várias tentativas no sentido de a contradizer. Segundo Atkins (2003, p.138), tais tentativas foram, em parte, fruto da prioridade de crenças religiosas sobre o conhecimento científico. A primeira lei era de fácil aceitação e até do agrado dos mais agarrados a argumentos teológicos. O facto da energia permanecer constante era aceite como uma prova de que se tratava de um dom divino, fora do alcance de um ser humano, incapaz de aumentar ou diminuir a sua quantidade.

Em relação à segunda lei, a aceitação era bem mais dramática, uma vez que, ao contrário da primeira lei em que o dom divino permanecia inalterável, este novo «dom» divino de nome entropia estava sempre a aumentar. Como seria possível? Quem estaria a deitar entropia continuamente para o Universo? Esta não era uma lei bem aceite, mas apesar dos esforços, até à data, não se confirma qualquer excepção à regra. Nem mesmo experiências realizadas com demónios, relatadas brevemente, conseguiram contrariar a lei.

#### 4.30. Do quente para o frio

Resta questionar o porquê de se olhar para a entropia como um conceito tão difícil, pois se afinal até a mais tenra criança o tem interiorizado. A entropia aumenta porque o «calor flui do quente para o frio» em todos os processos que ocorrem sem a ajuda de uma fonte de energia externa. Quem não o sabe? Pergunte-se a uma criança de cinco anos de idade o que irá acontecer à água que se encontra no interior de uma cafeteira ao lume. É claro que a criança sabe que o calor vai passar do lume (fonte quente) para a água (fonte fria), de modo a que a água fique quente. Citando Fiolhais (1992, p.155), não esperamos

“... ver o lume aquecer e a água arrefecer ainda mais do que já está. Nunca ninguém espera aquilo que nunca acontece.”

O padrinho da entropia, aquele que lhe deu o nome, não há dúvida de que é o professor Rudolf Clausius. No entanto, não se poderá afirmar que ele é o único pai deste especial conceito físico tão facilmente entendido ao nível macroscópico, quando se observa o arrefecimento de uma chávena de café. Para além das personagens da história já conhecidos, entre os quais se destacam Carnot e Thomson, como estando muito próximos do conceito de entropia, novas figuras se apresentarão. Se Clausius interpretou este conceito físico macroscopicamente, os personagens que se seguem cumpriram o mesmo propósito mas a nível microscópico. O que se passará afinal com as pequeníssimas partículas constituintes do café, durante o seu arrefecimento? A resposta chegará dentro em breve, transportando consigo uma nova e não menos intrigante exploração do conceito de entropia.

## Capítulo 5 – O demónio que brinca com moléculas e a inevitável incerteza

“O importante em ciência não é tanto obter novos feitos  
mas descobrir novas formas de pensar sobre eles.”

Bragg<sup>1</sup>

### 5.1. Uma pequena história do átomo

Tudo havia mudado desde 1796, o frutuoso ano em que o conde rumou até à Baviera. Agora, em pleno século XIX, o desenvolvimento tecnológico avançava cada vez mais célere, com indústrias que começavam a contar com a ajuda da electricidade e meios de transporte mais evoluídos. O avanço tecnológico era fruto da «bendita» ciência que por sua vez se desenvolvia entusiasticamente, buscando novas ideias que pudessem dar resposta às necessidades e ao conforto da espécie humana. Citando Ducassé (s.d., p.117), “A partir do século XIX as ciências e as técnicas já não são separáveis; agem e reagem umas sobre as outras, constantemente.”

O mundo da Física, em grande parte devido ao impulso que a tão sonhada máquina a vapor havia dado, tinha o privilégio de ver nascer e evoluir mais um frondoso ramo chamado termodinâmica. Por detrás desta nova área que a Física abraçava escondia-se a revelação de alguns dos segredos que mais suscitavam a curiosidade do ser humano. A termodinâmica conseguia finalmente explicar o que era aquela maravilhosa essência da natureza chamada «calor», qual a sua relação com o movimento e o porquê da espuma do mar não se voltar a juntar, a erguer e a regressar ao oceano sob a forma de onda.

Há um século atrás, já o conde de Rumford anunciava que sabia o que era o «calor». Através das suas experiências descobrira que a tão famosa essência não era uma substância, mas que se relacionava com o movimento de algo. O perspicaz conde não estava enganado, apenas apresentava uma explicação incompleta, o que lhe valeu a desilusão de não ver ir

---

<sup>1</sup> Citado em <http://www.h2o.freehosting.net/>

adiante a sua teoria. De certeza que esta ilustre personagem gostaria de saber que hoje, algumas das suas ideias são as vigentes e de conhecer toda a história que está por detrás do tal movimento que origina o «calor». Esta última foi a parte que o conde não conseguiu explicar; afinal o que é que se movimentava?

Nos finais do século XIX e inícios do século XX, a partir dos estudos de vários cientistas, a resposta surgiu e com ela uma teoria sublime que faz a união entre antigos mistérios. Aliada à explicação tão esperada pelo Homem do que é o «calor», surge a convicção de que a matéria é formada por pequenas partículas. A apreciação de que os átomos não seriam meros modelos imaginados para explicar alguns fenómenos, mas que poderiam possuir uma existência física foi outro dos grandes triunfos da ciência.

A palavra átomo acompanha o Homem desde tempos remotos, no entanto, a aceitação desta entidade como algo pertencente ao mundo dos fenómenos físicos, teve que aguardar pelo desfecho de uma odisseia que se estendeu por muitos séculos. A difícil aceitação dos átomos justifica-se facilmente atendendo às reduzidas dimensões que estão em causa. Como é que o Homem poderia certificar-se da existência de algo que não era visível?

Segundo Asimov (1987, p.10), a história do átomo começou lá para o ano de 450 a. C., no dia em que Leucipo de Mileto e o seu aluno Demócrito de Abdera admitiram a hipótese da matéria não poder ser dividida infinitamente. Ao fim de muitas subdivisões de uma porção de qualquer material, encontrar-se-iam partículas indivisíveis. A estas partículas, Demócrito terá dado o nome de *átomos*, cujo significado era precisamente *não divisíveis*. O professor grego e o seu pupilo Demócrito, terão ainda sugerido que as diferentes substâncias que os rodeavam seriam compostas por diferentes átomos ou por diferentes combinações dos mesmos e que uma substância se poderia transformar noutra através de um rearranjo de átomos. Citando Asimov (1987, p.10), “Considerando que tudo isto era uma simples intuição genial, fica-se espantado com o seu rigor.” De facto, esta era uma ideia genial, o problema é que não passava de uma intuição. Não havia forma de provar o que os dois gregos afirmavam e por este motivo, os seus elevados pensamentos teriam que aguardar pela passagem de muitos séculos até terem o merecido reconhecimento. Não se pense, porém, que a ideia ficou esquecida e apesar de não ter vingado desde logo, ao longo dos tempos foram muitos os Homens que se debruçaram sobre o assunto e que defenderam a existência dos átomos.

Já no século XVII, o cientista inglês Robert Boyle (1627-1691) realizou algumas experiências com substâncias no estado gasoso, cujos resultados o levaram a pensar na forte possibilidade da existência de partículas constituintes da matéria. Segundo Asimov (1987, p.10), com estas experiências, Boyle percebeu que os gases eram facilmente dilatados e comprimidos, o que parecia indicar que seriam constituídos por partículas muito espaçadas entre si. No entanto, o grande ponto de viragem em direcção ao encontro com a realidade atómica, parece ter começado em 1808 com a publicação de um livro do cientista inglês John Dalton. Relembre-se que Dalton foi tutor de James Joule e, talvez, de alguma influência no gosto deste pelas medições e pelo estudo do calor. Segundo Asimov (1987, p.11), neste livro, Dalton demonstrou que os diferentes estudos do âmbito da Química e da Física, levados a cabo no século e meio anterior fariam todo o sentido se se considerasse a hipótese da matéria ser constituída por átomos. Esta obra do professor de Joule marca uma mudança de rumo no pensamento e na linguagem dos químicos, de forma a que Pais (1993, pp.105, 106), a caracteriza como a marca do nascimento da Química moderna. A legitimar a opinião de Pais encontra-se a aceitação de que “todos os modos de matéria são redutíveis a um número finito de espécies atómicas”, sendo que eram conhecidos 18 elementos na época em que Dalton escreveu o livro. Pais (1993, p.106), destaca, ainda, relativamente à obra do cientista inglês, a confusão que existia entre os conceitos de átomo e de molécula, ilustrada na seguinte passagem: “... Já verificámos que *todos os átomos do mesmo tipo*, simples ou compostos, devem necessariamente ser considerados iguais na forma, peso e qualquer outra particularidade.” As palavras anteriores são reveladoras de uma certo desfasamento entre os conceitos de átomo para Dalton e Demócrito. O último pensava no átomo como uma partícula indivisível, enquanto que o primeiro falava em átomos compostos. Na realidade, o conceito de átomo composto também não estará de acordo com o actual conceito de átomo. Segundo Pais (1993, p.106), ao utilizar este termo, Dalton pretendia referir-se a moléculas e não a átomos. Tal equivalência entre estes dois conceitos, lançou uma certa confusão no meio científico. Enquanto uns pensavam no átomo como um *átomo*, outros pensavam no átomo como uma *molécula*. Segundo Pais (1993), cinquenta anos após a publicação do livro de Dalton, um dos pontos da agenda de uma conferência de Química ainda era fazer a distinção entre os dois conceitos, sendo a questão colocada da seguinte forma:

Será necessário fazer uma distinção entre os termos *molécula* e *átomo*, designando uma molécula a mais pequena partícula dos corpos que podem entrar em reacções químicas e que podem ser comparados uns com os outros com referência às propriedades físicas e um átomo a mais pequena partícula dos corpos que estão contidos nas moléculas? (p. 106).

Desde a distinção entre molécula e átomo, passando pelo estudo da constituição dos átomos até à exploração da existência física de tais entidades, os estudos e discussões em redor do assunto não cessavam. Uma curiosidade acerca destas discussões e referenciada por Pais (1993, p.106), prende-se com os diferentes interesses que distinguiram os físicos dos químicos. Estes últimos pretendiam saber se os átomos tinham uma existência física ou se eram meros modelos imaginados para explicar as suas leis, enquanto que os físicos instrumentalistas depositavam a sua atenção nestas partículas com o objectivo de interpretar a segunda lei da termodinâmica. De facto, os esforços de químicos e de físicos não foram em vão, salientando-se que para os últimos, o prémio de tal estudo foi o apogeu da história da termodinâmica. A partir da relação entre o «calor» e os átomos uma explicação perfeita da segunda lei da termodinâmica surgiu e, claro, da entropia também.

## **5.2. A dança dos grãos de pólen**

A aceitação de que os átomos e as moléculas tinham uma existência física chegou ainda no século XIX pela mão de um botânico escocês, de nome Robert Brown (1773-1858). Segundo Asimov (1987, pp.12, 13), enquanto trabalhava, Robert Brown observou pela primeira vez, no ano de 1827, que as partículas de pólen suspensas em água se movimentavam de forma irregular. Apreciando a bela dança dos grãos, o botânico desde logo concluiu acerca da existência de vida no pólen. Uma vez que apenas uma observação não permite tirar conclusões, Brown quis reforçar a sua tese. Para tal, examinou, através da lente do seu microscópio, pequenas partículas de matéria corada totalmente inanimadas. Perante algum espanto do botânico, o fenómeno voltou a surgir; as partículas coradas dançavam tão entusiasticamente como os grãos de pólen. Assim, a hipótese da existência de vida como explicação daquele movimento, foi posta de parte. Quanto ao fenómeno, ficou conhecido por movimento browniano, dado o seu primeiro observador ter sido Robert Brown.

O interessante movimento não poderia passar despercebido aos cientistas da época e cedo se lançaram hipóteses. Segundo Pais (1993, p.122), terá sido na década de 1860 que a história das pequenas partículas constituintes da matéria atingiu o seu auge. Por esta altura surgiram, por parte de diferentes cientistas, a hipótese de que a dança do pólen se devia a colisões entre os grãos e as moléculas da água. Os grãos eram rodeados por um sem número de moléculas de água e estas, como que numa brincadeira, faziam-nos rodopiar sempre que se juntavam em grupos desiguais (em número e velocidade), empurrando-os ora para a esquerda ora para a direita. Se ao invés, as moléculas de água atacassem os grãos de pólen em grupos iguais, estes ficariam em equilíbrio e não mostrariam os seus belos movimentos. Pais (1993), cita a opinião de dois desses cientistas. O físico italiano Giovanni Cantoni terá dito que:

Penso que o movimento de dança das partículas sólidas (...) pode ser atribuído às diferentes velocidades que devem ser atribuídas (...) quer às ditas partículas sólidas, quer às moléculas do líquido que golpeiam (estas partículas sólidas) de todas as direcções. (p. 122).

Na mesma altura, o físico belga, Joseph Delsaulx afirmaria que “Sob o meu ponto de vista de considerar o fenómeno, os movimentos brownianos seriam o resultado dos movimentos moleculares caloríficos do líquido ambiente.” Para estes físicos e muitos outros da época, não subsistiam mais dúvidas de que as moléculas existiam e que eram as responsáveis pelo movimento browniano. Tanto o fluido como as partículas nele suspensas seriam constituídos por moléculas que se agitavam a diferentes velocidades. Embora as moléculas não fossem visíveis devido às suas reduzidas dimensões, ao colidirem, provocavam o movimento das partículas maiores, como o pólen. Atente-se ainda na importante opinião de Delsaulx, a partir da qual se entende que o movimento browniano foi um dos grandes portadores de notícias para a história do calor. No decorrer das várias experiências realizadas, compreendeu-se que a dança era mais animada quanto maior fosse a temperatura a que se encontravam as partículas em observação. Este parecia ser mais um indicativo de que o «calor» estava relacionado com o movimento das partículas constituintes dos corpos.

O fenómeno só agora tinha sido noticiado porque só poderia ser observado através da lente de um microscópio, como o que possuía o botânico Brown. Para objectos macroscópicos, o choque de pequenas partículas como são as moléculas, não produz qualquer efeito. Apenas os objectos microscópicos têm o prazer de poder exhibir um



constante zigzaguear ao sabor das colisões entre as pequeníssimas partículas que se agitam no seu interior a diferentes velocidades. Os desenvolvimentos associados à descoberta casual de um botânico que fazia o seu trabalho, juntamente com os resultados obtidos em diversas experiências, acalmavam a polémica que se arrastava desde a Grécia antiga. Os átomos e as moléculas começavam a ser promovidos de modelos teóricos a entidades físicas, pois a sua observação embora indirecta, parecia ser possível.

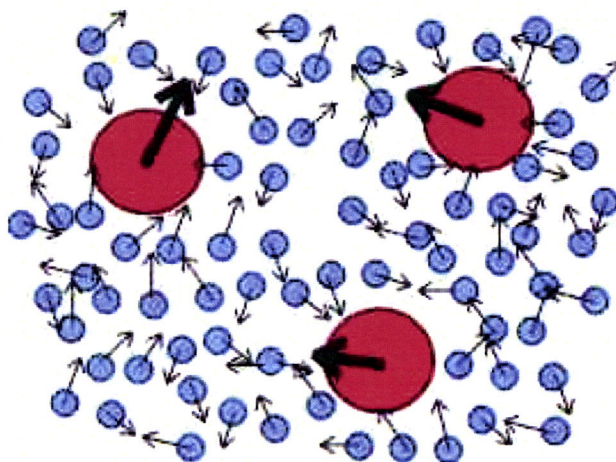


Figura 15- Movimento browniano<sup>2</sup>

Os estudos em torno do importante e belo movimento browniano não poderiam ficar por aqui. Já no século XX, os físicos Einstein (1879-1955) e Jean Perrin (1870-1942), separadamente, desenvolveram notáveis trabalhos a partir da análise do fenómeno, com a culminação na determinação das dimensões das moléculas de água. Segundo Asimov (1987, p.13), Perrin recebeu um merecido Prémio Nobel da Física em virtude deste seu trabalho, no ano de 1926.

Mais adiante nesta história, a dança de partículas do botânico Brown desempenhará um outro papel de grande importância, ao ser uma das causadoras da «morte» de um famoso demónio que está prestes a apresentar-se.

Hoje em dia, não se ouve falar de uma polémica acerca da existência dos átomos. Com o avanço da tecnologia, foi possível observar algo que o Homem julga ser o átomo. Segundo Asimov (1987, p.13), a primeira vez que se conseguiu concretizar o sonho humano de «ver» os átomos foi no ano de 1955, através de um microscópio de campo

<sup>2</sup> Imagem retirada de <http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica5/leituras/browniano40.gif>

iónico. Já em 1970, foi possível a visualização da imagem de átomos isolados, recorrendo a um microscópio electrónico de varrimento e, actualmente, contam-se com microscópios electrónicos de efeito de túnel. Claro que tratando-se de tão minúsculas entidades, a sua visualização directa jamais será possível, ao que se junta a eterna incerteza acerca do que se está a observar; serão de facto átomos?

### 5.3. O comportamento dos gases

Do longo percurso efectuado com vista a buscar a certeza da realidade física dos átomos, recolheram-se importantes estudos. Algumas das ideias nascidas nesta aventura, foram a centelha que levou à descoberta dos restantes mistérios que ainda se escondiam por detrás da segunda lei da termodinâmica.

Foi referido anteriormente que um dos cientistas do século XVII que apoiava a teoria atómica da matéria chamava-se Robert Boyle. Os seus estudos baseavam-se em experiências realizadas com substâncias no estado gasoso e deles retirou conclusões tão correctas que são válidas até hoje. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.97), foi no ano de 1662 que Boyle descobriu que comprimindo um gás muito lentamente, de forma a manter a temperatura constante, a pressão aumenta na mesma proporção em que o volume é reduzido. Pela mesma altura, o físico francês Edmé Mariotte (1620-1684), independentemente de Boyle, verificou que ao provocar a expansão de um gás, a temperatura constante, a pressão diminui na mesma proporção ao aumento do volume. Este último vinha apoiar os estudos de Boyle e, os dois formalizavam, assim, uma relação que ficou conhecida até hoje como a lei de Boyle-Mariotte. A relação mostra a proporção inversa entre o volume e a pressão de um gás, ou seja, mostra que o produto entre a pressão e o volume de um determinado gás mantém o valor constante. Duplicando o volume para o dobro, a pressão reduz-se para metade e reduzindo o volume para metade, a pressão duplica. A condição essencial para a verificação da lei de Boyle-Mariotte é a de que a temperatura se mantenha constante. A relação entre a temperatura e as duas características dos gases estudadas por Boyle e Mariotte teve que aguardar até ao século XIX.

Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), cientista francês, após algumas experiências realizadas com diferentes gases, estabeleceu a relação existente entre a temperatura e a

pressão e a temperatura e o volume. Uma vez que pretendia saber qual o efeito que a temperatura exercia na pressão e no volume do gás, fez variar o primeiro destes três factores, mantendo constante cada um dos outros em separado. Desta forma, Gay-Lussac deduziu dos seus resultados que, mantendo constante a pressão do gás, o volume aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura. Por outro lado, ao manter constante o volume, percebeu que a pressão do gás também aumenta na razão directa ao aumento da temperatura. Resta referir que a temperatura era medida na escala absoluta de Kelvin. À semelhança dos estudos de Boyle e de Mariotte, também os de Gay-Lussac estão imortalizados até aos dias de hoje através de uma relação matemática.

Segundo Laidler (2002, p.45), foi no ano de 1738 que o cientista suíço Daniel Bernoulli (1700-1782) explicou, com base no conceito de força, os estudos levados a cabo por Boyle e por Mariotte. Bernoulli provinha de uma família de cientistas e, ao interessar-se pelo estudo da hidrodinâmica, investigou acerca das forças que actuavam sobre os fluidos. Ao estudar o comportamento dos gases previsto pela relação de Boyle-Mariotte, formulou uma explicação baseada nas partículas constituintes da matéria e nas leis da mecânica. Segundo Gibert (1982, p.161), Daniel Bernoulli assentava os seus estudos na hipótese de que os gases eram compostos por moléculas que se moviam em linha recta, colidindo umas com as outras e com as paredes do recipiente onde o gás se encontrava. A pressão a que o gás estava sujeito era definida por Bernoulli como o conjunto das forças que as moléculas do gás exerciam sobre o recipiente onde estava contido. Em relação à lei de Boyle-Mariotte, Bernoulli explicava que, mantendo inalterável o número de moléculas do gás, assim como a temperatura, ao aumentar o volume do recipiente onde este se encontrava, o número de moléculas por unidade de superfície do recipiente seria diminuída, assim como, o número de colisões. Por outro lado, se nas mesmas condições o volume do recipiente fosse diminuído, o número de partículas por unidade de superfície aumentaria, assim como o número de colisões. Desta forma, Bernoulli concluía, tal como Boyle e Mariotte que a pressão e o volume de um gás variavam na razão inversa. A sua interpretação era assente no movimento das moléculas constituintes das substâncias no estado gasoso, o que era demasiado moderno para a época. O cientista suíço foi ainda mais longe, ao estudar o efeito da temperatura no comportamento dos gases. Segundo Duarte-Ramos (1986, p.98), ao aumentar a temperatura de um gás, Bernoulli terá entendido que as moléculas se movimentavam mais depressa, com o conseqüente aumento de «perigo» de

colisões por unidade de tempo. Esta última conclusão de Bernoulli estava de acordo com a relação que Gay-Lussac alguns anos depois iria deduzir, já focada anteriormente. O físico suíço lançava todas as pistas para a interpretação dos fenómenos com base nos movimentos das partículas constituintes da matéria. Infelizmente, as suas ideias não vingaram desde logo por se mostrarem avançadas demais para a época. Por um lado, a teoria atômica da matéria ainda não era bem aceite, por outro lado, o «calor» ainda era visto por muitos como uma substância, sem qualquer relação com o movimento das possíveis moléculas. Não obstante, aproximadamente um século e meio depois de Bernoulli ter dado a conhecer os seus estudos, estas ideias serviram de base à construção de um modelo que ajudava a reflectir sobre os fenómenos relacionados com o calor.

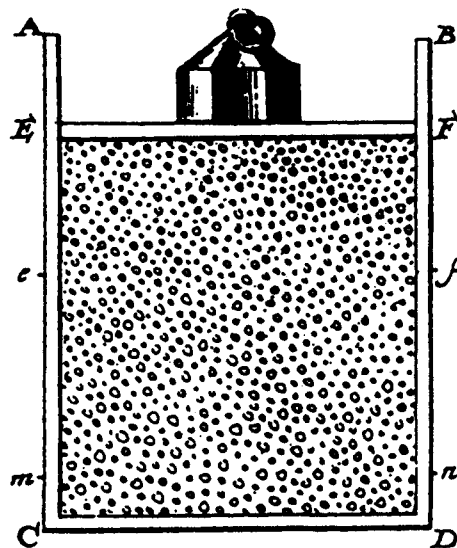


Figura 16 – Gás de Bernoulli <sup>3</sup>

#### 5.4. A teoria cinética do século XIX

O século XIX foi recheado de decisões importantes no reino da Física. Afirmar-se que este foi o século das grandes ideias, pelo menos na termodinâmica, seria injusto e a história que se pretende retratar até aqui não faria qualquer sentido. Foi o século das grandes decisões porque após um novo olhar sobre antigas ideias, não restaram mais

<sup>3</sup> Imagem retirada do livro de Purrington (1997, p. 134)

dúvidas acerca da natureza do «calor» e do significado microscópico da segunda lei da termodinâmica.

Uma das ideias que foi retomada e que serviu de degrau para ascender até à mais elevada e profunda escala de reflexão sobre a segunda lei da termodinâmica foi a descrição de gás de Bernoulli. No século XIX, os estudos de Bernoulli sustentavam a teoria cinética dos gases. Esta teoria baseava-se no pressuposto de que as substâncias eram formadas por átomos e moléculas e que estes, em contínua agitação, eram responsáveis pelos diferentes fenómenos que aconteciam no mundo macroscópico. Citando Gibert (1982, p.256), acerca da teoria cinética dos gases, “... foi no seu contexto que se desenvolveu, pela primeira vez na Física, o *conceito de certos fenómenos macroscópicos serem manifestações de natureza estatística, probabilística, de fenómenos microscópicos, individuais, moleculares (ou atómicos)*.” Neste modelo, os átomos e as moléculas eram vistos como bolas de bilhar, perfeitamente esféricas, movimentando-se de acordo com as leis de Newton. Segundo Holton et al. (1980, p.75), a teoria cinética dos gases também proporcionou o “último grande triunfo da mecânica de Newton.” Neste modelo, as partículas constituintes da matéria eram idealizadas de forma a simplificar o estudo que com base nelas se faria. Os cientistas que se debruçavam sobre tais estudos, depositavam as suas esperanças numa possível semelhança de comportamento entre os modelos e as verdadeiras partículas.

A Física estava prestes a dar um passo de gigante em direcção a um mundo de anões. Depois dos fenómenos terem sido genialmente interpretados a nível macroscópico, revelariam o resto dos seus segredos ao se levantar o véu do mundo microscópico. Thomson e Clausius foram dois dos físicos que contribuíram para o estabelecimento da segunda lei da termodinâmica a nível macroscópico. Não se pense, porém, que o mundo que se encontrava para além do alcance do olho humano lhes passou despercebido. Também eles entraram neste mundo e deram a sua interpretação para o conceito de «calor», desta vez sem o recurso da máquina a vapor, mas recorrendo aos movimentos moleculares.

Clausius publicou, nos anos de 1857 e de 1858, um trabalho intitulado “Sobre a natureza do movimento a que chamamos calor”. O padrinho da entropia era um dos que pretendia olhar o mundo através de um potente e gigante microscópio, de modo a entender quais as propriedades das invisíveis partículas constituintes da matéria e qual o tipo de movimento que possuíam quando originavam o «calor». Provavelmente, a meta a alcançar e que o faria sentir realizado seria a de descrever a entropia com base nas minúsculas

partículas. Este grande feito estava prestes a ser alcançado, não só pela mão de Rudolf Clausius, mas principalmente pela dos outros «pais» da entropia, como se verá dentro em breve.

Neste trabalho, anterior àquele em que introduziu a palavra *entropia*, Clausius tomou como base os estudos de Bernoulli. À semelhança deste último, Clausius também direccionava os seus estudos para as substâncias no estado gasoso. Tomava também como base o pressuposto de que a pressão a que um gás estava sujeito correspondia ao somatório das forças que as suas moléculas exerciam no recipiente onde estava inserido. Partindo das propriedades macroscópicas do gás, como a pressão e o volume, Clausius pretendia descobrir algo acerca das propriedades microscópicas do mesmo, tal como a velocidade e a massa das moléculas que o constituíam. Numa primeira fase do seu trabalho, deduziu uma expressão que relacionava as propriedades macroscópicas e microscópicas anteriormente referidas. Já que não podia ver as moléculas, Clausius viu-se obrigado a construir um modelo de representação das mesmas e esperava que o fruto da sua imaginação não se afastasse muito da realidade molecular. No seu modelo, as moléculas eram tidas como esferas de dimensões tão reduzidas que nunca chocavam umas com as outras. Movimentavam-se facilmente no interior do gás, a alta velocidade e sem o perigo de colisões, ou seja, as reduzidas dimensões das moléculas proporcionavam-lhes uma viagem sem riscos, a alta velocidade e em linha recta. E a que velocidade se deslocavam as moléculas? Esta era uma questão para a qual Clausius não poderia dar uma resposta individual, uma vez que o seu modelo pressupunha uma grande quantidade de moléculas no interior do gás. A hipótese mais viável e a qual o padrinho da entropia decidiu adoptar era a de pensar em termos médios. Seguindo este trilho, Clausius admitiu que todas as moléculas se deslocavam com a mesma velocidade, que seria a velocidade média do conjunto das pequenas partículas.

Depois de publicar a sua teoria sobre o movimento corpuscular dos gases, Clausius foi confrontado com uma situação que parecia ser um paradoxo e que contribuiu para que ajustasse alguns pontos dos seus estudos. Segundo Smith (1998, p.242), foi o físico e meteorologista alemão Buys-Ballot quem alertou para a situação, ao fazer a seguinte objecção: “Se as moléculas se movem em linhas rectas, os volumes de gases em contacto teriam necessariamente de se juntar um com o outro.” Ao afirmar que as moléculas eram tão pequenas que não colidiam umas com as outras, Clausius admitia que elas se moviam

livremente a grande velocidade. No entanto, com base em várias situações do dia-a-dia, é fácil constatar que neste ponto, a teoria de Clausius não deveria estar de acordo com a realidade. Se de facto as moléculas se movessem livremente, conseguiriam atravessar uma sala centenas de vezes em poucos segundos; será adequado admiti-lo? Basta pensar nas incomodativas nuvens de fumo que saem do cigarro de alguém que se encontra numa mesa de um café. O odor do fumo não atravessa de imediato a sala onde se encontra o fumador e também não desaparece instantaneamente. Esta situação mostra que as moléculas do fumo não se misturam de imediato com as moléculas do ar, levando a crer que as pequenas partículas que constituem a matéria não «viajam» tão rapidamente como Clausius supunha. Confrontado com a questão, o padrinho da entropia compreendeu que a objecção do físico alemão à sua teoria fazia todo o sentido e propôs-se a reformulá-la.

Inevitavelmente, teve que passar a aceitar que o tamanho das moléculas não podia ser desprezável e que durante os seus incessantes movimentos chocavam umas com as outras. Tal como numa colisão entre corpos macroscópicos, como por exemplo, numa colisão entre duas bolas de bilhar, há que pensar que o mais provável será uma mudança na direcção dos corpos em movimento. Com um pensamento análogo, Clausius terá concluído que por muito reduzidas que sejam as dimensões das moléculas, sendo o seu numero tão elevado no interior de qualquer substância, é forçoso que as colisões sejam frequentes. Sempre que um choque entre moléculas se dá, as suas direcções alteram-se, ficando sem sentido a antiga teoria que pressupunha um percurso em linha recta. Assim, as moléculas «atrasam-se» umas às outras e é por este motivo que a mistura de gases não imediata. O célebre padrinho da entropia foi mais além, introduzindo uma inovação à sua teoria e que segundo Smith (1998, p.243), ficou conhecida como “o caminho médio livre”. Como que a apoiar os seus novos estudos, Clausius deduziu uma relação quantitativa entre as dimensões das moléculas e a distância que estas conseguiam percorrer sem serem «incomodadas» com uma colisão. Ou seja, pretendia calcular que distância conseguiam as moléculas percorrer, entre colisões. Segundo Smith (1998, p.243), Clausius terá introduzido esta questão da seguinte forma: “Que distância em média consegue uma molécula percorrer, antes do seu centro de gravidade entrar na esfera de acção de outra molécula?” Segundo Smith (1998, p.243), depois de calcular o valor da distância média e de ter verificado que era muito inferior ao tamanho de uma sala, Clausius terá respondido a Buys-Ballot que desta forma a sua teoria não indicava "que duas quantidades de gás

saltando um sobre o outro se devam misturar rápida e violentamente.” Mas antes que “só um número comparativamente pequeno de átomos consegue percorrer grandes distâncias depressa, enquanto que a maior parte misturam-se gradualmente na superfície de contacto.”

Mais uma vez, por se tratar de um número muito elevado de partículas, Clausius tinha que recorrer a cálculos baseados em médias. Aliás, tratando-se do estudo de um mundo invisível e gigante, como é o dos átomos e das moléculas, um acontecimento passa a ser visto como mais provável ou menos provável.

### 5.5. Um escocês chamado Maxwell



Figura 17- James Clerk Maxwell <sup>4</sup>  
(1831-1879)

O trabalho de Clausius “Sobre a natureza do movimento a que chamamos calor” foi traduzido para inglês e percorreu a Europa. As ideias de Clausius chegaram à Escócia, país onde residia Maxwell, um bem disposto professor, grande investigador e com boas relações de amizade com um grupo de conhecidos físicos.

James Clerk Maxwell havia nascido em Edimburgo, capital da Escócia, no ano de 1831 no seio de uma família com algumas posses. Órfão de mãe desde os oito anos de

<sup>4</sup> Imagem retirada de <http://www.sciences.univ-nantes.fr>



idade, manteve uma relação muito próxima com o pai. Relação esta que poderá ter sido de grande influência na sua notável carreira de cientista. Segundo Baeyer (1998, p.77), o pai de James ensinou-lhe o prazer de aprender e quão excitante se poderia revelar esta tarefa.

Ele seguia os ensinamentos do pai, mostrando-se uma criança muito curiosa e difícil de saciar na vontade de aprender. Segundo Laidler (2002, p.50), muito do seu tempo livre era passado no solar da família, no sul da Escócia e James tinha adquirido uma pronúncia própria da zona. Quando aos dez anos foi estudar para a academia de Edimburgo, esta sua maneira de falar tão própria e os modos algo excêntricos que havia herdado do pai e do avô, não passaram despercebidos aos colegas de turma. James era ridicularizado, o que não o atormentava, graças ao grande sentido de humor que toda a vida o acompanhou. No entanto, tal sotaque poderá ter contribuído para a sua falta de à-vontade enquanto professor. Na verdade, Maxwell não estava desperto para os prazeres do ensino e, segundo Laidler (2002, p.51), de cada vez que se preparava para falar em público, era assaltado por um grande nervosismo, o que o fazia gaguejar. Aliado à sua dificuldade em discursar em público, surpreendentemente, Maxwell terá tido ao longo de toda a vida uma tendência para a prática de erros matemáticos elementares, como a troca dos sinais de menos e de mais.

Segundo Smith (1998, p.213), aos dezasseis anos foi estudar para a Universidade de Edimburgo e o destino quis que passasse a fazer parte do círculo de amizades que existia entre os professores desta Universidade e os da Universidade de Glasgow, entre os quais se encontrava o professor William Thomson. O privilégio de poder participar das discussões científicas deste grupo de professores foi proporcionado através do casamento da sua prima com o professor de matemática da Universidade de Glasgow, Hugh Blackburn. A estrita relação de amizade entre Blackburn e William Thomson datava desde os tempos de estudantes em Cambridge. Tornou-se mais forte depois de terem viajado juntos para Paris, na célebre viagem em que Thomson percorreu as ruas da bela cidade numa busca infrutífera do livro de Carnot.

Além dos fascinantes estudos que levou a cabo, lorde Kelvin também contribuiu para que um outro nome se revelasse, no mundo da ciência. Sete anos mais velho do que Maxwell, ao conhecê-lo por intermédio de Blackburn, William Thomson ter-lhe-á reconhecido desde logo qualidades de um potencial cientista. Como tal, segundo Smith (1998, p.213), delegou-lhe o importante cargo de seu assistente de laboratório, o que lhe

proporcionava o desenvolvimento de aptidões a nível experimental, assim como o aprofundamento de certos estudos científicos, tais como os de Faraday.

O grupo de professores do qual Maxwell se havia tornado amigo, incentivara-o a mudar-se para Cambridge, uma vez que aqui, ele poderia desenvolver competências matemáticas de uma forma mais aprofundada do que em Edimburgo ou em Glasgow. Segundo Smith (1998, p.214), seguindo os conselhos de quem sabia, James Maxwell mudava-se para Cambridge, em Outubro de 1850. Ainda enquanto estudante, começou a fazer investigação científica e a sua primeira reflexão sobre o electromagnetismo valeu-lhe, no ano de 1856, a cadeira de Filosofia Natural na Universidade de Aberdeen, uma cidade situada na Escócia. A sua maior decepção em Aberdeen parecia ser o clima de extrema seriedade que lá se vivia, tão oposto ao seu temperamento. Segundo Smith (1998, p.214), ele terá desabafado a um amigo que “Nenhuma piada de qualquer tipo é entendida aqui. Não fiz nenhuma em dois meses...”

A pesquisa científica de Maxwell, em diferentes campos da Física, nunca parou. No entanto, o trabalho que deixa o seu nome imortalizado na cabeça de qualquer estudante de Física, foi realizado na área do electromagnetismo. James Maxwell contou a história do electromagnetismo através de quatro equações matemáticas. Nestas equações, tão famosas até hoje, estão compiladas as leis do electromagnetismo, estudadas ao longo dos tempos por diferentes físicos. Citando Hazen e Trefil (1991, p.539), “As quatro equações de Maxwell (...) desempenham o mesmo papel em relação ao electromagnetismo, que as leis de Newton em relação ao movimento: resumem tudo o que se sabe quanto ao assunto.”

A par das equações que carregam o seu nome, Maxwell também deu um grande contributo para o desenrolar da história da segunda lei da termodinâmica. No ano de 1859, James Maxwell era professor na Universidade de Aberdeen e havia casado com a filha do reitor desta instituição. Levava a cabo alguns estudos sobre a viscosidade das substâncias, quando teve acesso à tradução do trabalho de Clausius. O conteúdo do trabalho desde logo lhe despertou a atenção. Através da sua análise foi conduzido para um novo mundo que era invisível e sem certezas quanto à sua realidade física.

## 5.6. Maxwell lê o trabalho de Clausius

Ao ler o trabalho de Clausius, Maxwell mostrou um certo cepticismo em relação a uma teoria que baseava toda a sua estrutura numa realidade por enquanto não confirmada, como era a realidade dos átomos e das moléculas. Segundo Smith (1998, p.244), Maxwell terá confidenciado numa carta endereçada a George Stokes que não sabia “até que ponto é que tais especulações concordariam com os factos.” Stokes era um dos professores irlandeses que fazia parte do grupo a quem o jovem James tinha tido o privilégio de se juntar uns anos antes. A primeira preocupação de Maxwell em relação à teoria de Clausius prendia-se com o facto das moléculas não serem, pelo menos até à data, consideradas como pertencentes ao mundo dos fenómenos físicos. Tratando-se de um fruto da mera especulação, não seria um erro basear todo um estudo nestas entidades? Se afinal as moléculas não existissem, toda a teoria construída sobre elas se desmoronaria! Segundo Smith (1998), na carta a Stokes, James Maxwell demonstrava esta sua preocupação da seguinte forma:

Assim que me encontrei apto e desejoso por deduzir as leis do movimento de um sistema de partículas que actuam umas sobre as outras apenas por impacto procedi da mesma forma que num exercício de mecânica. Agora pensa que há algo tão completo, uma refutação desta teoria dos gases que tornaria um absurdo investigá-la mais além, assim como encontrar argumentos sobre as medições das quantidades moleculares antes de sabermos se existem moléculas? (p. 244).

O cientista escocês preparava um artigo baseado no estudo que havia realizado em torno do trabalho de Clausius. A sua maior preocupação era o facto dos seus próprios estudos deixarem de fazer sentido, caso se viesse a considerar que as moléculas não existiam. O trabalho ficou pronto para publicação no ano de 1860 sob o título de “Explicações da Teoria Dinâmica dos Gases”. Segundo Smith (1998), na introdução do seu artigo, Maxwell deixava bem claro que a sua explicação sobre o que se passava no interior de um gás era apenas um modelo. Se o modelo fosse consistente com as características do gás, os seus estudos deveriam ser aceites. Se, por outro lado, as experiências realizadas com os gases se mostrassem incoerentes com os pressupostos deste modelo, então, este teria que ser abandonado. Maxwell terá alertado para a incerteza da sua teoria da seguinte forma:

Se as propriedades de tal sistema [mecânico] de corpos corresponderem às dos gases, uma importante analogia física será estabelecida, que poderá conduzir a um conhecimento mais exacto das propriedades da matéria. [Pelo contrário] Se as experiências com gases forem inconsistentes com as hipóteses destas proposições, então a nossa teoria, ainda que consistente consigo própria, fica provada ser incapaz de explicar o fenómeno dos gases. (p. 245).

Feitas as devidas ressalvas a um modelo que pretendia interpretar o comportamento dos gases, tendo em conta o movimento das partículas que o constituíam, Maxwell prosseguia dando conta de algumas alterações em relação ao modelo descrito por Clausius. Segundo Smith (1998, p.245), no seu artigo Maxwell terá escrito que:

Se um grande número de partículas esféricas iguais estivesse em movimento num vaso perfeitamente elástico, colisões entre as partículas teriam lugar, e as suas velocidades seriam alteradas em cada colisão; então após algum tempo a *vis viva* será dividida entre as partículas de acordo com uma lei regular, o número médio de partículas cujas velocidades permanecem entre certos limites determináveis, ainda que a velocidade de cada partícula varie a cada colisão. (p. 245).

James Maxwell pisava um terreno que até aqui estava fora da propriedade da Física. Tal como Clausius, Maxwell também previa que as moléculas se moviam com velocidades diferentes, mas ao contrário do físico alemão, não as dotava de uma velocidade média. Sendo impossível medir a velocidade de cada molécula, Maxwell era obrigado a partir para o cálculo das probabilidades. Ele sabia que teria que aprender a lidar com novas regras de jogo, sendo que daqui em diante as «certezas» acabariam. Segundo Baeyer (1998, pp. 86, 87), Maxwell não conseguia conceber um modelo tão simplificado como o de Clausius, em que todas as moléculas se moviam com uma mesma velocidade média. Ao contrário, imaginava que no interior de um gás reinava a desordem total, com um sem número de pequenas partículas a agitarem-se em diferentes direcções e com diferentes velocidades. Para aumentar a desordem, de cada vez que havia uma colisão entre moléculas, os seus percursos e velocidades eram modificados. Os movimentos moleculares deveriam fazer jus à palavra “gás” proposta pelo químico Helmholtz, cujo significado provém da palavra grega “caos” e o modelo de Clausius era demasiado simples para poder ser o mais adequado.

Fazer uma análise que não fosse baseada na probabilidade seria incorrer no mesmo risco que Reeves (1990, pp.96,97), com a sua borboleta. Ao fazer-se uma previsão meteorológica tem que se contar com o gigante número de moléculas que se encontram no ar e claro que os valores de temperatura, vento e chuva terão que ser médios. Mesmo assim, quantas vezes já se planeou uma ida à praia tendo em conta a previsão dos meteorologistas

e, desoladamente, se acorda com o terrível barulho da chuva a bater na janela! Quando se trata com um tão grande número de partículas é necessário ter em conta que qualquer previsão não é certa, é apenas provável. Imagine-se que se conseguiria prever, com algum rigor, como estaria o tempo daqui a um ano, introduzindo num computador os dados atmosféricos actuais. Reeves (1990, pp.96,97), sugere que o resultado seja o de bom tempo e imagina que uma borboleta levanta voo no momento em que se iniciam os cálculos. A colorida e alegre mariposa nem imagina a importância de tal acto. As suas delicadas asas provocaram um sopro leve mas suficiente para alterar os dados introduzidos no programa de computador. A pequena borboleta contribuiu para a desilusão e o descrédito dos meteorologistas, uma vez que, daqui a um ano estará a chover. A culpa não é dos meteorologistas que tão bem desempenham o seu trabalho. O que tem que se ter em conta é que tais previsões fazem parte do reino das probabilidades, uma vez que são efectuadas com base nos milhares de milhões de moléculas do ar. Maxwell sabia, tal como Clausius, que ao estudar o imenso mundo molecular teria que o fazer baseado em valores médios. Assim como também sabia algo que Clausius descuro; as previsões realizadas com base num tão grande número de partículas não podem ser certas mas apenas prováveis, tal como as previsões meteorológicas que uma delicada borboleta pode desmentir.

### **5.7. Cálculo de probabilidades**

James Maxwell sentia uma certa excitação em explorar este ramo da Matemática que até aqui era relacionado com actividades menos lícitas, como o jogo, e que ele condenava, dada a sua devoção ao presbiteranismo. No entanto, esta era a única solução que o professor de Filosofia Natural encontrava para descrever o comportamento de tão elevado número de partículas, tão pequenas, tão rápidas e que se agitavam ao acaso. Era impossível descrever o movimento das moléculas individualmente e uma descrição em conjunto, tal como Clausius já havia realizado, era a única saída. Quando se atira uma moeda ao ar, a probabilidade de sair cara ou coroa é a mesma. Da mesma forma, a probabilidade de que uma molécula se agite numa determinada direcção e com uma determinada velocidade também é a mesma para qualquer molécula do gás. Não havendo outra alternativa, Maxwell recorreu ao cálculo de probabilidades. Segundo Laidler (2002),

ele terá escrito uma carta ao seu amigo Lewis Campbell em que afirmava excitadamente que;

A verdadeira lógica deste mundo é o cálculo de probabilidades. Este ramo da matemática que é geralmente relacionado com o jogo, (...) e apostas, e por conseguinte altamente imoral, é a única «Matemática para o homem prático». (p. 53).

Clausius previu que, de cada vez que uma molécula colidia com outra, as suas velocidades variavam, no entanto, optou por dotar as moléculas com uma velocidade média, ao invés de atribuir diferentes velocidades a diferentes moléculas. Tratando-se de um número tão elevado de partículas, o valor médio de velocidade a que as moléculas se agitavam não deveria variar muito ao longo do tempo e Maxwell também não desprezou tal valor. A distribuição das velocidades moleculares por ele proposta pressupunha que a maioria das moléculas se movimentassem com uma velocidade próxima da velocidade média, mas que algumas possuíssem valores muito superiores ao valor médio e outras valores muito inferiores ao valor médio. Ou seja, as moléculas que se movimentavam no interior de um gás podiam experimentar qualquer valor de velocidade. A distribuição de velocidades de Maxwell pode ser entendida se se pensar num daqueles jogos que se encontram nas barracas lúdicas das feiras, tão atractivas pela parafernália de trofeus coloridos. Imagine-se que o jogo pelo qual se optou tentar a sorte consiste num alvo com um círculo no meio, sendo o objectivo acertar com um determinado número de bolas no círculo. Ao embater no alvo, a bola deixaria neste uma marca de tinta colorida. Provavelmente, o atirador das bolas conseguiria acertar com a maioria das bolas no centro do alvo, o que na distribuição de Maxwell representa a velocidade média. No entanto, muitas das bolas afastar-se-iam para a esquerda e outras tantas para a direita e umas afastar-se-iam mais do que outras, o que representa a gama de velocidades das moléculas de Maxwell.

No jogo da feira seria fácil para o atirador saber se acertou com as bolas no círculo, ganhando um merecido trofeu ou se a sua fraca pontaria induziu a que as bolas se afastassem do local pretendido. Poderia ainda saber se as bolas se haviam afastado muito ou pouco do círculo. Bastaria que o pretendente ao grande prémio olhasse para o alvo e verificasse as marcas que a bola deixava ao embater. Maxwell não tinha esta sorte, para ele não era possível saber se as moléculas se deslocavam com as velocidades que ele lhes atribuía ou não. Infelizmente, o professor escocês não viveu até ao dia em que o avanço

tecnológico se mostrou concordante com a sua previsão. Segundo Holton et al. (1980, p.82), desde 1920 que a verificação experimental indica que as velocidades das moléculas se distribuem de acordo com a previsão de Maxwell.

O professor escocês propunha assim um novo modelo para descrever o movimento das partículas que se encontravam no interior da matéria. Mas qual era, afinal, o interesse de estudar tais movimentos? O interesse era o de saciar uma das grandes curiosidades que o Homem transportou ao longo dos séculos. A grande curiosidade de saber o que era o calor! Partindo do princípio que o calor estaria relacionado com o movimento molecular, era urgente estudar este movimento, mesmo que fosse necessário fazê-lo totalmente às escuras, sem ver aquilo que se movia. Maxwell tinha entendido que as moléculas e os átomos se moviam ao acaso, com diferentes velocidades e em diferentes direcções e sentidos. Então, o calor deveria relacionar-se com este movimento caótico de partículas. Por outro lado, o trabalho deveria relacionar-se com um movimento ordenado de partículas. Quando um conjunto de pessoas pretende empurrar um carro avariado, todos se devem ordenar de modo a que cada força exercida no veículo tenha a mesma direcção e o mesmo sentido. Da mesma forma, a nível microscópico, para que um conjunto de átomos consiga realizar trabalho, tem que se ordenar de forma a que todos se movam na mesma direcção e no mesmo sentido.

O professor James Maxwell continuou as suas investigações no gigante mundo das minúsculas partículas e já que o objecto do seu estudo era o calor, facilmente mergulhou no estudo da segunda lei da termodinâmica que ditava que o calor flui sempre do corpo mais quente para o corpo mais frio. Antes que a história prossiga, deve apenas fazer-se uma salvaguarda em relação à afirmação anterior. A expressão “o calor flui” pode levar a pensar no calor como uma substância que passa de um local para outro, o que está de acordo com a ultrapassada teoria do calórico. O fluxo é de energia e não de calor e a expressão deve tomar a forma “A energia sob a forma de calor flui do quente para o frio”. Deve, ainda, clarificar-se que o movimento associado às partículas constituintes da matéria não corresponde ao calor, mas sim, à energia interna dos corpos. Esta última corresponde à soma da energia potencial e da energia cinética dos átomos e das moléculas. O calor corresponde ao fluxo de energia de um corpo a temperatura mais elevada para outro a temperatura mais baixa. Quando se transfere energia sob a forma de trabalho para um sistema ou quando um sistema transfere energia sob a forma de trabalho para a vizinhança,



estimula-se a organização das partículas que fazem parte do sistema ou da vizinhança. Quando se transfere energia sob a forma de calor para um sistema ou quando um sistema transfere energia sob a forma de calor para a vizinhança, estimula-se a desorganização das partículas que fazem parte do sistema ou da vizinhança.

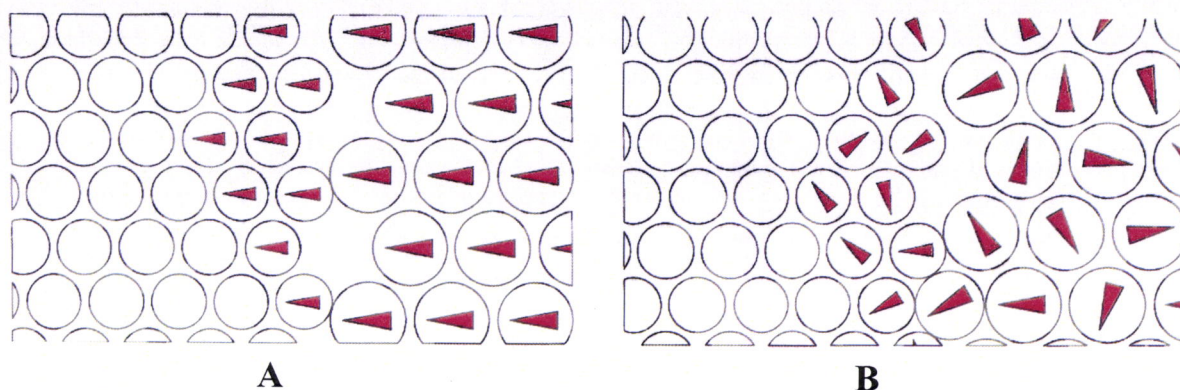


Figura 18 – (A) Transferência de energia sob a forma de trabalho; (B) Transferência de energia sob a forma de calor<sup>5</sup>

De volta aos trabalhos do professor Maxwell... A sua reflexão sobre a segunda lei da termodinâmica foi ímpar pela criatividade e, claro, porque deu a conhecer ao mundo um simpático diabinho, tão famoso até aos dias de hoje.

## 5.8. As brincadeiras do demónio de Maxwell

Tait era professor de Filosofia Natural na Universidade de Edimburgo desde o ano de 1860, lugar este que, segundo Smith (1998, p.175), havia sido disputado com James Maxwell. No entanto, a disputa pela prestigiada cadeira de Filosofia Natural da Universidade de Edimburgo não terá abalado a forte amizade que unia os dois físicos, já que a correspondência entre eles não cessou.

Segundo Baeyer (1998, p.92), foi no frio mês de Dezembro de 1867 que uma importante carta foi endereçada de Maxwell para Tait. O teor desta correspondência dizia respeito a uma profunda reflexão sobre o «calor» como resultado do movimento molecular e de uma interpretação pouco usual da segunda lei da termodinâmica. Segundo Smith (1998), Maxwell terá escrito ao seu amigo que:

<sup>5</sup> Imagem retirada do livro de Atkins (1984, p. 49)



Supõe agora um ser finito que conhece os percursos e as velocidades de todas as moléculas através da simples observação mas que nada pode fazer para além de abrir e fechar um orifício situado no diafragma, através de uma porta sem massa.

Deixa-o primeiro observar as moléculas em A e quando ele vir uma chegar cujo quadrado da sua velocidade seja menor do que a velocidade média quadrada das moléculas em B deixa-o abrir o orifício, permitindo a passagem da molécula em B. A seguir deixa-o procurar por uma molécula em B cujo quadrado da sua velocidade seja maior do que a velocidade média quadrada em A e quando esta se aproximar da passagem deixa-o arrastar a porta, deixando-a passar para A, mantendo a porta fechada para todas as outras moléculas. Assim o número de moléculas em A e B é o mesmo tal como no início mas a energia em A aumenta e em B diminui, isto é, o sistema quente fica mais quente e o frio fica mais frio, contudo não se realizou trabalho, apenas a inteligência de um ser observador e destro foi empregue. (p. 251).

Nesta correspondência entre os dois amigos nascia um ser que ficaria famoso e ao qual o seu padrinho William Thomson daria o nome de demónio. Sendo o seu pai o simpático professor Maxwell, a ágil criatura ficou com o nome de demónio de Maxwell. Apesar do nome menos favorável, não se tratava de um ignóbil ser, desprovido de escrúpulos que vinha ao mundo apenas para destruir a segunda lei da termodinâmica. Ele era apenas um diabinho esperto e ágil que gostava de brincar com átomos e moléculas. Ao mesmo tempo, suscitava uma interpretação diferente da segunda lei da termodinâmica.

O pequeno demónio gostava de brincar no interior de um recinto que continha um gás e que estava dividido em dois lados iguais, através de uma porta colocada a meio. O lado esquerdo do recinto seria o lado A e aqui, as moléculas do gás agitar-se-iam mais depressa do que no lado direito, denominado lado B. Atendendo à preciosa informação de que quanto maior fosse a agitação molecular (maior energia interna) maior seria a temperatura a que o gás se encontrava, o demónio sabia que se tivesse frio bastava passar para o lado A, visto este ser o lado a temperatura mais elevada. Claro que, sendo o número de moléculas de um lado e de outro tão elevado, as moléculas do lado A agitavam-se mais depressa do que as do lado B, apenas em termos médios. Ou seja, apesar da maioria das moléculas do lado A possuírem maior energia cinética do que a maioria das moléculas do lado B, algumas das moléculas do lado A agitar-se-iam com menos vigor do que algumas moléculas do lado B. Esta situação, prevista pela distribuição das velocidades moleculares de Maxwell, proporcionava um grande divertimento ao diabrete.

A brincadeira do demónio de Maxwell consistia em observar atentamente todas as moléculas, de modo a conhecer os percursos e as velocidades de cada uma delas. Assim que dava conta de que uma molécula do lado A possuía uma velocidade menor do que a

velocidade média das moléculas do lado B, abria a porta que dividia o recinto e permitia a passagem da molécula de A para B. Da mesma forma, assim que se apercebia de que uma molécula do lado B se agitava com uma velocidade maior do que a velocidade média das moléculas do lado A, abria a porta e permitia a passagem desta molécula de B para A. Maxwell concedia outra característica muito especial ao seu demónio e respectivo recinto de brincadeiras. Para permitir a passagem das moléculas de um lado para o outro, os pequenos e ágeis dedos do diabinho, conseguiam abrir e fechar uma porta que não tinha massa. Esta era mais uma vantagem para o diabo, pois uma porta sem massa permitia-lhe abri-la ou fechá-la, sem que tivesse que realizar trabalho.

No fundo, a incessante tarefa do diabrete consistia em arrumar os seus brinquedos que eram as moléculas do gás, ordenando-as de acordo com a velocidade a que se agitavam. No lado A ficariam as moléculas que se agitavam mais depressa e no lado B ele arrumava as moléculas que se agitavam com uma menor velocidade. No final da tarefa obtinha algo curioso que jamais havia sido conseguido espontaneamente; o lado A tornava-se ainda mais quente do que estava inicialmente e o lado B ficava ainda mais frio. Por não exigir a realização de trabalho, o processo ocorria espontaneamente. Esta era a brincadeira favorita do demónio de Maxwell e compreende-se o motivo. No final, ele conseguia a impressionante tarefa de aquecer o seu copo de leite morno que se encontrava no lado A do recinto, sem utilizar qualquer fonte de energia externa e conseguia, também espontaneamente, arrefecer ainda mais o seu copo de sumo com cubos de gelo, que se encontrava no lado B.

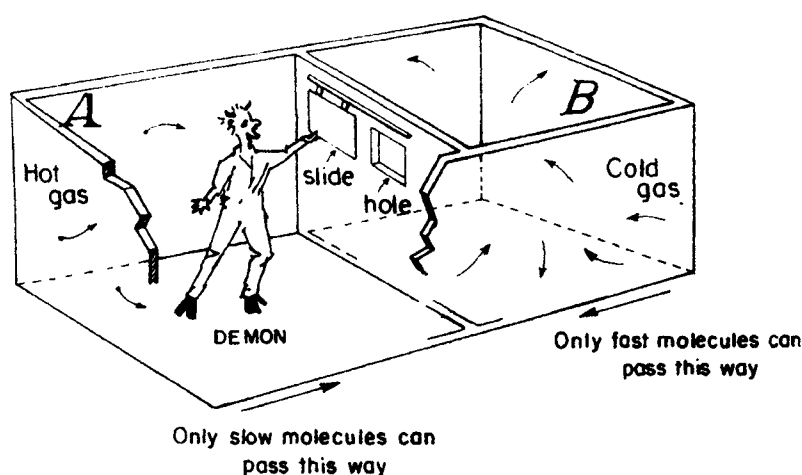


Figura 19- Demónio de Maxwell <sup>6</sup>

<sup>6</sup> Imagem retirada do livro de Laidler (2002, p. 56)

O demónio conseguia promover inúmeras situações dignas de um mágico. Confiando na sua agilidade, seria para si um deleite separar dois líquidos corados que se haviam misturado num recipiente. Se um dos líquidos fosse amarelo e o outro azul, a ágil criatura apenas teria que juntar as moléculas do líquido amarelo num lado do recipiente e as moléculas do líquido azul no outro lado. O resultado macroscópico seria a separação espontânea das duas cores. Para conseguir tamanhas façanhas, o diabrete jogava com dois trunfos, indisponíveis à espécie humana. Um dos trunfos era o facto de ser tão pequeno e tão ágil que conseguia entrar no mundo das moléculas e manipulá-las uma a uma. O outro trunfo era o de poder contar com uma porta sem massa, o que lhe permitia fazer a passagem das moléculas sem o dispêndio de trabalho.

Numa quimera ainda mais ambiciosa, passados alguns anos, Maxwell terá trocado uma outra correspondência, desta vez com o físico inglês John Strutt, propondo que as demoníacas aventuras se estendessem a todo o universo. Segundo Smith (1998), do teor da carta fazia parte o excerto que se segue:

Se este mundo é simplesmente um sistema dinâmico e se se inverter o movimento de cada partícula cuidadosamente ao mesmo tempo, então todos os acontecimentos ocorrerão ao contrário (...) as pingas de chuva reunir-se-ão no chão e erguer-se-ão até às nuvens e os homens verão todos os seus amigos passarem da sepultura para o berço até nós próprios voltarmos ao nascimento... (p. 251).

Por mais que lhe desse prazer, o pequeno demónio de Maxwell não conseguia cumprir a tarefa de mudar o rumo de todas as moléculas do universo simultaneamente. A única forma do diabrete conseguir a consecução da empreitada seria a de convocar um batalhão de demónios iguais a si, que o ajudassem a manipular as moléculas. O cenário final seria o de um exército de demónios a apreciar inúmeras visões, talvez belas, talvez bizarras, mas de certeza visões nunca antes contempladas. Os demónios poderiam assistir, como referiu Maxwell na sua carta, a visões como o regresso ao momento do nascimento e gritariam ao mundo que afinal o tempo volta para trás!

O batalhão de pequenos diabretes poderia simplesmente ocupar-se de uma parte do universo, manipulando as moléculas deste sistema, que se moviam ao acaso, de forma a que passassem todas a mover-se na mesma direcção e no mesmo sentido. Quando, extenuados acabassem esta tarefa, poderiam gabar-se de terem realizado trabalho sem dissipar energia e como recompensa, assistiriam a um espectáculo que os faria rir com

gargalhadas demoníacas. Os demónios conseguiam, por exemplo, fazer com que uma rocha de grandes dimensões subisse uma colina espontaneamente. A bizarra situação seria possível desde que as moléculas da rocha se encontrassem todas ordenadas no sentido ascendente da colina, tarefa fácil para os demónios! De facto, os simpáticos diabos, considerando possível a sua existência, proporcionariam situações que despertariam a gargalhada ao mais sisudo.

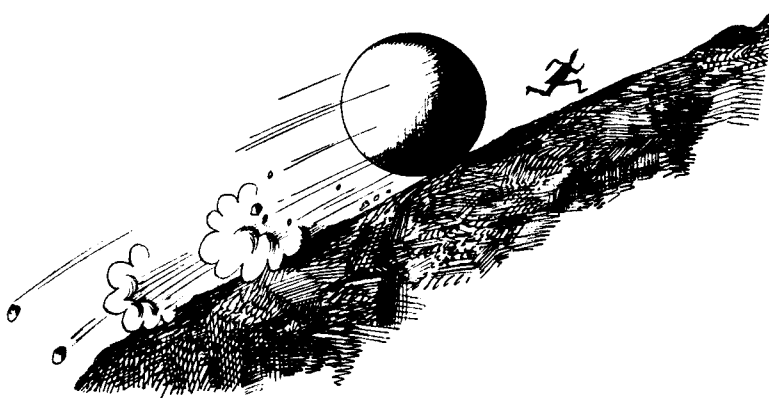


Figura 20- Rocha a subir uma colina espontaneamente <sup>7</sup>

## 5.9. O demónio e a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica

Com as suas diabruras, a criatura de Maxwell até conseguia ordenar as moléculas de forma a tornar possível o funcionamento de um frigorífico sem o recurso à electricidade ou a qualquer outra fonte de energia. No entanto, Clausius havia enunciado há uns anos atrás que espontaneamente, a energia sob a forma de calor fluía sempre do quente para o frio e nunca de forma contrária. Partindo do mesmo pressuposto, lorde Kelvin anunciou o terrível presságio de que o mundo sucumbiria a uma morte térmica, graças à constante dissipação da energia. Mais recentemente, Clausius tinha dado a conhecer ao mundo a palavra entropia e aclamado que esta nunca diminuía. Estas três conclusões haviam-se fundido numa só lei que ficou conhecida por segunda lei da termodinâmica. Só mesmo um demónio conseguiria pôr em causa uma verdade até agora totalmente irrefutável! Ao ordenar as moléculas conseguia fazer a energia sob a forma de calor passar do frio para o quente e até

<sup>7</sup> Imagem retirada do livro de Holton et al., p. 96)

conseguia realizar trabalho sem dissipar calor. Atendendo a que a entropia era definida como o quociente entre o calor e a temperatura, ao fazer-se a transferência de energia sob a forma de calor para o corpo a temperatura mais elevada, a entropia diminuía. Desta forma, negando todas as vias de acesso à segunda lei da termodinâmica, esta parecia ter perdido a sua validade universal.

As aparências iludem, uma vez que não era pretensão de Maxwell pôr em causa uma tão imponente lei como é a segunda lei da termodinâmica. Segundo Smith (1998), acerca do seu demónio, Maxwell terá dito que:

... se o calor é o movimento das finitas porções da matéria e se conseguirmos adquirir ferramentas de forma a lidarmos com estas porções da matéria individualmente, então conseguiremos tirar partido das diferentes porções (...) mas, os seres humanos não conseguem, não são hábeis o suficiente. (p. 251).

James Maxwell não acreditava que demónios brincalhões como o seu pudessem realmente existir e nem acreditava que o Homem conseguisse criar meios para manipular moléculas em seu proveito. Mas então, qual seria o seu intento ao imaginar um possível mundo em que demónios conseguiam brincar com moléculas?

Maxwell pretendia mostrar que, ao fazer-se a análise através do prisma microscópico, a segunda lei da termodinâmica tomava um estatuto diferente do que era habitual. Quando uma chávena de café se encontra exposta ao ar, dá-se uma transferência de energia sob a forma de calor do café para o ambiente. Como resultado desta transferência, as moléculas do sistema quente passam a movimentar-se mais lentamente, enquanto que as moléculas do sistema frio passam a movimentar-se mais rapidamente. A transferência cessa quando as moléculas do café e do ambiente se movem com velocidade médias iguais. Macroscopicamente, o resultado é o esperado; o café arrefece, o meio que o rodeia aquece e ambos ficam à mesma temperatura ao fim de algo tempo. Apesar deste ser o panorama que todos tomam como óbvio e dado como pertencente ao senso comum, no mundo dos átomos e das moléculas o óbvio não existe. Por ser um mundo em que reina a confusão total, apenas se pode falar em probabilidade e nunca em certezas. Maxwell queria chamar a atenção para o facto de que num mundo em que a estatística impera, alguns desvios ao que se espera que seja mais provável podem ocorrer e o inesperado pode acontecer. Estes desvios aos quais se dá o nome de flutuações são menos prováveis quando se tratam grandes amostras e quando existem, o mais provável é que se trate de um

pequeno desvio. Para que melhor se entenda, pense-se que a idade média dos alunos que estudam no 12º ano, em Portugal, é de 17 anos. Se se comparar a média de idades de cinco alunos que estudam no 12º ano é provável que o desvio à média seja maior do que comparando as idades de um universo de vinte e cinco alunos. É mais provável uma flutuação maior numa amostra menor. Por outro lado, é mais provável que, existindo uma flutuação, a média de idades dos alunos seja de dezanove anos do que de vinte e sete anos. Uma flutuação pequena é mais provável do que uma flutuação grande.

Relembre-se, agora, o espaço de brincadeiras do pequeno demónio e compare-se com a chávena de café quente. Considere-se que o café corresponde ao lado A do recinto diabólico, enquanto que o ambiente que rodeia o café corresponde ao lado B. O mais provável será pensar que, ao fim de algum tempo as moléculas de ambos os lados do recinto se movem com velocidades médias iguais. Macroscopicamente, é muito provável que, ao fim de algum tempo, o sistema se encontre a uma temperatura uniforme. No entanto, pode ocorrer um desvio a esta probabilidade, uma flutuação, em que as moléculas com maior energia cinética se separaram das de menor energia cinética, de acordo com a brincadeira do demónio. Tal situação nunca se verificou, pelo menos nunca ninguém deu conta de que o seu café quente aquecesse ainda mais, espontaneamente. Para que todas as moléculas se separassem por velocidades a flutuação teria que ser muito grande. Além de tal flutuação, correspondente à organização de todas as moléculas, ser muito pouco provável, o facto do sistema em jogo ser constituído por um enorme número de partículas, ainda a torna mais improvável. Por outro lado, mesmo que tal ordenação molecular fosse possível, demoraria apenas alguns segundos, pois os choques entre moléculas depressa reverteriam a situação. Esta separação molecular pode ocorrer para apenas algumas das partículas, constituindo uma flutuação menor e conseqüentemente mais provável, no entanto, macroscopicamente não se reflecte qualquer efeito.

O simpático demónio não existe, ninguém acreditaria no contrário. No entanto, há que não desprezar as suas brincadeiras, visto as ridículas situações por elas criadas não serem impossíveis, mas apenas altamente improváveis. Maxwell e o seu engraçado diabrete determinavam que a segunda lei da termodinâmica tivesse uma natureza diferente das outras leis estudadas até aqui. Enquanto que as leis da mecânica ou a primeira lei da termodinâmica têm um carácter absoluto, a segunda lei da termodinâmica tem um carácter estatístico. Afinal a energia sob a forma de calor poderá não fluir do quente para o frio!

Maxwell foi o primeiro a afirmar a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica, através de um mundo imaginário e divertido, em que os reinantes eram uns astutos demónios. Para que não restem dúvidas acerca das pretensões do professor Maxwell ao imaginar o seu pequeno diabrete, veja-se a forma como o próprio revelou os seus intentos. Segundo Laidler (2002, p.56), esta explicação acerca do demónio terá surgido numa nova correspondência endereçada a Tait. Nela, Maxwell colocava novamente o seu cunho pessoal, tão imaginativo e tão humorístico, ao apresentar a ágil criatura num catecismo denominado “Acerca de Demónios”. Segundo Smith (1998, p.251), o teor do catecismo seria o seguinte:

- 1- Quem lhes deu este nome? Thomson
- 2- O que eram eles segundo a natureza? Muito pequenos MAS enérgicos seres incapazes de realizar trabalho mas aptos a abrir e fechar válvulas que se movem sem fricção ou inércia.
- 3- Qual era o seu objectivo principal? Mostrar que a segunda lei da termodinâmica tem uma certeza apenas estatística.
- 4- O restabelecimento da desigualdade de temperaturas era a sua única ocupação? Não, visto que demónios menos inteligentes podem produzir uma diferença na pressão, assim como na temperatura, apenas permitindo que todas as partículas fluam numa direcção, enquanto param todas as que seguem noutra direcção. É tal como uma válvula. Não se deve chamar de demónio mas de válvula...

Nesta sua bem-humorada descrição do demónio, Maxwell previa que poderiam surgir diabretes menos inteligentes do que aqueles que separavam as moléculas em função das suas velocidades. Estes pobres diabinhos, apesar de menos destros, também tinham o direito de brincar com as moléculas. Para eles havia uma tarefa mais simples, bastava que deixassem passar todas as moléculas para um dos lados do recinto, independentemente das suas velocidades. A pressão do gás iria aumentar no lado do recinto onde se encontravam todas as moléculas e diminuir no outro lado. A diferença de pressões permitiria a realização de trabalho, tal como numa máquina a vapor, no entanto, neste caso não haveria qualquer dissipação de calor. Para a realização desta tarefa, Maxwell reconhece que não seria

necessária a presença do seu brincalhão demónio, uma vez que não era necessário fazer qualquer selecção das moléculas, bastava a utilização de uma válvula. Não sendo o Homem capaz de inventar tal válvula, a moral da história continua a mesma; Maxwell não pretendia ilustrar formas de violar a segunda lei da termodinâmica. Apenas chamava a atenção para o facto de situações espontâneas, como a ordenação de todas as moléculas de um gás num dos lados do recipiente, serem possíveis. São, no entanto, de tal forma improváveis que até hoje não se conhece nenhuma situação macroscópica que retrate semelhante estado microscópico.

Segundo Smith (1998, p.257), no ano de 1871, Maxwell publicava o seu livro “Teoria do calor”. Nesta obra poder-se-iam ler os estudos teóricos e experimentais que haviam sido realizados sobre o calor. É claro que o professor Maxwell não pôde deixar de interpretar as leis da termodinâmica e de dar um ênfase especial ao seu pequeno demónio. No capítulo denominado “Sobre a teoria molecular da constituição dos corpos”, terá adoptado a moderna linguagem<sup>8</sup> de “energia cinética” e “energia potencial”. Os dois termos haviam sido utilizados por Tait e Thomson durante a escrita de um manual de Termodinâmica, cerca de uma década atrás. Maxwell utilizava a nova terminologia na substituição da expressão “teoria dinâmica dos gases” para “teoria cinética dos gases”. A teoria com o nome remodelado abarcava o modelo que representava o mundo microscópico dos gases, em que um sem número de partículas se movimentava aleatoriamente e obedecendo às leis de Newton.

No ano de 1867, Clausius tinha dado a conhecer ao mundo a famosa entropia, no entanto, tão importante conceito não foi alvo de grande atenção por parte de Maxwell. Segundo Smith (1998, pp.256,257), Tait terá interpretado, aquando da escrita do seu manual de física, *Thermodynamics*, a entropia de Clausius da seguinte forma:

... Infelizmente a excelente palavra *entropia*, que Clausius introduziu (...) é aplicada por ele para a negativa da ideia que nós queremos expressar. Seria muito confuso para os estudantes se nos empenhássemos a inventar outro termo para o nosso propósito (...) E tomamos a liberdade de utilizar o termo entropia para este sentido alterado (...) A entropia do universo tende continuamente para zero. (pp. 256, 257).

A forma como Clausius tinha definido o moderno conceito a que chamou entropia não agradava a Tait. O problema não era o nome, que ele até considerava ter sido muito

---

<sup>8</sup> A substituição da antiga linguagem por estes novos termos foi introduzida por William Thomson e Rankine (1820-1872), por volta de 1850.



bem escolhido. Mas porque é que tal conceito deveria referir-se a algo tão negativo como a degradação da energia? Seria bem mais agradável se a entropia fosse a portadora de boas notícias. Foi assim que Tait tomou a liberdade de relacionar a entropia com a energia disponível para produzir trabalho e, claro que assim chegava a uma conclusão contrária à de Clausius. A entropia do universo não deveria aumentar mas sim diminuir a todo o instante, já que é o que acontece com a energia disponível. Segundo Smith (1998), Maxwell, considerando que o seu amigo não tinha entendido a verdadeira essência da grandeza de Clausius, ter-lhe-á dito que:

... Quando escreveste o esboço de *Thermodynamics* o teu conhecimento do trabalho de Clausius era algo imperfeito. O meu ainda é, contudo perdi muito tempo a estudar o seu trabalho e fui recompensado ocasionalmente. (p. 257).

Em Dezembro de 1873, Maxwell, influenciado pelos estudos do seu professor Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903), estava pronto para completar a opinião que mantinha em relação à entropia de Tait. Segundo Smith (1998, p. 260), Maxwell terá escrito que “... a entropia de Clausius corresponde à *energia indisponível* enquanto que a de T[homson] corresponde à energia disponível.”

Embora Maxwell tenha contribuído para a interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica, a sua abordagem não recorria ao conceito de entropia. Assim, o enigmático conceito baptizado por Clausius teria que aguardar pelos estudos moleculares de um físico austríaco.

Mesmo sem fazer referência ao conceito de entropia, Maxwell conseguiu desfazer muitos dos mistérios que se escondiam por detrás da lei que comandava que a energia sob a forma de calor fluísse do quente para o frio. Segundo Smith (1998), Maxwell interpretaria a segunda lei da termodinâmica da seguinte forma:

É provavelmente impossível reduzir a segunda lei da termodinâmica a uma forma tão axiomática como a da primeira lei da termodinâmica (...) a sua realidade não é da mesma ordem que a da primeira lei. (p. 265).

A segunda lei da termodinâmica estava mais enriquecida, uma ponta do véu que cobre o mundo microscópico tinha sido levantada, deixando antever a sua natureza estatística. Faltava agora descobrir o resto do véu e explorar o último enunciado da lei; “A

entropia tende para um máximo”, com base nas pequenas partículas que habitam o mundo que vai além da visão humana.

### 5.10. Uma tragédia na família Boltzmann



Figura 21- Ludwig Boltzmann <sup>9</sup>  
(1844-1906)

Ouviu-se um grito arrepiante vindo do apartamento que a família Boltzmann tinha alugado perto da estância balnear de Trieste, em Itália. Elsa tinha entrado no apartamento e assistido a um cenário aterrador, o seu pai havia-se enforcado. O homem que jazia morto na agradável tarde de Setembro de 1906, em frente à apavorada Elsa, chamava-se Ludwig Eduard Boltzmann. A julgar pela fórmula que, segundo Laidler (2002, p.69), Boltzmann inventou para calcular a felicidade de cada um, não deveria haver motivo para a tomada de tão dramática decisão. A sua fórmula ditava que,

$$\text{felicidade} = (\text{energia gasta a fazer o que se gosta})^2 - (\text{energia gasta a desempenhar funções desagradáveis})^2$$

Pelo que conta a História da Ciência, o físico austríaco Ludwig Boltzmann passou grande parte da vida a desenvolver de forma notável trabalho do seu agrado. Então, aplicando a

---

<sup>9</sup> Imagem retirada do livro de Laidler (2002, p. 59)

sua própria fórmula, deveria ser um homem muito feliz. No entanto, o desfecho terrivelmente dramático da existência de Boltzmann demonstra o contrário.

### **5.11. Quem era Ludwig Boltzmann**

Ludwig Boltzmann tinha nascido na bela cidade de Viena, capital da Áustria, no ano de 1844. Segundo Laidler (2002, p.69), aos 22 anos concluiu um doutoramento na Universidade de Viena e, passado um ano tornava-se professor assistente nesta mesma instituição. Em 1869, mudava-se para a cidade austríaca de Graz para ser professor de Física Matemática na Universidade local. Aos 25 anos, Boltzmann já mostrava sinais de grande instabilidade emocional, uma vez que as mudanças de residência e de emprego não mais cessaram a partir daqui. Sentia-se insatisfeito até com as disciplinas que leccionava. Do seu currículo fizeram parte as Universidades de Viena, Graz, Munique e Leipzig e as cátedras de Física-Matemática, Matemática, Física experimental e Física teórica. No entanto, a sua carreira profissional terminou no local onde se tinha iniciado, na Universidade de Viena.

Infelizmente, as doenças foram uma constante na vida de Boltzmann, mas o mal que mais preocupava a sua mulher e Elsa eram as depressões que o assaltavam constantemente. Periodicamente mergulhava numa profunda melancolia, sem que ambas nada conseguissem fazer para o despertar do mar de tristeza que o assolava.

### **5.12. O acaso não faz parte da segunda lei**

Ainda enquanto estudante, Boltzmann já desenvolvia trabalho científico de grande importância. Segundo Laidler (2002, p.61), a teoria cinética dos gases era um dos alvos do seu interesse, visto esta pôr em destaque as pequenas entidades cuja existência ele defendia tão fervorosamente. Ludwig era um daqueles homens especiais que não necessitava de ver os átomos para saber que eles existiam e para deles ter uma noção quase perfeita. Segundo Laidler (2002, p.61), o acesso à teoria cinética dos gases foi proporcionado por dois dos seus professores de nomes, Josef Stefan (1835-1893) e Johann Josef Loschmidt (1821-

1895). Segundo Baeyer (1998, p.103), a aquisição de uma gramática de inglês foi suficiente para que o físico austríaco lesse e ficasse fascinado pelo trabalho de Maxwell acerca da distribuição molecular, facultado pelo professor Loschmidt. Segundo Baeyer (1998, p.102), os dotes de Boltzmann não se confinavam ao mundo científico, também se distinguia nas artes, sendo um exímio pianista. O encantamento pelo estudo de Maxwell foi tão grande que o talentoso Boltzmann não resistiu a compará-lo a uma sinfonia. Mais do que elogiar o trabalho de James Maxwell, o físico austríaco ousou, no ano de 1868, apresentar uma alteração à mesma. Segundo Baeyer (1998, p.103), a principal novidade que Boltzmann introduzia na teoria de Maxwell era a contemplação da energia potencial nas moléculas que constituíam o gás. Maxwell considerava apenas a energia cinética das moléculas, que caracterizava a temperatura do gás. Boltzmann considerou que as moléculas interactuavam umas com as outras e que além da energia cinética também possuíam energia potencial. A teoria tornou-se mais completa e passou a ter o nome de distribuição de Maxwell-Boltzmann.

No ano de 1866, enquanto fazia pesquisa na Universidade de Viena, Edwing Boltzmann escreveu o seu primeiro artigo que, segundo Laidler (2002, p.61), tinha por título “Sobre o significado mecânico da segunda lei da termodinâmica”. Neste trabalho, o professor austríaco, afirmava que a segunda lei da termodinâmica podia ser explicada com base nas leis da mecânica, sem levar em conta a probabilidade. Parece impossível que o físico que relacionou a entropia com a probabilidade tenha escrito um trabalho baseado em tal pressuposto! Segundo Laidler (2002, p.61), a insatisfação de Boltzmann perante a segunda lei da termodinâmica prendia-se com o facto desta ser definida de uma forma “vaga e por métodos incertos”, perante o que ele se propunha a fornecer uma “prova da segunda lei, puramente analítica, completamente geral, tal como descobrir o teorema da mecânica que lhe correspondia.” Segundo Laidler (2002, p.62), Maxwell teve conhecimento dos trabalhos de Boltzmann e, o imaginativo físico que inventou um diabinho, como forma de explorar a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica, não ficou agradado com o que leu. Não gostou de saber que o físico austríaco pretendia mostrar que a lei era absoluta e que as leis da mecânica bastavam para a interpretar.

### 5.13. Dois paradoxos para Boltzmann explicar

Segundo Laidler (2002, p.64), foi no ano de 1874 que lord Kelvin, um homem preocupado com o destino do mundo, publicou um artigo onde mostrava que a maioria das acções que a humanidade realizava eram contraditórias com a interpretação que Boltzmann buscava para a segunda lei da termodinâmica. Em 1876, o professor de Boltzmann, Josef Loschmidt, levantou a mesma questão. Este assunto ficou conhecido por “paradoxo da reversibilidade”. Segundo Holton et al. (1980), o lord desta história terá apresentado o seu paradoxo da seguinte forma:

Se (...) o movimento de todas as partículas materiais do universo fosse invertido em qualquer altura, o curso da natureza seria simplesmente invertido para sempre, a partir daí. As bolhas de espuma que saltam na base de uma queda de água, reunir-se-iam e penetrariam na água; a energia mecânica voltaria a concentrar-se e empurraria a massa de água, sob a forma de gotas, pela queda acima, reconstituindo uma queda de água ascendente. O calor produzido pela fricção dos sólidos e dissipado por condução (...) voltaria de novo ao ponto de contacto e, através do corpo em movimento, reconstituir-se-ia a força que o produziu. As pedras polidas recuperariam da lama os materiais necessários para retomarem as formas lascadas iniciais e voltariam a reunir-se aos cumos das montanhas donde se tinham desprendido. E, admitindo como válida a hipótese materialista da vida, as criaturas vivas retrocederiam no seu crescimento, conhecendo o futuro mas sem memória do passado, indo até à situação de não terem nascido. Mas os fenómenos reais da vida transcendem infinitamente a ciência humana; e as especulações a propósito das consequências da sua inversão imaginária são completamente inúteis. (p. 99).

A contradição sugerida por William Thomson baseava-se no seguinte: A teoria cinética está assente no pressuposto de que os gases são constituídos por átomos e moléculas que se movem obedecendo às leis de Newton. Nada impede que um corpo que se move segundo estas leis reverta o seu movimento, no entanto, à escala macroscópica qualquer um se dá conta da irreversibilidade dos fenómenos. Ninguém parte um copo de vidro e se senta à espera de ver os cacos erguerem-se do chão e voltarem a unir-se de modo a compor o antigo copo. No entanto, tomando como certo que o recipiente é formado por átomos que colidem sem desobedecer às leis da mecânica, não há motivo para não acreditar que tal possa acontecer. De facto, as leis da mecânica permitem que o tempo volte para trás, o que torna esta situação paradoxal. À partida nada parece impedir que os átomos que formam o copo se movimentem em sentido contrário e o devolvam restituído a quem o partiu. No entanto, o ser humano jamais assistiu a um cenário igual e tal como desabafou William Thomson; “... os fenómenos reais da vida transcendem infinitamente a ciência humana ...” É efectivamente difícil acreditar em algo que contraria a experiência de todos!

Até uma criança tem noção de que o tempo tem apenas o sentido do passado para o futuro e nunca o contrário. A prova é que só há lembranças do passado e conhecimento do presente, quanto ao futuro, ficará para conhecer amanhã. Também Boltzmann devia saber que a maçã que caiu na cabeça de Newton não regressou à macieira. No entanto, segundo o que ele defendia, não deveria existir qualquer motivo para que tal não acontecesse. Bastava que os átomos que constituem a maçã, invertessem o seu sentido, mas claro que teriam que ser todos os átomos e todos ao mesmo tempo. Como terá, então, o professor Boltzmann explicado o paradoxo?

Segundo Laidler (2002, p.64), a resposta de Boltzmann chegou no ano de 1877 através da publicação de um artigo por ele escrito. A comunidade científica da época deve ter ficado surpresa com a resposta de Boltzmann. A forma como ele deslindava o paradoxo reflectia a sua inconstante natureza, que o levava a mudar de residência periodicamente. Depois de ter anunciado a sua insatisfação perante a interpretação probabilística da segunda lei da termodinâmica e de deixar a promessa de procurar o teorema da mecânica que lhe correspondia, deu uma resposta fundamentada na probabilidade. Explicou que não existe qualquer paradoxo desde que se admita que a reversibilidade de um acontecimento é possível, embora altamente improvável. Voltando ao exemplo do copo partido, segundo a explicação de Boltzmann e as lições dadas pelo demónio de Maxwell, não é impossível o copo voltar a ficar unido. Não se animem, porém, os que partiram a baixela e a querem recuperar, pois tal processo é tão improvável que uma vida inteira à espera não chegaria para tal. Para que o copo tomasse a forma inicial ou para que uma maçã regressasse à macieira, todos os átomos que constituem estes corpos teriam que se organizar no mesmo instante e inverter a marcha. Se apenas meia dúzia de átomos fizesse parte de um corpo, talvez tivesse que se esperar apenas à volta de um ano ou dois até assistir a uma estranha reversibilidade de fenómenos. No entanto, o mais pequeno corpo é formado por um gigante número de átomos que se movem totalmente ao acaso. Mesmo que uma dúzia desses átomos inverta o sentido ao mesmo tempo e organizadamente, macroscopicamente não se assiste a qualquer efeito. Esperar que espontaneamente todos os átomos façam o trabalho que o demónio fazia é tempo demais!

Passados alguns anos do desvendar deste paradoxo, surgiu um outro também suscitado pelos movimentos mecânicos dos átomos e das moléculas. Segundo Laidler (2002, p.64), o novo desafio a Boltzmann, defensor de uma interpretação da segunda lei da

termodinâmica com base na mecânica, foi proposto pelo físico francês Jules Henri Poincaré (1854-1912), no ano de 1893. Mais tarde, a mesma questão foi levantada pelo físico alemão Friedrich Ferdinand Zermelo (1871-1953), com quem Boltzmann não mantinha as melhores relações e a quem, segundo Laidler (2002, p.65), apelidava de velhaco. O novo paradoxo ficou conhecido por “paradoxo da recorrência”. Segundo Holton et al. (1980), Poincaré terá apresentado a nova contradição entre o mundo macroscópico e o modelo cinético dos gases da seguinte forma:

Um mundo fechado, governado apenas pelas leis da mecânica, passa sempre por um estado próximo do seu estado inicial. Por outro lado, de acordo com as leis experimentalmente aceites (se lhes atribui validade absoluta e se se pretende levar as suas consequências até ao fim), o universo tende para um determinado estado final, do qual nunca mais sairá. Neste estado final, que é uma espécie de morte do universo, todos os corpos se encontrarão em repouso à mesma temperatura.

... as teorias cinéticas podem desembaraçar-se por si desta contradição. Segundo elas, o mundo tende, a princípio, para um estado no qual permanece durante muito tempo sem alteração aparente, o que é consistente com a experiência; mas não permanece nesse estado para sempre; (...) apenas aí permanece durante um tempo muito grande, tanto maior quanto mais numerosas forem as moléculas. Este estado é a morte do universo, mas uma espécie de sono ligeiro, do qual ele acordará ao fim de milhões de séculos.

Segundo esta teoria, para ver o calor passar de um corpo frio para um corpo quente não é necessário ter a visão perspicaz, a inteligência e a destreza do demónio de Maxwell; basta ter um pouco de paciência. (p. 101).

Poincaré contrastava um mundo interpretado pelas leis da mecânica com um mundo que obedecia à segunda lei da termodinâmica. Ele não pensava ser possível a conjugação das duas visões, apenas uma seria a correcta para explicar os fenómenos do universo. Pelas leis da mecânica, ao cabo de um certo período de tempo, as configurações moleculares tomariam a mesma forma que já haviam tido anteriormente. Desta forma, qualquer um poderia assistir à repetição de um acontecimento que já havia ocorrido na sua vida há algum tempo atrás. Por outro lado, a segunda lei da termodinâmica impõe uma seta do tempo, proibindo que o tempo volte para trás e que acontecimentos passados se voltem a repetir. Como forma de exemplificar a sua questão, Poincaré lembrou o presságio de William Thomson de um fim terrível para o universo. No dia em que tal acontecesse, o equilíbrio térmico teria sido atingido de forma a que todos os corpos do universo se encontrassem à mesma temperatura. Uma vez que a segunda lei da termodinâmica demanda que apenas haja transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais quente para um corpo mais frio, nenhum processo ocorreria jamais. De uma forma contraditória, a teoria cinética dos gases, assente nas leis de Newton, aceita que depois de

se atingir o equilíbrio térmico, as transferências de energia sob a forma de calor voltem a acontecer. Poincaré baseava-se na convicção de que, sendo o número de moléculas do universo finito, algum dia atingiria o número de configurações possíveis. Quando este dia chegasse, arranjar-se-iam de uma forma semelhante à que já se tinham arranjado anteriormente. Assim, seria possível para o universo recuperar da morte térmica. Estas notícias de Poincaré não deixavam de ser boas notícias para a humanidade mais preocupada com o fim do mundo. Mas como explicaria Boltzmann este paradoxo, aparentemente sem explicação? O físico austríaco recorreu mais uma vez à probabilidade, dizendo que de facto é possível que as moléculas voltem a adquirir anteriores configurações, sendo que esta possibilidade é altamente improvável. Segundo Laidler (2002), o professor Boltzmann, entrando novamente em contradição consigo mesmo, ilustrou a sua resposta, através de uma quantificação. Estimou quanto tempo, em média, é que levaria para que um gás contendo  $10^{18}$  átomos que se encontrasse num volume de  $1\text{cm}^3$  e à temperatura ambiente, voltasse ao mesmo estado dinâmico que já havia tido anteriormente. Boltzmann terá concluído que;

se todas as estrelas do céu tivessem o mesmo número de planetas do Sol, e se cada um deste planetas tivesse a mesma população que a Terra, e se cada uma dessas pessoas vivesse  $10^{12}$  anos, o número de segundos dos seus tempos de vida combinados seria muito menor do que o enorme número que ele calculou para o gás. (p. 65).

O professor que há algum tempo atrás defendia uma interpretação mecânica para a segunda lei da termodinâmica, demonstrava com este exemplo, difícil de imaginar pelas suas enormes dimensões, que a probabilidade de violar esta lei é tão reduzida que ninguém assistirá a tal feito.

#### **5.14. A entropia é desordem**

Até aqui, Boltzmann não tinha introduzido nenhuma grande alteração no universo da termodinâmica. O facto de concluir que a segunda lei tinha uma natureza estatística não constituía uma novidade, visto Maxwell ter interpretado esta faceta da lei e de forma ímpar, através do engraçado demónio. Há, no entanto, uma importante grandeza pertencente ao reino da termodinâmica que mereceu toda a atenção de Boltzmann, enquanto que Maxwell descuroou uma explicação mais cuidada da mesma. A brilhante grandeza de que se fala é a



famosa entropia, nascida pelas mãos de Clausius e tão perfeitamente interpretada por Boltzmann, a nível atómico. O padrinho da entropia, Clausius, tinha-a definido como uma grandeza macroscópica, calculada através de uma expressão matemática e com uma aura de mistério em seu redor. Boltzmann deslindou o enigma que envolvia a entropia, relacionando-a com os anárquicos movimentos dos átomos e das moléculas.

Segundo Baeyer (1998, p.105), Boltzmann terá começado por analisar a entropia a nível macroscópico, percebendo que se tratava de uma grandeza aditiva, tal como o volume ou a massa. Ou seja, o professor austríaco sabia que ao colocar em contacto dois recipientes iguais com gás, cada gás passaria a ter o dobro da entropia que tinha quando se encontrava no recipiente individual. Sendo Boltzmann um homem convicto da existência dos átomos e fascinado por tal assunto, a descrição macroscópica da entropia não o satisfazia. Assim, partiu em busca de uma descrição microscópica da misteriosa entidade e para tal, imaginou o que aconteceria a nível molecular se juntasse os dois recipientes com gás. Boltzmann seguia a distribuição de velocidades de Maxwell, em que, a cada molécula correspondia uma velocidade, sendo o acaso um factor inerente à sua interpretação. Visto o número de moléculas que se encontram no recipiente de Boltzmann ser tão elevado, torna-se muito difícil uma análise do mesmo. Para que melhor se entenda este assunto, Baeyer (pp.105, 106), procedeu a uma simplificação, supondo que em cada recipiente se encontravam apenas cinco velocidades moleculares diferentes. Uma correspondente à velocidade média das moléculas do recipiente, duas um pouco inferiores à velocidade média e as outras duas um pouco superiores à velocidade média. Esta distribuição de velocidades é feita para cada um dos recipientes. Quando os dois recipientes se juntam, no novo sistema é provável encontrar vinte e cinco velocidades moleculares. O cálculo de probabilidades delega que cada uma das velocidades de um recipiente possa combinar-se com cada uma das velocidades do outro recipiente. Enquanto que a entropia é uma grandeza aditiva, a partir da simplificação de Baeyer, é fácil compreender que a probabilidade é uma propriedade multiplicativa.

Ao ter levado em conta o factor acaso na distribuição das velocidades moleculares, Boltzmann não mais se poderia livrar da terrível incerteza que se escondia no mundo microscópico. Então, para conseguir interpretar a entropia com base nos movimentos das pequenas partículas constituintes da matéria, teria que relacioná-la com a probabilidade. O seu único senão em levar avante tal relação era o facto da primeira ser uma grandeza

aditiva, enquanto que a segunda era multiplicativa. O professor Boltzmann, experiente no ensino das ciências exactas, apenas teve que recordar um pouco da mais primitiva matemática. Boltzmann sabia que, “sempre que se multiplicam dois números inteiros, o número dos seus dígitos soma.” (Baeyer, 1998, p.106). Por exemplo, 40 (dois dígitos) x 40 (dois dígitos) = 1600 (quatro dígitos), a esta regra impõe-se as excepções  $1 \times 1 = 1$ ;  $2 \times 2 = 4$  e  $3 \times 3 = 9$ , desprezáveis face ao número de moléculas que existem num gás. A regra básica da matemática e que Boltzmann não negligenciou faz a relação entre a adição e a multiplicação, e era nela que se encontrava a chave para relacionar a entropia com a probabilidade. Boltzmann terá raciocinado da seguinte forma: sendo a entropia uma grandeza aditiva, deve corresponder ao número de dígitos da probabilidade que é uma grandeza multiplicativa. Formulando tal sentença matematicamente, basta dizer que a entropia corresponde ao logaritmo da probabilidade, já que,  $\log(\text{probabilidade}^x) = x$ .

A grande conclusão de Boltzmann aparece hoje confinada numa das mais pequenas e conhecidas expressões da física;  $S = k \log W$ . Esta expressão traduz o significado microscópico da entropia, em que, S é a letra que Clausius definiu para a entropia, k é uma constante conhecida por constante de Boltzmann e W representa a probabilidade de um acontecimento. Segundo Pais (1993, p.83), actualmente, o jazigo de Boltzmann é facilmente reconhecível no cemitério central de Viena. Para o encontrar basta procurar um monumento com a gravação da relação que traduz o significado microscópico da entropia. No entanto, segundo Pais (1993, p.83), a constante k surgiu apenas no século XX, com os trabalhos do físico Planck (1858-1947), o que prova que Boltzmann nunca terá escrito a expressão que consta do seu jazigo. No entanto, apesar do cientista austríaco não ter sido o autor da formalização matemática, é justa a homenagem. Traduzindo para linguagem qualitativa a relação, obtém-se o teor da reflexão de Boltzmann de que, quanto maior for a probabilidade de um acontecimento, maior é a entropia do mesmo. Com esta sentença, ficava interpretado o significado microscópico da entropia. No entanto, há que definir o conceito de probabilidade para que não restem dúvidas de que além de muito importante, o conceito de entropia também é muito fácil de compreender.

Afirmar a probabilidade de um acontecimento é afirmar o número de arranjos moleculares que podem ocorrer num sistema, mantendo o aspecto macroscópico deste inalterável. Citando Baeyer (1998, p.107), “A probabilidade corresponde à medida de variedades de formas em que as moléculas de um sistema se podem rearranjar sem mudar

as propriedades externas, macroscópicas do sistema total.” Com base nesta definição, Boltzmann chegava perto de uma visão da entropia que a torna mais simples. Pensando na probabilidade como a medida de variedades de arranjos que as moléculas podem tomar, pode fazer-se uma equivalência entre probabilidade e desordem. Quanto maior for o número de configurações que as moléculas podem tomar, maior é a probabilidade e mais desordenado fica o sistema, com moléculas a bailar ao acaso em sucessivas colisões. Assim, em vez de se afirmar que quanto maior for a *probabilidade* de um sistema, maior é a sua *entropia*, poder-se-á dizer que quanto maior for a *desordem* de um sistema, maior é a sua *entropia*. Para que melhor se entenda o significado dos termos *probabilidade* e *desordenado* pense-se num baralho de cartas. A ordem reina no baralho quando o conjunto de cartas está distribuído de forma a que todos os números de um mesmo naipe se encontram juntos. A probabilidade deste acontecimento é muito baixa, uma vez que existe apenas uma forma em que as cartas se podem arranjar para que isto aconteça. Por outro lado, a probabilidade de um baralho ficar desordenado é muito grande, já que existe um sem número de formas em que as cartas se podem arranjar para que fiquem distribuídas sem uma ordem predefinida, como a sequência por números e naipes. Para testar qual é o arranjo de cartas mais provável, basta baralhá-las. Só com muita sorte ou com um pouco de batota é que no final deste processo se obtêm todas as cartas seguidas por números e naipes. Algumas até poderão estar ordenadas desta forma, mas é altamente improvável a ordenação do baralho inteiro, o mais provável será obter-se um baralho com cartas distribuídas ao acaso. Relembre-se que quanto maior for a probabilidade de um acontecimento, maior é a entropia do mesmo. Desta forma, ao estado mais ordenado e menos provável associa-se uma baixa entropia e ao estado desordenado e mais provável associa-se uma alta entropia. Se o conde de Rumford, Carnot, Mayer, Joule, William Thomson, Clausius, Maxwell e Boltzmann se juntassem a jogar copas, após cada partida, o baralho de cartas estaria mais ordenado. Considera-se por baralho ordenado uma sequência segundo números e naipes, o que, atendendo às regras do jogo de copas, se deverá verificar no final de cada partida. Relacionando uma diminuição de entropia com o aumento da ordem, de cada vez que terminava um jogo de copas, a entropia diminuía. No entanto, os ilustres físicos poderiam desejar jogar mais partidas, o que os obrigaria a baralhar as cartas. É muito provável que no final desta operação, as cartas se encontrassem distribuídas ao acaso, ou seja, com uma configuração desordenada. Relacionando uma maior entropia com

uma maior desordem, de cada vez que as cartas eram baralhadas, a entropia aumentava. Estaria Clausius enganado ao afirmar que a entropia do Universo tende para um máximo? Em vários processos é possível assistir a estados mais ordenados e, portanto, a uma diminuição de entropia. Nestes casos deve investigar-se acerca do que está por detrás do sistema ordenado. No caso do baralho de cartas, a sua ordenação deveu-se ao esforço de quem o dispôs desta forma. O esforço implicou dissipação de energia e, conseqüentemente, desordem. Se numa parte do sistema a entropia diminuiu, noutra parte houve um aumento que compensou a diminuição. No total, a entropia aumentou, corroborando a teoria de Clausius. Desde o ninho construído por uma cegonha até às pirâmides do Egipto, existem inúmeras construções que correspondem a estados mais ordenados. Porém, deve sempre lembrar-se que estes sistemas ordenados não se dispuseram assim espontaneamente. Há sempre um esforço despendido que conduz a uma dissipação de energia, ou seja, a uma desordem molecular e, portanto a um aumento de entropia que supera a diminuição causada pela ordenação. Até hoje nunca se assistiu a qualquer processo que provocasse a diminuição da entropia do universo total, o que prova que o mundo tem tendência para uma «desarrumação» espontânea.

Todos têm a experiência de ver a tendência do mundo para a desordenação, para o aumento da entropia. Basta não arrumar o escritório onde se trabalha diariamente durante dois dias para se compreender como o mundo tende para a desordem. E qual o significado de arrumado ou desarrumado? Entende-se por arrumado um determinado estado de ordem que cada um impõe ao seu universo. No caso do escritório arrumado poderá significar que os livros se encontram em estantes. No entanto, a tendência é para, ao fim de um certo período de tempo, encontrar livros espalhados ao acaso pela secretária, pelo chão ou até em cima de cadeiras. Claro que é muito mais provável encontrar um escritório desarrumado ou desordenado porque a este estado corresponde um sem número de configurações possíveis. Os livros podem encontrar-se em qualquer local, abertos ou fechados, na horizontal ou na vertical. A exigência do ser humano determina que apenas um ou dois estados correspondam a uma disposição arrumada ou ordenada do escritório, à semelhança do baralho de cartas em que apenas uma configuração correspondia à ordenada. Claro que tal como com o baralho de cartas, também é possível arrumar o escritório e obter um estado mais ordenado. No entanto, é necessário despende energia, sendo que, parte desta é dissipada e não volta a ser utilizada. No exemplo do escritório, quem paga o preço (não é

em euros, mas em energia dissipada) de obter um estado mais ordenado, com o consequente aumento de entropia, é quem se responsabiliza pela árdua tarefa de dispor por ordem todos os livros numa estante. Saliente-se que estes exemplos servem apenas para ilustrar o que se entende por estado ordenado e estado desordenado e qual a relação destes com o conceito de entropia. No entanto, não ilustram o funcionamento do mundo, uma vez que o estado mais desordenado do baralho e do escritório não ocorre espontaneamente.

Da mesma forma que o processo de arrumar o escritório não é um processo espontâneo, o processo que está por detrás do funcionamento de um frigorífico também não o é. Neste engenho de arrefecimento de alimentos, com vista à sua conservação, a energia sob a forma de calor flui no sentido contrário ao habitual. O fluxo dá-se do aparelho frio para o meio ambiente que o rodeia e que está mais quente. Ou seja, trata-se de um aparelho que desmente a conclusão de Carnot de que “o calor flui do quente para o frio”. A genialidade do engenheiro francês não está em perigo, o que acontece é que ele se referia a processos espontâneos e o funcionamento de um frigorífico não é um processo espontâneo. No interior de um frigorífico, o quente torna-se mais frio mas o frio não se torna mais quente. É como se o demónio de Maxwell se encontrasse dentro deste aparelho e conseguisse deitar fora todas as moléculas que se agitam mais depressa, deixando apenas as que se movem com velocidades mais moderadas. Assim, consegue-se que os alimentos que se encontram dentro do frigorífico se conservem a baixas temperaturas. No interior deste engenho há uma diminuição de entropia, visto as moléculas dos alimentos se agitarem mais devagar do que anteriormente, o que leva a uma maior ordenação das mesmas. Não obstante, ainda não foi nesta invenção tão bem maquinada que o Homem conseguiu desempenhar o papel do diabinho e violar a segunda lei da termodinâmica. No frigorífico, o demónio é a energia eléctrica, no entanto, por um lado, o processo não é espontâneo e por outro, parte da energia é dissipada sob a forma de calor. Para quem não acredita, é fácil testar! Basta tocar com uma mão na parte traseira do aparelho e depressa se sentirá como este se encontra quente, o que é traduzido, em termos microscópicos, num movimento totalmente ao acaso de átomos e de moléculas. O aumento de entropia no ambiente que rodeia o frigorífico é suficiente para compensar a diminuição de entropia do seu interior e garantir que a entropia do sistema global aumente. Não se pode deixar de prestar homenagem ao inventor do frigorífico, o aparelho que no interior refresca os alimentos e no exterior funciona como um aquecedor de cozinhas.

Os exemplos anteriores reflectem a tendência espontânea do mundo para a desordem. Por este motivo a entropia tem um privilegio de gerir o universo, demandando que um processo ocorra de forma a promover a desordem, garantindo o seu aumento.

### **5.15. A interpretação microscópica da segunda lei da termodinâmica**

Recorde-se a forma como lorde Kelvin e Clausius enunciavam a segunda lei da termodinâmica para que a mesma seja analisada, em termos dos movimentos moleculares. À semelhança de Carnot, ambos perceberam que, espontaneamente, a energia sob a forma de calor fluía do quente para o frio e nunca em sentido contrário. A partir desta preciosa informação sobre o calor, lorde Kelvin compreendeu que sempre que uma transferência de energia sob a forma de calor ocorria, uma parte do «calor» era dissipada. Clausius, partindo do mesmo pressuposto, direccionou os seus estudos para uma nova grandeza que aumentava sempre que uma transferência de energia sob a forma de calor ocorria, à qual chamou entropia. Em termos moleculares, a energia sob a forma de calor flui, espontaneamente, do quente para o frio porque esta é a transferência que corresponde a um aumento da desordem. Pense-se no caso da chávena de café que se encontra em cima da mesa da cozinha. Ao fim de algum tempo, ocorre uma transferência de energia do café para o ambiente que o rodeia e que se encontra a uma temperatura mais baixa. Esta transferência de energia só termina quando o café e o meio ambiente ficam à mesma temperatura, estado que se denomina de equilíbrio térmico.

No mundo microscópico, depois do sistema constituído pelo café e o ambiente que o rodeia atingirem a mesma temperatura, as suas moléculas agitam-se à mesma velocidade média. O estado de equilíbrio térmico é o mais desordenado. Tal como no baralho de cartas, há inúmeros arranjos que levam a este estado. Por outro lado, o estado inicial, em que o café está quente e o meio ambiente frio, corresponde ao estado ordenado, já que apenas uma configuração corresponde a tal panorama. Este é o motivo pelo qual a segunda lei da termodinâmica demanda que a transferência de energia sob a forma de calor cesse apenas quando se atinge o equilíbrio térmico. Quando o café e o ambiente ficam à mesma temperatura, o sistema atinge a desordem máxima.

Tal como nos exemplos anteriores, parte do sistema sofre uma diminuição de entropia. As moléculas do café passaram a agitar-se mais lentamente do que antes de se dar

a transferência, o que significa que passaram a move-se mais ordenadamente, com a consequente diminuição de entropia. Não obstante, a entropia do sistema global, formado pelo café e o meio que o rodeia, aumenta. Este aumento é garantido pelo ambiente que rodeia a chávena de café, cujas moléculas passam a mover-se mais rapidamente e mais desordenadamente. Para que não se pense que há uma certa batota, ao afirmar que o aumento de entropia compensa sempre a sua diminuição, utilizar-se-á uma analogia de Atkins (2003, pp.144,145), que tão bem explica este balanço. Atkins compara o efeito de um estrondoso barulho numa biblioteca em alvoroço e numa biblioteca silenciosa. O estrondoso barulho é comparado à energia transferida sob a forma de calor, enquanto que a biblioteca em alvoroço corresponde a um objecto quente e a biblioteca silenciosa corresponde a um objecto frio. Basta um pequeno barulho para provocar uma grande perturbação na biblioteca silenciosa, ou seja, uma pequena quantidade de energia provoca uma grande desordem no objecto frio. Por outro lado, o mesmo barulho não provoca um grande efeito na biblioteca em alvoroço, o que significa que a mesma quantidade de energia provoca muito menor desordem num objecto quente. Assim, compreende-se que quando se dá um fluxo de energia do café para o meio ambiente, este último (corpo frio) sofra um aumento de entropia tão grande que compensa a diminuição de entropia do café (corpo quente). Esta analogia também ajuda a interpretar o motivo da energia fluir sempre do quente para o frio e nunca em sentido contrário. Se o fluxo se desse do frio para o quente, tal como nas brincadeiras do demónio de Maxwell, o meio ambiente sofriria uma diminuição de entropia que não era compensada pelo pequeno aumento que o café iria sofrer. A entropia do sistema global diminuiria, o que é altamente improvável!

Atkins utilizou a analogia da biblioteca para mostrar como a entropia de Clausius e a entropia de Boltzmann são equivalentes. A energia transferida sob a forma de calor, comparada ao barulho, aparece no numerador da expressão de Clausius porque quanto maior for esta quantidade maior é a desordem introduzida por Boltzmann e maior é a entropia. A temperatura surge no denominador da expressão de Clausius porque quanto menor for a temperatura a que um objecto se encontra, maior é o aumento de entropia. A explicação é simples; na biblioteca silenciosa, o tumulto provocado por um barulho é muito maior do que o provocado numa biblioteca em alvoroço. Da mesma forma, no objecto frio, em que as moléculas se movem com menor velocidade, a confusão molecular causada por uma quantidade de energia é muito maior do que quando esta é transferida para um objecto

quente. Com a analogia da biblioteca, Atkins mostrou que a entropia macroscópica e a entropia microscópica têm o mesmo significado.

### 5.16. No mundo microscópico da máquina a vapor

Além da ajuda que prestou aos mineiros, retirando a água do interior das minas, a máquina a vapor também concedeu um grande auxílio aos físicos. Sendo uma máquina que funcionava à custa da transferência de energia sob a forma de calor, despontou um rol de estudos que levou à entropia e ao enunciado da segunda lei da termodinâmica. Seria, então, injusto desenvolver a história da entropia sem espreitar pela janela do mundo microscópico da máquina a vapor. Nesta máquina há uma transferência de energia sob a forma de calor da caldeira para o condensador. Após a transferência de energia, os átomos que se encontram na caldeira passam a mover-se com menor energia cinética, já que a temperatura deste depósito se tornou mais baixa. A desordem foi reduzida neste local e, como consequência, a entropia diminuiu. Parte da energia que sai da caldeira, ensinou o professor Clausius, transforma-se em trabalho e a restante parte flui até ao condensador. No condensador, que constitui a fonte fria da máquina, os átomos passam a mover-se a uma maior velocidade após a recepção da parcela de energia proveniente da caldeira. Um estado mais desordenado passa a reinar no recipiente e a entropia aumenta. Este recipiente corresponde à biblioteca vazia da analogia de Atkins, sendo que basta uma pequena quantidade de energia para produzir um grande aumento de entropia. Há, então, uma compensação da diminuição da entropia na caldeira e a garantia de que no sistema total esta grandeza aumente. Segundo Atkins (2003, p.150), basta que apenas metade da energia que sai da fonte quente (caldeira) entre na fonte fria (condensador) para que haja garantia do aumento total de entropia.

O engenheiro Carnot deveria gostar de conhecer estas notícias que interpretam os seus estudos sobre a máquina a vapor. Parte da energia tem que passar para o recipiente frio para assegurar um aumento da entropia global do sistema. Cumprida esta exigência, o rendimento de uma máquina não poderá ser de 100%, ou seja, nunca se pode contar com a transformação total da energia saída da fonte quente em trabalho, tal como Carnot concluiu há muito tempo atrás. Esta também é a explicação da previsão algo alarmista de William Thomson de que em qualquer processo há dissipação de energia. De facto, não se pode



contar com a realização de qualquer tarefa sem a obrigatoriedade de pagar um preço por ela. O preço não está marcado em euros, mas sim em energia dissipada, energia em que os átomos e as moléculas se movem caoticamente, sendo impossível a sua ordenação com vista à obtenção de trabalho útil. A desordenação do mundo microscópico leva a que a entropia aumente, validando a afirmação de Clausius de que “a entropia do universo tende para um máximo”.

A pequena palavra entropia guia o mundo, não há acção conhecida que não leve à desordem molecular. Se alguém tiver o privilégio de assistir a estranhas visões como uma pedra a subir espontaneamente uma rampa, já sabe o que aconteceu. Microscopicamente, os muitos átomos que constituem a pedra ordenaram-se de modo a que todos apontassem no sentido ascendente da rampa. Ou seja, a energia transferida sob a forma de calor (que promove o movimento desordenado dos átomos) transformou-se em energia transferida sob a forma de trabalho (que promove o movimento ordenado dos átomos), sem qualquer dissipação de energia. Este exemplo que pode parecer ridículo e impossível de acontecer traduz a natureza especial da segunda lei da termodinâmica. Mesmo sem a ajuda das brincadeiras do demónio de Maxwell, os átomos podem escapar ao comportamento médio que é esperado deles e ordenarem-se, provocando uma diminuição da entropia do universo. Tendo em conta o elevadíssimo número de átomos que fazem parte de qualquer corpo, a ordenação é altamente improvável. Então a segunda lei da termodinâmica que demanda que a entropia do universo tenda para um máximo, é de natureza estatística e baseia-se em probabilidades. A probabilidade de violá-la é muito pequena, mas não é impossível, a explicação serve para quem assistir ao fenómeno da pedra a subir a rampa. É possível, apesar de altamente improvável, que os seus olhos e a razão não o estejam a enganar!

### **5.17. Nem o universo inteiro consegue contrariar a segunda lei da termodinâmica**

Os mais belos segredos nunca serão totalmente revelados, esconder-se-ão eternamente por detrás de uma aura de mistério e de incerteza, o que os torna apetecíveis e soberbos. Esta história começou com a curiosidade do Homem perante o mistério do calor, mas o maior e mais belo segredo esconde-se na grandiosa oferenda da natureza. Quando e

como foi que o universo se formou, quando e como surgiu o primeiro ser, são algumas das questões mais maravilhosas que se podem colocar.

Contar a história do universo e do ser humano sem começar no primeiro dia é contar uma história incompleta e no entanto, certezas sobre os primórdios do universo e da vida jamais existirão. Uma viagem no tempo até ao momento em que tudo começou é algo impossível de realizar e a acérrima curiosidade humana terá que se contentar com as interpretações sugeridas pelas teorias desenvolvidas ao longo dos séculos. O primeiro dia, ou pelo menos até onde o Homem consegue ter noção do espaço e do tempo poderá ter começado com a grande explosão conhecida por big bang. Segundo Reeves et al (1997, p.18), se tivesse sido possível fotografar o momento da explosão, poder-se-ia admirar o retrato de um universo “totalmente desorganizado”, sem “galáxias, nem estrelas, nem moléculas, nem átomos, nem sequer núcleos de átomos...” O aspecto seria o de “um caldo de matéria informe, levado a temperaturas da ordem de milhares de biliões de graus.”

Em relação à data do grande acontecimento, estima-se que esteja situado algures entre 10 000 milhões e 15 000 milhões de anos. Mas o mistério continua; que tipo de processo se terá desenvolvido nos momentos após a explosão e que culminou com um universo cheio de galáxias e planetas? Segundo Reeves et al (1997, p.32), no instante que se seguiu à explosão, as forças da natureza organizaram-se de modo a empreender a maior obra de sempre; a formação do universo. Enquanto as partículas elementares que se concentravam no “caldo informe” se encontrassem sujeitas a temperaturas da ordem dos milhares de biliões de graus, agitar-se-iam de tal forma que não era possível uma união com vista à formação de novas estruturas. Assim, a temperatura baixou e as forças da natureza permitiram a união entre as partículas do “caldo de matéria informe”, fazendo surgir os átomos. Estes, por sua vez, ligavam-se e davam o seu contributo para a história do cosmos, originando as moléculas. Segundo Reeves et al (1997, p.37), o universo evoluía e organizava-se, com sucessivas pausas que chegavam a demorar centenas de milhares de anos. Após muito tempo do momento do big bang, chegou o dia em que as estrelas se formaram, juntando-se em maravilhosos aglomerados, denominados por galáxias. Agora, o universo era mais ordenado, um sem número de estruturas ordenadas reinavam e a palavra universo passava a fazer sentido.

Até aqui, a história da origem de tudo parece contrariar a segunda lei da termodinâmica, pois se a partir da desorganização completa surgiram estruturas

organizadas e a temperatura baixou, não há dúvida de que a entropia diminuiu! Mais uma vez, as aparências iludem; há que olhar para o sistema total antes de retirar conclusões precipitadas. É certo que ocorreu uma diminuição de entropia aquando da formação de estruturas ordenadas à custa de um abaixamento da temperatura, no entanto, a diminuição da entropia ocorreu apenas numa parte do sistema. Se se considerar, por exemplo, o que acontece no interior de uma galáxia, é fácil perceber que afinal a entropia do sistema total aumenta. Segundo Reeves et al (1997, p.39), no interior das galáxias a força da gravidade entra em acção, de modo a garantir a veracidade da segunda lei da termodinâmica. Esta força provoca a condensação da matéria que se encontra no interior das galáxias, originando novos astros. Uma condensação provoca um aumento da temperatura, da mesma forma que uma rarefacção provoca uma diminuição da mesma. Assim, as estrelas aquecem e o brilho que delas emana é a prova mais viva de que tal acontece. Estes astros tornam-se muito mais quentes do que o resto do universo e a energia por eles libertada garante o aumento da entropia total.

Olhando desta forma para as bonitas estrelas que enfeitam os céus, a segunda lei da termodinâmica parece estar fora de perigo. Far-se-á, então, uma prova final à validade desta lei sublime. Será que a entropia conseguiu garantir o seu aumento após a formação da mais complexa e magnífica estrutura, denominada ser humano? Mais uma vez, a questão terá que ser analisada tendo em conta todo o cosmos e não só uma parte dele. “A vida é capaz de se reproduzir, de utilizar a energia, de evoluir de morrer... A matéria, essa, é inerte, imóvel, incapaz de se reproduzir...” (Reeves et al, 1997, p. 57). A afirmação anterior é suficiente para mostrar como o mundo vivo é uma estrutura muito mais ordenada e complexa do que o mundo material. O Homem, então, esse ser tão inteligente e bem estruturado, corresponde à obra-prima da natureza. No entanto, o mundo vivo surgiu do mundo material, do mundo mais desorganizado. Segundo Reeves et al (1997, p.58), as primeiras moléculas que surgiram logo após o big bang originaram macromoléculas, que por sua vez originaram células e finalmente, estas organizaram-se em organismos. A desorganização deu lugar a estruturas altamente organizadas e pode dizer-se que, ao engravidar e gerar os seres vivos, o universo sofreu uma diminuição de entropia. Novamente, cantar vitória sobre a segunda lei da termodinâmica é pura precipitação. A natureza dotou os seres vivo com um mecanismo não muito diferente do existente na máquina a vapor. Para que consiga viver, qualquer ser tem que consumir alimentos que lhe

fornece a energia para realizar trabalho. À semelhança da máquina a vapor, parte da energia (que neste caso provém dos alimentos) transforma-se em trabalho, traduzido nas mais variadas tarefas do dia-a-dia dos seres vivos. A restante parte dissipa-se para o meio ambiente sob a forma de calor. Esta energia libertada é suficiente para garantir o aumento da entropia do universo, provando que até mesmo a formação de estruturas tão complexas e ordenadas como o ser humano obedeceu à segunda lei da termodinâmica. A curiosa passagem que se segue, apresentada por Holton et al. (1980), refere-se a um documento da UNESCO acerca da poluição, em que se exhibe a relação entre os seres vivos e a entropia.

Alguns cientistas costumavam sentir que a ocorrência, reprodução ou aumento da ordem nos seres vivos, constituíam excepções à segunda lei da termodinâmica. Mas isso deixou de acontecer. Na realidade, a ordem de um sistema vivo pode aumentar mas apenas difundindo energia na vizinhança e convertendo moléculas complexas, conhecidas como alimentos (hidratos de carbono, gorduras), em moléculas simples ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Por exemplo, para que o peso de um ser humano saudável permaneça constante, durante um ano, é preciso consumir cerca de 500 kg (meia tonelada) de alimentos e difundir no ambiente (a partir do homem e da comida) cerca de 500 000 quilocalorias (dois milhões de quilojoules) de energia. A “ordem” do ser humano pode manter-se ou até aumentar, mas a ordem do ambiente diminui muito e muito mais. A manutenção da vida é um processo caro em termos de criação de desordem e ninguém pode compreender todas as implicações da ecologia humana e da poluição do ambiente sem compreender isto primeiro. (p. 98).

Um outro pormenor de extrema importância para a termodinâmica é o conhecimento da permanente evolução do cosmos. Longe vão os tempos em que se olhava para o universo como algo perfeito e imutável. Hoje, sabe-se que a sua evolução continua “rarificando-se e arrefecendo enquanto se vai estruturando.” (Reeves et al, 1997, p.18). A expansão do cosmos, com o conseqüente arrefecimento começou no momento do big bang e continua até hoje. Não se sabe se será sempre assim ou se chegará o dia em que o universo deixa de se expandir e passa a concentrar-se e o arrefecimento dá lugar ao aquecimento. As galáxias aproximar-se-iam em vez de se afastarem e o aumento da temperatura seria tão grande que o universo atingiria o inverso do big bang (big crunch).

A actual expansão do universo livra a humanidade da assustadora morte térmica, agorizada por Lorde Kelvin. O cosmos está longe de ficar à mesma temperatura em toda a parte, a força da gravidade que actua nas estrelas garante o aquecimento destas. Por outro lado, a expansão a que todo o universo está sujeito garante o arrefecimento das outras zonas. Citando Reeves (1990, p.100), “Entre o coração das estrelas – a milhões por vezes milhares de milhões de graus – e o espaço interestelar – a menos de 3° absolutos – existe toda a gama de temperaturas.” Os mais preocupados podem ficar descansados, pois

enquanto a força da gravidade actuar e o universo se expandir, existirão sempre diferenças de temperaturas que permitem a continuação da vida.

Reeves (1990, pp.102, 103), sossega os seus leitores em relação a um outro ponto que condena o universo à morte e que vai ao encontro do presságio do lorde da história. Atendendo a que a entropia é gratuita e imensa, aumentando a todo o instante mesmo sem ninguém pagar por ela, poderá pensar-se que chegará o dia em que o universo não acarreta nem mais uma pinga de entropia. No dia em que a desordem for máxima, todos os acontecimentos cessam, poderão pensar os mais preocupados com o futuro. Reeves (1990, pp.102, 103), explica que este panorama do futuro só faria sentido se o universo não estivesse em expansão e para o explicar, compara o cosmos a uma bacia em que se deita água. Se o universo fosse estático, seria comparável a uma bacia comum que apenas suporta água até um determinado limite. Se o universo tivesse um fim por não suportar mais entropia, seria comparável a uma bacia como a que todos têm em casa e, portanto, a um universo estático. Para descrever a realidade do cosmos, Reeves (1990, p.103), foi mais além na imaginação e descreveu uma bacia cujas paredes seriam deslizantes, aumentando continuamente de volume. Neste recipiente cabe sempre mais água, pode verter-se a quantidade que se entender porque ela nunca fica cheia. É com a bacia imaginária de Reeves que se deve comparar o universo, visto este estar em permanente expansão. Assim, a entropia pode aumentar indefinidamente porque o espaço onde astros e seres coabitam (universo) também aumenta a todo o momento, tal como a bacia de Reeves. Haverá sempre uma forma do calor «cair», tal como na máquina a vapor e os acontecimentos jamais cessarão.

### **5.18. O moribundo demónio continua a suscitar interpretações da segunda lei da termodinâmica**

A personagem principal desta história impõe ao tempo que, espontaneamente, flua do passado para o futuro e não volte para trás. São consequências desta imposição da entropia, a impossibilidade espontânea de alguns acontecimentos, tais como; um café quente tornar-se mais quente, um copo de sumo fresco tornar-se mais fresco, uma pedra subir uma rampa ou a separação do sal da água do mar. Enfim, qualquer processo que

ocorra espontaneamente à escala macroscópica, obedece à desordem microscópica, garantindo que a entropia seja cada vez maior.

Esta importante grandeza que comanda o mundo não poderia deixar de ser alvo de grande admiração e estudo ao longo dos tempos. Como tal, a imponente entropia não ficou aquém dos avanços tecnológicos inerentes ao século XX. Na verdade, a modernização da entropia surgiu graças ao demónio desta história, mas desta vez não foram as suas brincadeiras que ensinaram algo de novo, mas sim a sua morte. A hipótese de que um engraçado e muito esperto demónio pudesse mesmo existir e desmentir tão brilhante conceito, levou a alguns exorcismos por parte de vários cientistas do século XX. As suas diabruras implicavam uma consequência muito grave que era a de desmentir a segunda lei da termodinâmica e a preocupação de alguns cientistas levou-os a mostrar, por diferentes vias, a impossibilidade da existência de tão ágil criatura. Baeyer (1998, pp145-155) regista quatro exorcismos realizados por diferentes físicos e que põem fim às brincadeiras do demónio de Maxwell.

O primeiro exorcismo terá sido realizado no ano de 1914, altura em que o diabrete era um adulto com quarenta e sete anos de idade. A conjuração foi realizada pelo físico polaco Marian von Smoluchowski e o demónio, cuja brincadeira preferida era a de trocar o sentido ao fluxo de energia sob a forma de calor, não resistiu às elevadas temperaturas. Para Smoluchowski, o pequeno diabrete aqueceria tanto que, ao fim de algum tempo o seu corpo começaria a tremer incontrolavelmente. Doente, numa incessante agitação, o demónio não conseguia escolher as moléculas, perdendo a capacidade de provocar estranhas miragens, como o aquecimento de um café até à fervura, espontaneamente. Ou seja, o demónio era incapaz de violar a segunda lei da termodinâmica. Mas de onde provinha a sua caótica agitação, seria apenas uma doença da qual os demónios padeciam quando aqueciam? O demónio tremia pelo mesmo motivo que os grãos de pólen se ondulavam numa bonita dança na lente do microscópio do estupefacto botânico Brown. O diabrete tremia graças ao movimento browniano que se tornava maior à medida que a pequena criatura aquecia. Era empurrado por inúmeras moléculas que o cercavam desigualmente por todos os lados, era como se agora fossem as moléculas a brincar com o diabinho. Claro que se fosse cercado por igual número de moléculas de todos os lados, não tremiria porque o seu minúsculo corpo manter-se-ia em equilíbrio. Para Baeyer (1998, p.146), o diabrete não morreu em vão, uma vez que deixou o seu ensinamento

relativamente ao movimento browniano. Neste tipo de movimento, observado pela primeira vez por Brown, as moléculas fogem ao comportamento médio, distribuindo-se em diferente número e com uma diferente velocidade média em torno das partículas que pretendem «atacar». É esta fuga ao comportamento médio, normalmente designada por flutuação, que garante que as partículas de pólen dançam ou que o demónio trema até mais não conseguir brincar. De outra forma, com todas as moléculas a seguir o mesmo comportamento médio, as partículas de pólen manter-se-iam em equilíbrio ou poderiam ascender acima da água e lá permanecer. Poder-se-ia observar, por exemplo, um “tijolo elevar-se por movimento browniano a uma altura de um segundo andar” e construir-se-ia “uma casa sem pagar a elevação dos materiais” (Perrin, citado por Valente, 1999, pp. 266, 267). Tais fenómenos, prováveis apenas na ausência de flutuações, não parecem estar de acordo com a segunda lei da termodinâmica. Assim, ao morrer, o demónio ensina o quão importantes são as flutuações para a verificação desta lei.

O segundo exorcismo ocorreu no ano de 1929, aos sessenta e dois anos de idade do demónio. O mesmo foi efectuado pelo físico húngaro Leo Szilard num artigo por ele escrito sob o nome de “Sobre a diminuição da entropia (...) através da intervenção de seres inteligentes”. Szilard considerou a existência de vários seres puramente mecânicos, comandados por um patrão, que seria uma criatura inteligente e posicionada num determinado local. O ser inteligente não seria muito diferente do demónio de Maxwell, pois também tinha que colocar o seu pequeno cérebro a trabalhar para efectuar medições das posições, das velocidades e das direcções moleculares, para então poder comandar as operações. O ponto de ataque ao diabo encontrava-se precisamente na sua capacidade de medir, já que segundo (Baeyer, 1998, pp.146,147), Szilard terá concluído que “as medições são acompanhadas necessariamente por uma produção de entropia.” O físico húngaro considerava que, sempre que se media algo, existia uma dissipação de energia. Este dispêndio de energia do demónio compensava a diminuição de entropia criada pelo aumento da ordem molecular. Segundo Baeyer (1998, p.146), este exorcismo não foi bem sucedido, uma vez que Szilard não definiu o significado de medição. Esta lacuna impedia que se conseguisse comprovar matematicamente que o aumento de entropia criado pela medição compensava a diminuição causada pela ordenação molecular. Com esta morte, o diabrete explicava ao Homem que é necessário definir bem qualquer grandeza que se pretenda estudar.

O pobre diabrete não conseguia viver em paz, pois no ano de 1950 um novo exorcismo era publicado. O demónio que em tempos havia sido um petiz brincalhão, contava a gora com a bonita idade de oitenta e três anos. Com esta morte, a segunda lei da termodinâmica actualizava-se face ao avanço tecnológico do século XX. O novo exorcismo foi levado a cabo pelo físico francês Leon Brillouin através de um artigo intitulado “O demónio de Maxwell não pode operar: Informação e Entropia”. Como o título do seu trabalho indica, este físico tentava exterminar o demónio através da informação. Este era um processo mais eficaz do que o de Szilard, que como se referiu anteriormente, apresentava-se incompleto. Por informação entende-se o resultado da medição e a grande vantagem da primeira sobre a segunda é que “enquanto as descrições das medições se referem necessariamente às peças dos aparatos, sendo conseqüentemente complexas (...) os resultados das medições são invariavelmente numéricos e breves.” (Baeyer, 1998, p.149). Esta nova forma de olhar sobre a teoria de Szilard, utilizando o resultado da medição em vez da descrição do seu processo, ficou conhecida por “Teoria da informação”. A informação traduz uma ideia de ganho e de organização, enquanto que a entropia traduz uma ideia de perda e de total desordem. É fácil entender a relação entre ambas, se se pensar que no gigante reino das pequenas moléculas, não há acesso à informação e a falta desta garante que a entropia aumente. No entanto, o demónio, cujas reduzidas dimensões lhe permitiam brincar com moléculas, conseguia informar-se acerca das suas velocidades e posições. Na posse de tão precioso conhecimento, ele tinha o privilégio de arranjar uma estrutura mais ordenada, provocando uma diminuição na entropia. Brillouin levou a cabo o seu exorcismo, virando a atenção sobre o processo desenrolado pelo pequeno diabo para conseguir averiguar acerca das posições moleculares. Ao fazê-lo, o demónio tem que observar e tem que medir, custos energéticos estes que garantem um aumento de entropia suficiente para compensar a sua diminuição, aquando da ordenação molecular. Com este terceiro exorcismo, o demónio abria as portas do mundo moderno, em que a informação impera, à segunda lei da termodinâmica.

A última vez que alguém atentou contra a vida do pobre demónio, era ele um ancião com cento e quinze anos de idade. Aconteceu no ano de 1982 e desta vez à frente do exorcismo encontrava-se Charles Bennett, que trabalhava na IBM. Esta morte surgiu na mesma linha das duas anteriores, estando relacionada com o ganho de informação adquirida pelo demónio, ao vigiar atentamente as moléculas e medir as suas velocidades e



posições. Agora, estava em causa o caderno de apontamentos do pequeno diabo, pois um tão grande número de medições exigia ou uma grande memória ou uma enorme agenda. Tal como refere Baeyer (1998, p.153), uma memória ou um caderno infinito é impossível, uma vez que o universo é finito. Assim, para conseguir anotar todas as informações que obtinha, relativamente ao movimento molecular, o demónio teria obrigatoriamente que apagar as averiguações mais antigas e de que já não necessitava. Ao fazê-lo, o aumento de entropia, capaz de compensar a diminuição criada pelas demoníacas brincadeiras, era garantido. Na base de tal aposta encontrava-se a analogia entre a falta de informação e o aumento de entropia.

Com estas últimas mortes, o demónio permitia a passagem da segunda lei da termodinâmica para um moderno mundo inexistente no tempo de Carnot ou até de Boltzmann, que é o mundo dos computadores. A nova visão de entropia relacionada com a informação foi criada, tendo como plano de fundo, o moderno reino da informática. Os computadores, tal como as máquinas de calcular conseguem processar a informação muito rapidamente, são máquinas que têm a capacidade de fazer contas depressa e bem. Se por um lado são uma benção porque poupam tempo e dores de cabeça, por outro trazem a desgraça porque em muitos casos levam ao esquecimento da tabuada. Este esquecimento das regras mais básicas da matemática é o preço a pagar pela rapidez com que os cálculos são processados. Repare-se que quando se realiza um cálculo numa máquina, como por exemplo,  $10 \times 10$ , estes valores desaparecem, dando lugar ao número 100. As parcelas foram apagadas, assim como os cálculos intermédios que originaram o resultado. Perdeu-se muita informação, pois quem olha para o número 100 não sabe como é que ele surgiu, pode ter sido a partir de várias operações como por exemplo,  $50 + 50$ . Acontece com os computadores o mesmo que acontece com o demónio de Maxwell, não existem memórias infinitas e parte da informação tem que ser apagada. Tal como refere Fiolhais (1992, p.163), um computador deste género é irreversível, não se pode fazer o cálculo em sentido contrário porque as parcelas foram apagadas. Não é impossível pensar num computador reversível, mas este teria que ser demasiadamente lento e um computador que demora muito tempo a processar a informação não interessa a ninguém.

O desaparecimento da informação da memória do computador tem como consequência a dissipação de energia, o que garante que também estas rápidas máquinas obedecem à segunda lei da termodinâmica. Este foi mais um serviço prestado pelo demónio

de Maxwell ao Homem – A relação entre a segunda lei da termodinâmica e o actual mundo dos computadores.

Afinal, os argumentos destes homens do século XX que pretendiam acabar de vez com as brincadeiras do demónio de Maxwell, serviram para suscitar novas interpretações da segunda lei da termodinâmica. Proporcionaram uma maior aproximação entre o movimento browniano e a segunda lei da termodinâmica, através da compreensão de que as flutuações das moléculas ao comportamento médio são responsáveis por ambos. Por um lado, a fuga das moléculas ao comportamento médio permite a dança dos grãos de pólen. Por outro, diminui a probabilidade de que alguns fenómenos, como a ascensão espontânea de um tijolo ou as brincadeiras do pequeno demónio ocorram, garantindo a validade da segunda lei da termodinâmica. Os mesmos argumentos permitiram, ainda, a aproximação entre o conceito de entropia que se começou a desenvolver no século XVIII e a avançada tecnologia do século XX.

Resta concordar com a frase de Bragg de que, “o importante em ciência não é tanto obter novos feitos mas descobrir novas formas de pensar sobre eles”. A prova são os contributos de Maxwell, de Boltzmann e de tantos outros que tiveram a coragem de repensar sobre a segunda lei da termodinâmica num terreno desconhecido, invisível e incerto, como é o dos átomos.

### 5.19. O relógio de Praga

A monumental cidade de Praga ostenta um relógio tão particular que, segundo reza a história, o mestre que o construiu foi mandado cegar como garantia da unicidade de tão magnífica obra de arte<sup>10</sup>. Sevcenko<sup>11</sup> (1994), ao longo da exposição de um conto tcheco, dá a conhecer o cunho deste relógio e que o torna tão especial e encantador.

Como todos sabem, Praga possui o mais magnífico relógio do mundo. Ele fica na praça central, suspenso no frontão do monumental Prédio da Antiga Prefeitura. Está muito longe de ser apenas um relógio (...) quando marca as horas (...) um mundo de miniaturas são postas em movimento, compondo uma dança (...), ao ritmo harmonioso do mais fantástico repique de sinos e gongos. É uma autêntica festa de criaturas encantadas que ocorre, arrastando a população concentrada na praça de um estado de transe boquiaberto até ao

<sup>10</sup> Ideia retirada de [http://www.praguehotel.net/portugues/praga\\_pt.htm](http://www.praguehotel.net/portugues/praga_pt.htm)

<sup>11</sup> Citação retirada de <http://www.adusp.org.br/revista/01/r01a01.pdf>

clímax da euforia. Há um galo amarelo e rubro que canta um cocorocó em cadência crescente, culminando num longo grito esganiçado e cómico. Sob o mostrador roda um carrossel com os doze apóstolos, vestindo roupas e exercendo actividades que lembram os vários officios e classes de cidadãos... (pp. 6, 7).

A actividade do relógio de Praga sugere que a organização aumenta, neste recanto da cidade, a cada hora que passa. Lembre-se, porém, que por detrás do movimento do galo e dos apóstolos está a fria engrenagem do relógio. Esta é composta por um peso que cai, ao mesmo tempo que dissipa uma grande quantidade de energia. O relógio de Praga, além de proporcionar belas visões, também consegue ilustrar o funcionamento do mundo. Por detrás da organização das figuras, encontra-se uma desorganização. Da mesma forma que por detrás de qualquer acontecimento que leva à organização dos átomos e à diminuição da entropia, encontra-se uma desorganização, através da dissipação de energia. Assim, este magnífico relógio é uma alegoria da segunda lei da termodinâmica. Citando Atkins (2003) sobre o funcionamento do relógio de Praga:

... a queda de um peso activa uma complexa sucessão de acontecimentos. No conjunto, há uma dispersão de energia, um aumento da entropia, à medida que cai o peso e a fricção dissipa à volta energia sob a forma de calor. No entanto, (...) a sua queda gera uma sensação de movimento organizado (...) Se nos esquecêssemos da corda do relógio, poderíamos concluir que todos esses acontecimentos organizados estavam a ocorrer de forma natural, incluindo os actos dos apóstolos. Mas (...) sabemos que há um mecanismo do relógio activado por um peso que cai de forma natural.

O relógio de Praga é uma alegoria do funcionamento da Segunda Lei. Também no mundo que nos rodeia podem ocorrer acontecimentos complicados, tais como (...), o crescimento de uma árvore ou a formulação de uma opinião, parecendo que em consequência se reduz a desordem, estes acontecimentos não se produzem nunca sem que tenham sido activados de alguma forma. Este estímulo tem como resultado uma produção ainda maior de desordem noutra lugar. (p. 147).

Quem visitar Praga não deverá deixar de procurar o relógio que além de transmitir alegria e beleza a quem o admira, também retrata o funcionamento do mundo.

*De hora a hora, a magia reina na praça central da bela cidade de Praga. Há um relógio que repica e mostra as horas, a posição do Sol e as fases da Lua. Ao mesmo tempo, doze apóstolos e outras pequenas figuras organizam-se em movimentos harmoniosos. Os apóstolos movimentam-se ao sabor de uma engrenagem formada pela parafernália de rodas e pesos que se move desordenadamente. Com os seus admiráveis movimentos, o relógio de Praga é uma alegoria da segunda lei da termodinâmica.*

# **Considerações**

## **Finais**



## De uma ingénua questão a $S = k \log W$

Felizmente para a humanidade, a lei que comanda o sentido dos acontecimentos teve sempre alguém que preterisse o empreendimento de novos feitos, em função de um novo olhar sobre ela. Esta foi a única forma da entropia enfrentar os óbvios obstáculos que sempre se lhe impuseram desde a perfuração dos canhões do conde, passando pela máquina a vapor até ao invisível mundo dos átomos. Para compreender tão magnífico conceito, o Homem teve que se desligar de teorias como a do calórico para se apegar a novos conceitos como o da energia. Esta passagem foi difícil e lenta, já que para a levar a cabo seria necessário abdicar de algo tão concreto como é o mundo material para passar a enfrentar um conceito muito abstracto, como é o da energia.

O conde de Rumford foi a primeira personagem a entrar em cena, nesta história. No laboratório engendrado na fábrica de canhões, deparava-se com uma questão cuja aparente ingenuidade esconde uma profunda complexidade: o que é o calor? (ver p. 86). Para esta, encontrou uma resposta, infelizmente mal fundamentada, embora próxima da que foi retomada um século depois. Se até aqui o calor era visto como uma substância material, assim continuou porque o conde não encontrou argumentos suficientes para destronar uma teoria tão interiorizada e tão próxima da realidade humana. Rumford havia percebido que o «calor» /energia interna não era uma substância, mas que se relacionava com o movimento de algo. No entanto, mais de cem anos passaram até que Maxwell e Boltzmann pudessem finalmente fazer justiça ao ilustre conde. Eles apresentaram os válidos argumentos que faltaram a este último; o «calor» /energia interna relacionava-se com o movimento das pequenas partículas que constituem os corpos.

Embora guiado pela errada teoria do calórico, o engenheiro Carnot, mesmo sem saber, fazia nascer a entropia. Talvez se possa até dizer que o local do nascimento da entropia tenha sido a máquina a vapor que inspirava o engenheiro francês nas suas admiráveis «experiências pensadas». Ao entender que o trabalho era gerado a partir da «queda» do calor, Carnot ditava que a dissipação de energia era obrigatória, sentença onde se esconde a entropia.

Após a comunicação de Mayer e Joule de que o calor e o trabalho eram convertíveis um no outro, lorde Kelvin entrou em cena. William Thomson (lorde Kelvin) era um defensor de Carnot e como tal, estava convicto de que o efeito mecânico (trabalho) deveria

ser gerado a partir do transporte de calor. No entanto, começava a ficar confuso: “Numa máquina perfeita, uma quantidade de “agente térmico” originava uma quantidade igual de efeito mecânico. Por outro lado, numa máquina «menos do que perfeita», uma dada quantidade de “agente térmico” originava uma quantidade menor de efeito mecânico.” Sabendo que todas as máquinas reais eram «menos do que perfeitas», “Thomson não entendia o que acontecia à quantidade de efeito mecânico «perdido», correspondente à diferença entre o efeito mecânico que poderia ser produzido numa máquina ideal e o que era realmente produzido numa máquina real.” (ver p. 185). Nenhuma «energia» poderia ser perdida e por isso, Kelvin não compreendia para onde ia aquela quantidade de «efeito mecânico». Afinal, segundo Carnot, o efeito mecânico era gerado a partir da «queda» do «calor», e este último mantinha o seu valor constante. Deveria, antes, juntar-se à teoria do seu amigo Joule, de que o calor e o trabalho eram convertíveis? De qualquer forma, nenhuma das teorias, por si só, explicava onde ficava o «efeito mecânico perdido»!

Clausius conseguiu dar resposta à questão do lorde Kelvin. Afinal, não havia que optar por uma das teses anteriores, uma vez que ambas eram válidas. Parte do «calor» transformava-se em trabalho e parte passava para a fonte fria. Uma vez que apenas uma parcela do «calor» era utilizada para gerar trabalho, estava explicado o motivo da quantidade de efeito mecânico não ser igual à do «calor» que o originava (ver p.187). Assim, em qualquer processo espontâneo, o calor deveria fluir do quente para o frio.

Com os estudos de Clausius, um novo conceito ganhou nome, o inconfundível nome de entropia. Clausius representou-o pela letra S e definiu-o como  $S = Q / T$ . Depois de dar a conhecer a sua definição de entropia, este cientista anunciou que “O calor sobre a temperatura absoluta é constante nos processos reversíveis e aumenta nos irreversíveis.” (ver p. 199). Uma vez que os processos reais são irreversíveis, a entropia está sempre a aumentar.

Convicto de que a parte do «calor» que fluía para a fonte fria deixaria de estar ao alcance do Homem para sempre, Lorde Kelvin adivinhou uma morte térmica para o universo. Este terrível presságio estava anunciado para o dia em que todo o «calor» tivesse fluído para a «fonte fria». Nesta altura, todos os corpos se encontrariam à mesma temperatura e, não havendo mais hipótese do «calor» passar do quente para o frio, não haveria mais geração de trabalho mecânico. (pp. 194, 195).

A entropia começou a espreitar na fábrica de canhões, nasceu na máquina a vapor, foi baptizada por Clausius e quantificada de forma mais universal por Boltzmann. Quando a palavra entropia surgiu, a 2ª lei da termodinâmica, associada à formulação qualitativa de que “o calor fluía naturalmente do quente para o frio” tornou-se mais simples. Tomou, então, a seguinte forma; “A entropia do universo tende para um máximo.”

Maxwell alertou para o facto da segunda lei da termodinâmica ser diferente das outras e ao mesmo tempo tão especial. Contrariamente às leis dinâmicas, a «certeza» associada à 2ª lei da termodinâmica perde terreno, dando espaço ao surgimento, em Física, de leis probabilísticas. Foi através de um espantoso diabo que Maxwell interpretou a diferente natureza desta lei. O pequeno demónio de Maxwell desempenhou um dos principais papeis no «Romance da Entropia» e as suas diabruras haverão de suscitar o interesse dos cientistas ao longo dos tempos. Afinal, uma pedra poderá subir uma colina espontaneamente. Basta esperar algo tempo! Ludwig Boltzmann calculou que “se todas as estrelas do céu tivessem o mesmo número de planetas do Sol, e se cada um deste planetas tivesse a mesma população que a Terra, e se cada uma dessas pessoas vivesse  $10^{12}$  anos, o número de segundos dos seus tempos de vida combinados seria muito menor do que o enorme número que ele calculou para...” o tempo que alguém teria que esperar para assistir a tão estranho acontecimento. (ver p. 239).

A última personagem a entrar em cena foi Boltzmann. Este físico austríaco sugeriu uma definição mais universal para o admirável conceito de entropia. Este passava a ser sinónimo de desordem dos átomos e das moléculas. Matematicamente, o conceito de entropia passava a ter a formulação,  $S = K \log W$ .

Apesar das diferentes visões sobre a 2ª lei da termodinâmica, há que notar que todos os seus enunciados são equivalentes. Segundo lorde Kelvin, ao ocorrer um acontecimento, uma parte da energia dispersava-se. Embora não desaparecesse do mundo material, jamais poderia voltar a ser utilizada pelo Homem. (ver p. 194). Para Clausius, o calor fluiria, espontaneamente, do quente para o frio, como resultado, a entropia aumentaria em qualquer processo. É fácil verificar como estas duas formas de enunciar a 2ª lei da termodinâmica são equivalentes: A dissipação de energia alertada por lorde Kelvin ocorre porque esta flui para a fonte fria. Como esta fonte fria existe, a energia sob a forma de calor flui espontaneamente do quente para o frio, de acordo com Clausius. Quanto à definição de entropia deste último e de Boltzmann, também é fácil mostrar a sua equivalência. Foi o que



tentámos exhibir na nossa narrativa. As analogias desempenharam um espantoso papel no «Romance da Entropia», destacando-se a analogia de Carnot entre o calórico e a queda de água (ver p. 140). Optámos, então, por uma analogia de Atkins (2003) para mostrar a equivalência do conceito de entropia segundo Clausius e segundo Boltzmann:

A analogia que gosto de utilizar para demonstrar esta ligação é a do efeito de um estrondo numa rua barulhenta ou numa biblioteca silenciosa. Um estrondo é como uma transferência desordenada de energia, muito semelhante à energia transferida sob a forma de calor. Deve ser fácil aceitar que quanto mais forte é o estrondo, maior é a desordem que se introduz na rua ou na biblioteca. Esta é a razão principal pela qual a «energia transferida sob a forma de calor» aparece no numerador da fórmula de Clausius, já que quanto maior for a energia transferida sob a forma de calor, maior é o aumento da desordem e, por fim, maior é o aumento da entropia. A presença da temperatura no denominador também se encaixa nesta analogia, pela sua implicação de que para uma dada transferência de calor a entropia aumenta mais se a temperatura for baixa do que se for elevada. Um objecto frio, que possui pouco movimento térmico, corresponde à biblioteca silenciosa. Um estrondo repentino introduzirá um grande tumulto, que corresponde a um aumento grande de entropia. Um objecto quente, que já possui muito movimento térmico, corresponde à rua barulhenta. Então, um estrondo nessa rua igual ao da biblioteca tem relativamente pouco efeito e o aumento de entropia é pequeno. (pp. 144, 145).

Ao longo da nossa narrativa, pretendemos exhibir os avanços e os retrocessos no desenvolvimento da compreensão do que é o «calor» /energia interna. Citando Callen (1960):

A história do conceito de calor como uma forma de transferência de energia é inigualável como um caso de estudo no desenvolvimento tortuoso da teoria científica, como uma ilustração da quase insuperável inércia apresentada pela doutrina física aceite, e como um soberbo conto da ingenuidade humana aplicada a um problema subtil e abstracto.

A grande questão do conde de Rumford “O que é o calor?” deu o mote para o desenrolar do «Romance da Entropia». Ao longo de toda a narrativa, as «personagens» que nela participam tentaram buscar respostas para esta questão. Nestas respostas delineava-se a visão do calor como energia interna e não como uma forma de transferir energia. Parece-nos importante deixar clara a distinção entre as seguintes visões do calor: “... o movimento de partículas existe, e o calor é a medida da sua *vis viva*” (ver p. 188) e “o calor é a transferência de energia que ocorre entre sistemas a diferentes temperaturas.” (A. Costa, A. M. Costa, Caeiro, e Moisão (2003, p.35). Tendo nós insistido no século XIX e tendo este

século sido muito rico na utilização de analogias no desenvolvimento do conhecimento científico e, nomeadamente, no desenvolvimento no âmbito do desenvolvimento da termodinâmica, gostaríamos de finalizar colocando em evidência a diferenciação conceptual entre energia interna, calor e trabalho, recorrendo a uma analogia utilizada num livro histórico do ensino da termodinâmica (Callen, 1960):

Um certo senhor possui um pequeno lago, alimentado por um pequeno riacho e drenado por outro. O lago também recebe água de uma chuva ocasional e perde-a por evaporação, que nós consideramos como “chuva negativa”. Nesta analogia pretendemos considerar o lago como o nosso sistema, a água nele contida como a energia interna, a água transferida pelos riachos como o trabalho e a água transferida pela chuva como o calor.

A primeira coisa a notar é que nenhuma análise do lago em qualquer momento pode indicar que quantidade de água nele contida foi conseguida através dos riachos e que quantidade foi conseguida como resultado da chuva. O termo chuva refere-se apenas a um método de transferência de *água*.

Suponhamos que o dono do lago deseja medir a quantidade de água nele contida. Ele pode comprar um medidor de fluxo para inserir nos riachos, e com este medidor de fluxo ele pode medir a quantidade de água dos riachos que entra e que sai do lago. Mas ele não pode comprar um medidor de chuva. No entanto, ele pode atirar uma lona sobre o lago, tapando-o com uma parede impermeável à chuva (uma parede adiabática). Por conseguinte o dono do lago coloca uma vara vertical dentro do lago, cobre-o com a sua lona, e insere os seus medidores de fluxo nos riachos. Ao impedir a passagem da água de um riacho e depois do outro, ele faz variar o nível no lago à sua vontade e ao consultar os seus medidores de fluxo ele é capaz de calibrar o nível do lago, tal como é lido na vara vertical, com o conteúdo total de água ( $U$ ). Como tal, ao desenvolver estes processos no sistema fechado pela parede adiabática, ele é capaz de medir o conteúdo total de água de qualquer estado do seu lago.

O nosso prestável dono do lago remove agora a sua lona de modo a permitir que a chuva tal como a água dos riachos entrem e saiam do lago. Pede-se-lhe então para averiguar a quantidade de chuva que entra no seu lago durante um determinado dia. Ele procede de forma simples: Lê a diferença do conteúdo da água a partir da sua vara vertical, e a partir desta leitura ele deduz o fluxo total da água do riacho, tal como registado no seu medidor de fluxo. A diferença é uma medida quantitativa da chuva. A rigorosa analogia de cada um destes procedimentos com os seus equivalentes da termodinâmica é evidente. (pp. 19, 20).

A energia interna (água do lago) corresponde “à energia associada às moléculas estruturais, existente nos seus movimentos permanentes de translação, rotação ou oscilação e nas respectivas interacções.” (Duarte-Ramos, 1986, p.179). O trabalho (água dos riachos) e o calor (água da chuva) correspondem a formas de transferir energia, que fazem variar a energia interna do sistema. A energia interna de um sistema não pode ser calculada de forma absoluta, obtendo-se apenas a sua variação, correspondente à passagem do sistema de um estado a outro. A analogia de Callen coloca em evidência o cálculo da quantidade de energia transferida para um sistema sob a forma de trabalho e sob a forma de calor. Com a ajuda de uma parede adiabática (não permite trocas de calor), entre o sistema e o seu exterior permitem-se apenas trocas de energia sob a forma de trabalho. A variação da

energia que é transferida para o sistema e que é transferida do sistema para o exterior sob a forma de trabalho (água dos riachos) é igual à variação da energia interna do sistema. Esta variação de trabalho pode ser avaliada através de cálculos matemáticos (medidores de fluxo). A variação de energia interna do sistema deverá igualar, pela 1ª lei da termodinâmica, a variação da energia que é transferida para o sistema sob a forma de trabalho e sob a forma de calor. Assim, retirando a parede adiabática, pode medir-se a quantidade de energia que é transferida para o sistema sob a forma de calor (água da chuva). Basta subtrair à variação da energia interna do sistema (água do lago), a energia que foi transferida sob a forma de trabalho (água do riacho).

## **Do romance do conde de Rumford à fruição de Planck e Perrin**

Embora esta narrativa seja muito limitada, já que não se trataram contributos tão importantes como por exemplo o de Gibbs<sup>1</sup>, permitiu-nos vivenciar as fases de “romance”, “precisão” e “generalização” (ver pp. 70-72). Com efeito, com o conde de Rumford começámos a contactar com ligações insuspeitadas e com Perrin e Planck podemos fruir o valor do conhecimento construído.

Ao longo do século XX, muitos foram os que se sentiram atraídos pelos encantos desta lei de natureza diferente das outras. Apesar de não se analisar em detalhe os estudos

---

<sup>1</sup> Gibbs (1839-1903), professor de Maxwell e de grande influência neste último na clarificação do conceito de entropia a nível macroscópico, associado à energia indisponível. Apesar do nome Gibbs não corresponder a nenhuma das personagens do «Romance da Entropia», a sua importância no campo da termodinâmica deve ser sublinhada. Segundo Smith (1998, pp. 260, 261), o professor Gibbs interessou-se pelos trabalhos de Clausius acerca da entropia, analisou-os e redigiu os seus próprios artigos. Nestes, surgiu a formulação matemática das leis da termodinâmica, apresentada numa conhecida expressão dos estudantes de termodinâmica e que toma a seguinte forma:

$$dU = TdS - PdV, \text{ onde:}$$

**U** representa a **energia interna**; **TdS** corresponde à transferência de energia sob a forma de **calor** para o sistema, deduzida a partir da formulação matemática da entropia de Clausius e **PdV** corresponde à energia transferida sob a forma de **trabalho** para o sistema, a pressão constante e volume variável. A equação mostra que a energia interna de um sistema pode variar através da transferência de energia sob a forma de trabalho ou da transferência de energia sob a forma de calor. Note-se, porém, que a mesma é aplicada apenas a fenómenos reversíveis, pois apenas nestes, a entropia permanece constante e  $TdS = dQ$ . Os processos espontâneos são irreversíveis e, portanto, a entropia aumenta, sendo que,  $TdS > Q$ .

de nenhum destes cientistas, far-se-á, em seguida, um breve apontamento às interessantes considerações de Perrin (1870-1942) e de Planck (1858-1947) sobre a segunda lei da termodinâmica.

Jean Perrin, um cientista francês a quem já se fez referência anteriormente, a propósito dos estudos sobre o movimento browniano, foi um dos cientistas do século XX que se debruçou sobre a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica. O interesse de Perrin por esta lei surgiu na sequência dos seus estudos sobre a «dança dos grãos de pólen» que lhe valeu o prémio Nobel da Física, no ano de 1926. O movimento browniano doava, assim, dois importantes contributos aos físicos. “... para além de «materializar» as hipóteses moleculares”, proporcionava “o contacto com fenómenos que têm uma natureza diferente dos fenómenos mecânicos- os fenómenos estatísticos” (Valente, 1999, p. 426).

Dotados do movimento browniano, os átomos e as moléculas deveriam mover-se caoticamente, rodeando uma partícula, como um grão de pólen, em diferente número e com diferentes velocidades. Este é o comportamento molecular mais esperado e, como tal, mais provável. No entanto, apesar da mínima probabilidade, as pequenas «unidades estruturais da matéria» poder-se-iam organizar de forma a movimentarem-se todas dotadas de um mesmo comportamento médio. Assim, o grão de pólen seria ladeado por um igual número de moléculas que se agitavam com uma mesma velocidade média. As consequências seriam várias, tal como foi exemplificado aquando da descrição da primeira tentativa de exorcismo ao demónio (ver pp. 253, 254). Quanto ao grão, infelizmente não exibiria o seu belo movimento, mantendo-se em equilíbrio ou, conseguindo elevar-se acima da água. Foi neste sentido, através da provável dança dos grãos de pólen que Perrin se aproximou dos fenómenos estatísticos e, claro, da segunda lei da termodinâmica. O entusiasmado Perrin, citado por Valente (1999), expôs o assunto da seguinte forma:

Eis aqui pois uma agitação que se produz indefinidamente sem causa exterior. É claro que esta agitação não contradiz o princípio da conservação da energia. Assegura que o aumento da velocidade de um grão seja acompanhado de um arrefecimento do fluido na sua vizinhança imediata, da mesma forma que toda a diminuição de velocidade é acompanhada de um aquecimento local. Apercebemo-nos simplesmente que *o equilíbrio térmico, não é assim, mais do que um equilíbrio estatístico.*

Mas devemos observar (Gouy, 1988), que o movimento browniano, na realidade indiscutível, confere a certeza experimental às conclusões (tiradas das hipóteses da agitação molecular) de Maxwell, Gibbs e Boltzmann, retirando ao *princípio de Carnot* o lugar de verdade absoluta, reduzindo-o a exprimir somente uma alta probabilidade.

Pode dizer-se que este princípio consiste em afirmar que, num meio em equilíbrio térmico, não pode existir um dispositivo que autorize a transformação em trabalho da energia calorífica do meio. Uma tal máquina permitindo, por exemplo, o movimento de um navio através do arrefecimento da água do mar, e, devido à imensidão das reservas, teria para nós

praticamente as mesmas vantagens do que uma máquina permitindo o «movimento perpétuo», isto é o mesmo que dizer que produzimos trabalho sem nenhuma mudança, sem repercussões exteriores. Mas é precisamente este movimento perpétuo de segunda espécie que foi declarado impossível.

Basta observar, dentro de água em equilíbrio térmico, uma partícula mais densa do que a água para a ver em certos instantes elevar-se espontaneamente transformando assim em trabalho uma parte do calor do meio ambiente. Se nós fossemos do tamanho das bactérias, poderíamos então fixar ao nível assim atingido o grão de poeira sem ter feito o esforço do elevar e, por exemplo construir uma casa sem pagar a elevação dos materiais.

Mas, quanto maior for a partícula a elevar, mais raro é o acaso da agitação molecular a elevar a uma dada altura (...) Imaginemos um tijolo de 1 quilograma suspenso no ar por uma corda. Ele deve possuir um movimento browniano, extraordinariamente fraco. Com efeito nós estaremos em breve em condições de calcular o tempo que é preciso esperar para que haja, uma hipótese em duas de ver o tijolo elevar-se por movimento browniano a uma altura de um segundo andar. Encontraremos um tempo comparado com o qual a duração dos períodos geológicos e talvez mesmo a do nosso universo seriam desprezáveis (...) É o mesmo que dizer, como o bom senso indica, que não será prudente contar com o movimento browniano para elevar os tijolos que deveriam servir para a construção de uma casa. (pp. 426, 427)

A elevação do tijolo do exemplo de Perrin serve para ilustrar, mais uma vez, a alta improbabilidade de que todos os átomos se organizem de forma a contrariar a segunda lei da termodinâmica. Alguns dos átomos que constituem o tijolo poder-se-ão organizar, momentaneamente, na mesma direcção e sentido. No entanto, a probabilidade de que todos se organizem desta forma, permitindo que o tijolo se eleve espontaneamente é ínfima.

Estes Homens do século XX tinham o privilégio de poder desfrutar da leitura dos estudos sobre a segunda lei da termodinâmica já efectuados por vários cientistas, entre os quais se contam as «personagens» do «Romance da Entropia». Max Planck (1858-1947), cientista alemão, à semelhança de Perrin, teve o privilégio de vir a fruir (utilizando o termo de Whitehead), o valor da natureza estatística da segunda lei da termodinâmica. Esta fruição está patente nalguns textos de Planck e de Perrin. Eles mostram a consciência de se ter tocado noutra tipo de comportamento da natureza, de tal forma que Planck vem afirmar uma unificação dos fenómenos, aspecto que ele perseguiu sem descanso, em fenómenos reversíveis (mecânicos) e irreversíveis. Veja-se a forma como Planck, citado por Valente (1999), abordava a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica:

Smoluchowski conseguiu com efeito formular uma teoria estatística do movimento browniano do qual se podem deduzir as leis que regem a densidade de distribuição das partículas, as suas velocidades, o valor dos seus percursos e até o valor das suas rotações. Estas leis foram brilhantemente verificadas pela experiência, graças sobretudo aos trabalhos de Jean Perrin.

Para todos os físicos que crêem no valor do método indutivo, não há qualquer dúvida: a matéria possui uma estrutura atómica. O calor é idêntico aos movimentos das moléculas e a condutibilidade térmica, como todos os outros fenómenos irreversíveis obedece então às leis estatísticas, isto é às leis da probabilidade e não às leis da dinâmica. Na verdade, é

extremamente difícil fazer uma ideia, mesmo aproximada, da incrível pequenez da probabilidade que existe, mesmo por um curto instante, do calor seguir a direcção inversa da habitual, ao passar, por exemplo, da água fria para o ferro quente. (p. 427).

Planck sublinhava que os fenómenos irreversíveis, como a transferência de energia como calor do «quente» para o «frio» eram associados a leis baseadas na probabilidade. Todas as outras leis que não contavam com o acaso, eram denominadas por este físico de leis dinâmicas. No excerto que se segue, Planck, citado por Valente (1999), estabelece relações que pretendem realçar a alta improbabilidade de certos acontecimentos.

Há os casos onde, mesmo em física, é conveniente tomar como séria consideração as probabilidades extremamente mínimas. Uma fábrica de pólvora pode explodir um belo dia sem que nenhuma causa exterior possa ser atribuída ao acidente. A uma inflamação deste género, dita espontânea, como se poderá atribuir outra causa que não seja a seguinte: uma acumulação de choques tão extremamente improvável entre moléculas susceptíveis de reagir quimicamente umas sobre as outras no sentido fatal. No entanto esta acumulação é facilmente regida pelas leis puramente estatísticas. Por exemplo, até que ponto é que nós compreendemos a necessidade de ser prudente ao empregar palavras como «certo» ou «indubitável», mesmo numa ciência exacta. Podemos assim apreciar por aqui o quão modesto é por vezes o alcance das leis experimentais.

Assim sendo, pelas razões retiradas, tanto da teoria como da prática, é indispensável estabelecer uma distinção fundamental entre as leis obrigatórias e aquelas que são simplesmente prováveis. Todas as vezes que alguém esteja na presença de uma lei, a primeira coisa a perguntar é a seguinte: esta lei é uma lei estatística ou uma lei dinâmica? (p. 428, o sublinhado é da nossa responsabilidade)

Com base na diferente natureza, Planck, citado por Valente (1999), faz a grande distinção entre a primeira e a segunda lei da termodinâmica.

Tal como o princípio da conservação da energia ocupa o primeiro lugar entre as leis dinâmicas, do mesmo modo o segundo princípio é o mais importante entre as leis estatísticas. (p. 430).

## **A recompensa de um estudo histórico**

Na primeira parte do trabalho tentou realçar-se a importância do uso da História da Ciência no ensino. Antes do estudo histórico efectuado que culminou com a escrita do «Romance da Entropia» já existia a convicção de que a História da Ciência traria vários benefícios ao nível da formação. Após a construção de tal narrativa histórica, sentimos quão a nossa relação com o conhecimento científico saiu revitalizada. O estudo histórico levado a cabo forneceu uma cultura sobre as leis da termodinâmica que, de outra forma jamais se adquiriria e as vantagens associadas a tal cultura são grandes. Vivemos as etapas de Whitehead já descritas (“romance”, “precisão” e “generalização”) e desenvolvemos um

sentido íntimo do valor das ideias. Uma consciência do valor das ideias é imprescindível para que se possa tratar alguns aspectos sobre a natureza do conhecimento científico e da ciência. Só dessa forma estaremos em condições para exhibir o poder e os limites dessas ideias- aspectos fulcrais numa educação para a cidadania. O acarinhamento por ideias que eram inicialmente estranhas para nós, no exercício da coleiatura dos textos históricos poderá, também, preparar-nos para um contacto mais rico do ponto de vista cognitivo e afectivo das ideias dos alunos.

Esta mesma confiança, construída sobre uma nova cultura, permite ainda promover a discussão sobre vários assuntos, na sala de aula. Saliente-se, para o efeito, a introdução das relações ciência-tecnologia-sociedade (CTS) ao longo da história que esta narrativa permite (ver aspectos relativos ao desenvolvimento da máquina a vapor). Estas discussões parecem ser tão aconselháveis ao ensino quanto pouco acessíveis a quem não investiga. Em síntese, novas estratégias que visam a motivação dos alunos e o conseqüente sucesso no ensino das leis da termodinâmica ganham agora um novo sentido.

Para além das vantagens anteriormente referidas, a investigação histórica levada a cabo também permitiu atingir um novo estado, diferente do que era vivido até aqui. Após longos anos de um exercício mental habituado a encadeamentos lógicos, desfruta-se o prazer de estabelecer relações e admirar, mais do que nunca, a beleza dos conceitos físicos, nomeadamente, do conceito de entropia. Este novo estado – o estado de generalização (ver pp.71) serve como mais um aliado para criar uma nova atmosfera na sala de aula. Será agora mais fácil criar o estado de romance de Whitehead, que tão bem é descrito pelo autor, citado por Valente (1999) na seguinte analogia:

“Crusoe era um mero homem, a areia era mera areia, a pegada era uma mera pegada, e a ilha uma mera ilha, e a Europa era o movimentado mundo dos homens. Mas a súbita percepção das meia-reveladas e meia-escondidas possibilidades relacionando Crusoe e a areia e a pegada e a solitária ilha afastada da Europa constitui romance.” (p.57).

Esta nova cultura permite ainda uma visão mais crítica acerca do modo como os programas curriculares estão construídos e do modo como são abordados, nos manuais escolares, os conteúdos sobre os quais se investigou. Está-se agora mais desperto para distinguir abordagens interessantes e rigorosas de outras centradas em formas com pouco significado e relevância. Um maior conhecimento sobre um determinado conceito permite chamar a atenção para pormenores que surjam nos manuais e que possam mesmo constituir pseudohistórias (termo de Allchin, ver pp. 63, 64). Tal, coaduna-se com as estratégias de



ensino tratadas na primeira parte, na medida em que poderá gerar a discussão na sala de aula, alertando para detalhes menos rigorosos. Como forma de ilustrar este novo olhar sobre os manuais escolares chama-se a atenção para um detalhe presente num dos manuais analisados. Considera-se que o descrito nestas páginas do manual corresponde a uma pseudohistória, o que é marcado no seguinte parágrafo:

Foi Joule quem primeiro realizou a experiência que a seguir descrevemos. Dentro de um vaso calorimétrico, que é um recipiente cujas paredes são isoladoras térmicas, contendo água, monta-se um conjunto de pás que podem girar juntamente com um eixo ao qual estão ligadas. O conjunto gira dentro do recipiente quando um corpo cai preso a um fio.

Neste primeiro parágrafo realça-se o facto de Joule não ter utilizado nenhum vaso calorimétrico para montar o seu aparato experimental. Ao cabo de várias experiências que já havia realizado, o objectivo de Joule era o de montar um aparato experimental mais simples do que os anteriores. Apesar de, por essa altura, já se realizarem experiências com base na calorimetria, Joule insistiu em utilizar um recipiente não calorimétrico, sujeito a trocas de energia com o exterior. Chama-se a atenção para a diferença entre as seguintes figuras:

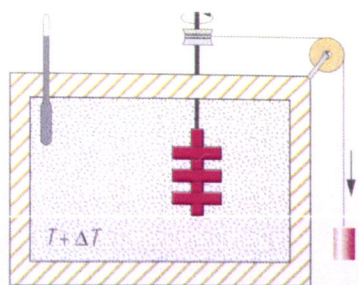


Figura 22- Vaso calorimétrico<sup>2</sup>

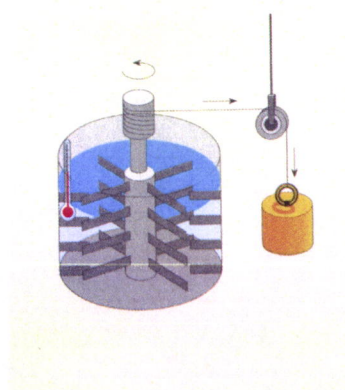


Figura 23- Recipiente não calorimétrico<sup>3</sup>

Enquanto que na primeira figura a água sujeita a agitação se encontra num vaso calorimétrico, na segunda figura a água está contida num recipiente não calorimétrico. A partir do momento em que se pretende retratar o trabalho de alguém deve sempre apostar-se no rigor e não no que parece ser mais adequado. Claro que ao utilizar um recipiente não

<sup>2</sup> Imagem retirada do manual escolar de Ventura et al. (2003, p. 92)

<sup>3</sup> Imagem retirada do manual escolar de Bello e Caldeira (2003, p.121)



calorimétrico, Joule enfrentava muito mais dificuldades em medir a variação de temperatura da água do que se tivesse utilizado um vaso calorimétrico. No entanto, o cientista optou pelo primeiro e isso deve ter sido muito importante para ele. Recorde-se que a sua experiência representa o culminar de uma intensa actividade de investigação. A simplicidade do dispositivo terá tido algo a ver com uma estética subjacente ao seu desenvolvimento experimental.

Um segundo parágrafo do mesmo manual e, ainda referente ao mesmo assunto, reforça a convicção de que se trata de uma pseudohistória. Leia-se, então, o parágrafo em causa:

À medida que o corpo cai, a água exerce forças sobre as pás que rodam. Enquanto as pás rodam, estas forças realizam trabalho dissipativo. A água vai aquecendo dentro do vaso calorimétrico conforme se pode ver no termómetro. O aumento de energia interna é igual ao trabalho dissipativo. Esta famosa experiência permitiu estabelecer a equivalência entre calor e trabalho: para aquecer o líquido dentro do recipiente tanto se podia usar calor como trabalho. Ambos os processos conduziam ao aumento da energia interna.

Neste segundo parágrafo há a sublinhar essencialmente a falta de clareza no que diz respeito à distinção entre termos actuais e os termos que Joule utilizava. Refira-se que Joule não utilizava o termo *energia interna*, mas sim, *calor*. Considera-se que o presente num outro manual analisado tem um maior rigor no que diz respeito à distinção entre a linguagem actual e aquela que era utilizada por Joule:

Na altura, Joule explicou o fenómeno dizendo que tinha havido a conversão de trabalho em calor. Hoje diríamos, em vez disso, que a energia interna da água tinha aumentado.

Neste excerto, há um cuidado em distinguir que Joule utilizava o termo *calor* para descrever aquilo a que hoje se chama *energia interna*.

Sublinha-se, ainda, a falta de clareza respeitante ao verdadeiro objectivo de Joule. Este cientista tentava apenas obter o equivalente mecânico do calor. No entanto, no parágrafo de um dos manuais analisados parece estar inerente que o seu objectivo seria o de determinar quais as formas de aquecer a água do seu aparato: *Para aquecer o líquido dentro do recipiente tanto se podia usar calor como trabalho*. Por último, refira-se que este mesmo parágrafo faz crer que esta experiência foi a única realizada e a que determinou a

equivalência entre trabalho e calor, o que é notório na seguinte passagem: *Esta famosa experiência permitiu estabelecer a equivalência entre calor e trabalho.*

Sobre os benefícios de uma investigação histórica na actividade de um professor parecem não restar dúvidas. Para se ser capaz de ir um pouco mais além na sala de aula, promovendo a discussão, contando histórias com rigor científico ou reflectindo sobre as concepções alternativas, é necessário ser-se possuidor de uma cultura que surge através da pesquisa. Quanto ao benefício pessoal, esse sim é mais difícil de descrever mas não menos importante. Uma investigação deste género permite a maturação de algo que podíamos já saber, mas que não passava de informação, permite o estado de romance de Whitehead. Permite, ainda, a ousadia de pensarmos que, apesar do pouco que sabemos, parte do saber construído é da ordem do conhecimento e não da mera informação.

“A formação faz-se na “produção”, e não no “consumo”, do saber. Finger (1988, p. 81). Esta frase parece exprimir tudo aquilo que se tentou explicitar anteriormente: A construção deste trabalho promoveu a formação de alguém.

## **Trabalho futuro**

A vontade de saber mais sobre o que se relacionava com a história da entropia aumentava ao sabor da investigação. No entanto e dada a extensão do trabalho, a investigação teve que ser delimitada, optando-se por focar essencialmente os séculos XVIII e XIX. A opção foi tomada com base nos conteúdos abordados na disciplina de Física no ensino básico e secundário. Claro que muito ficou por explorar, sendo que o «Romance da Entropia» retrata apenas uma pequena parte da tão empolgante história da entropia. Houve acontecimentos que não pudemos explorar, mas que despertaram o nosso interesse para desenvolvimentos futuros:

- Resistência de Mach (1838-1916) e Ostwald (1853-1932) à hipótese atómica e visão que os mesmos têm do conceito de entropia, desenvolvendo o significado da energética.
- Reflexões de Perrin (1870-1942) e de Planck (1858-1947) sobre a segunda lei da termodinâmica.

- Desenvolvimento matemático das leis da termodinâmica, abordando a história de Gibbs (1839-1903).
- A entropia e a vida: a criação de ordem em sistemas longe do equilíbrio.
- Estudo das diferentes interpretações que cientistas actuais dão ao demónio de Maxwell.

## Bibliografia

- Acot, P. (2001). *História das ciências*. Lisboa: Edições 70. (Trabalho original em francês publicado em 2001).
- Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales (Abril, 1996). Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Allchin D. (2004). Pseudohistory and Pseudoscience. *Science & Education*, 13, 179 – 195.
- Allchin D. (2003). Scientific Myth-Conceptions. *Science & Education.*, 87, 329 – 351.
- Allchin, D. (1999). Values in Science: An Educational Perspective. *Science & Education*, 8, 1–12.
- Álvarez, R. M. (Abril, 1996). Las controversias científicas. Sus implicaciones didácticas y su utilidad mediante un ejemplo: la controversia sobre la edad de la Tierra. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Ariza, R. F., Pozo, R. M. (Abril, 1996). Ciencia, profesores y enseñanza: unas relaciones complejas. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Asimov, I. (1987). *O Universo da Ciência: Os Elementos, as Partículas, as Ondas, a Máquina, o Reactor* (1ª ed.). Lisboa: Editorial Presença. (Trabalho original em inglês publicado em 1984).
- Atkins, P. (2003). *EL dedo de Galileu: Las diez grandes ideas de la ciencia*. Madrid: Editorial Espasa Calpe, S.A.
- Atkins, P. W. (1994). *The 2<sup>nd</sup> Law: Energy, Chaos and Form*. Nova Iorque: Scientific American

Library.

Baeyer, H. C. (1999). *Warmth Disperses and Time Passes: The History of Heat*. Nova Iorque: Modern Library. (Trabalho original em inglês publicado em 1998).

Balibar, F. (1988). *Einstein: Uma leitura de Galileu e Newton*. Lisboa: Edições 70. (Trabalho original em francês publicado em 1984).

Bell, J. (1997). *Como realizar um projecto de investigação*. Colecção trajectos, nº 38. Lisboa: Gradiva.

Bello, A., & Caldeira, H. (2003). *Ontem e hoje: Física e Química A – Física- 10º ano*. Porto: Porto Editora.

Bodgan, R. & Biklen. S. (1994). *Investigação qualitativa em educação*. Porto: Porto Editora. (Trabalho original em inglês)

Bruner, J. (2000). *Cultura da educação*. Lisboa: Edições 70. (Trabalho original em inglês publicado em 1996).

Brush, S. G. (2000). Thomas Kuhn as a Historian of Science. *Science & Education*, 9, 39 – 58.

Cachapuz, A. F., Jorge, M. P., Praia, J. F. (2001). *Formação de professores ciências: Perspectivas de ensino*, 2ª ed. Porto: Centro de Estudos de Educação em Ciência.

Caeiro, F., Costa, A. M., Costa A., & Moissão, A. (2003). *Ver + Física A 10º ano*. Lisboa: Plátano Editora.

Callen, H., B. (1960). *Thermodynamics*. Nova Iorque: John Wiley & sons, Inc.

Caamaño, A. (Abril, 1996). La comprensión de la naturaleza de la ciencia. Un objetivo de la enseñanza de las ciencias en ESO. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, publicação trimestral (Número 8, Ano III).

- Cardwell, D. (1994). *The Fontana history of technology*. Londres: Fontana Press.
- Cardwell, D. S. L (1971). *From Watt to Clausius: The rise of thermodynamics in the early industrial age*. Londres: Heinemann Educational Books Ltd.
- Carnot, S. (1987). *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Madrid: Alianza Editorial. (Trabalho original em Francês).
- Carrilho, M. M. (1994). *A Filosofia das ciências: de Bacon a Feyerabend*. Lisboa: Editorial Presença.
- Carvalho, A. M., Vannucchi, A. I (2000). History, Philosophy and Science Teaching: Some answers to “How”? *Science & Education*, 9, 427 – 448.
- Chang H. (1999). History and Philosophy of Science as a Continuation of Science by Other Means. *Science & Education*, 8, 413 – 425.
- Cline, B. (1987). *Man who made a new Physics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cotignola, M. [et al.] (2002). Difficulties in Learning Thermodynamic Concepts: Are they linked to the historical development of this field? *Science & Education*, 11, 279 – 291.
- Dias, F., M., L. & Rodrigues, M., M. (2003). *Física na nossa vida: Física e Química A – Física 10 ° ano*. Porto: Porto Editora.
- Duarte-ramos, H. (1986). *Roda à roda: Princípios da Energética Mecanicista*. Linda-a-Velha: Hader- Gabinete internacional de Ciências e Arte, Ld.<sup>a</sup>
- Ducassé, P. (s. d.). *História das Técnicas*. (3ª ed.). Mem Martins: Publicações Europa América. (Trabalho original em francês).
- Dugdale, J. S. (1996). *Entropy and its Physical Meaning*. Londres: Taylor & Francis.

- Ferreira, A. J., Fiolhais, C., Fiolhais, M., Paiva, J., & Ventura, G. (2003). *10 F Ciências Físico-Químicas- Física 10º ano*. Lisboa: Texto Editora.
- Feynman, R. (1989). *O que é uma lei Física?* Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em inglês publicado em 1965).
- Fiolhais, C. (1992). *Física Divertida* (3ª ed.). Lisboa: Gradiva.
- Fowler, M. (2003). Galileu and Einstein: Using History to Teach Basic Physics to Nonscientists. *Science & Education*, 12, 229 – 231.
- Galili, I., Hazan A. (2001). Experts' Views on Using History and Philosophy of Science in the Practice of Physics Instruction. *Science & Education*, 10, 345 – 367.
- Garcia, R. (1983). Psychogenesis and the history of science. In *Histoire des sciences et psychogenèse* (Ed.). Genève : Cahiers de la fondation archives Jean Piaget, nº 4.
- Garcia, R., Piaget, J (1987). *Psicogénese e História das Ciências*. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- Gibert, A. (1982). *Origens Históricas da Física Moderna*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Gonçalves, R. (1997). *Ciência, Pós-ciência, Metaciência: tradição, inovação e renovação*. (2ª ed.). Lisboa: Terramar.
- Gribbin, J. (2004). *Deep Simplicity: Chaos, complexity and the emergence of life*. Londres: Penguin books.
- Guillen, M. (2004). *Cinco ecuaciones que cambiaron el mundo*. Barcelona: Debols!llo. (Trabalho

---

original em inglês publicado em 1995).

- Hazen, R. M. , Trefil J. (1991). *A grande aventura da ciência*. Mem Martins: Publicações Europa – América, Lda. (Trabalho original em inglês publicado em 1991).
- Hills, R. L. (1989). *Power from Steam: A history of the stationary steam engine*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Holton, G. (2003). What Historians of Science and Science Educators Can Do For Another. *Science & Education*, 12, 603 – 616.
- Holton, G., Rutherford, F. J. , Watson F. G. (1980). *Projecto Física: Unidade 3, O triunfo da mecânica*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. (Trabalho original em inglês publicado em 1970).
- Huberman, A. M., Miles, M. B. (1991). *Analyse des données qualitatives : Recueil de nouvelles méthodes*. Bruxelas : De Boeck. (Trabalho original em inglês).
- Izquierdo, M. (Abril, 1996). Relación entre la historia y la filosofía de la ciencia y la enseñanza de las ciencias. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Janeira, A. L. (1985). Filosofia das Ciências: Faces e interfaces de uma disciplina. *Revista Portuguesa de Filosofia*, pp. 1- 23.
- Jiménez, M. P. (Abril, 1996). La variabilidad en la descendencia: comparación de teorías explicativas. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Kragh, H. (2001). *Introdução à historiografia da ciência*. Porto: Porto editora. (Trabalho original em inglês publicado em 1987).



Kubli, F. (2001). Can the Theory of Narratives Help Science Teachers be Better Storytellers? *Science & Education*, 10, 595 – 599.

Kuhn, T. S. (1989). *A tensão essencial*. Lisboa: Edições 70. (Trabalho original em inglês publicado em 1977).

Laidler, K. J. (2002). *Energy and the unexpected*. Nova Iorque: Oxford University Press Inc.

Leite, L. (2002). History of Science in Science Education: Development and Validation of a Checklist for Analysing the Historical Content of Science Textbooks. *Science & Education*, 11, 333 – 359.

Losee, J. (1998). *Introdução histórica à filosofia da ciência*. Lisboa: Terramar. (Trabalho original em inglês publicado em 1980).

Machamer, P. (1998). Philosophy of Science: An Overview for Educators. *Science & Education*, 7, 1 – 11.

Marage, P., Wallenborn G. (1995). *Les Conseil : Solvay et les débats de la physique moderne*. Bruxelas : Ed. Pierre Marage e Grégoire Wallenborn Université Libre de Bruxelles.

Martinás, K. , Ropolyi, L. , Szegedi, P. (1990). *Thermodynamics: History and Philosophy. Facts, Trends, Debates*. Singapura: World Scientific.

Matthews, M. R. (1994). *Science Teaching – The role of History and Philosophy of Science*. Nova Iorque, Londres: Routledge.

McComas, W., Almazroa, H., Clougii, M. P. (1998). The Nature of Science in Science Education. An Introduction. *Science & Education*, 7, 511 – 532.

Meichtry Y. J. (1999). The Nature of Science and Scientific Knowledge: Implications for a Preservice Elementary Methods Course. *Science & Education*, 8, 273 – 286.

- Miller, A. (1993). *Insights of genius – Imagery and creativity in science and art*. Springer – Verlag.
- Moreira, A. (1980). *Física Básica*. (3ªed.). Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Neto, A. (2002). *Interfaces Várias, Sinergias Múltiplas: Para uma Didáctica Reconstruída*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Neto, A. (2003). *Linguagem e Comunicação: Aprendizagem e Desenvolvimento*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Neto, A. (2003). Didáctica da Mecânica e Didáctica da Física: *Interfaces Múltiplas, Sinergias Várias*. Texto utilizado nas aulas da disciplina de Didáctica das Ciências Físico-Químicas do mestrado em Física para o Ensino. Universidade de Évora.
- Nóvoa, A., Finger M. (Ed). (1988). *O método (auto) biográfico e a formação*. Odivelas: Pentaedro, Publicidade e artes gráficas, Lda.
- Ordóñez, J. O. (1987). Introdução, tradução e notas de *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. Madrid: Alianza Editorial.
- Ortoli, S., Witkowski, N. (1996). *La baignoire d'Archimède: Petite Mythologie de la science*. Paris : Éditions du Seuil.
- Pais, A. (1993). *Subtil é o senhor: vida e pensamento de Albert Einstein*. Lisboa: Gradiva.
- Pedrinaci, E. (Abril, 1996). Por unas fructíferas relaciones entre la historia, la filosofía de la ciencia y la educación científica. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).

- Pereira, D., C. (1985, Abril). *Conceito de entropia e ensino da Química*, comunicação apresentada no VII Encontro da Sociedade Portuguesa de Química, Braga.
- Pérez, G. (1993). Contribución de la historia y de la Filosofia de las Ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza / aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las ciencias*, 11 (2), 197 – 212.
- Piaget, J., Garcia, R. (1987). *Psicogénese e história das ciências*. Lisboa: Publicações Dom Quixote. (Trabalho original em inglês publicado em 1983).
- Planck, M. (1945). *Treatise on Thermodynamics*. New York: Dover Publications.
- Praia, J. (2004, Outubro). *A Disciplina enquadramento, pressupostos e finalidades*. Comunicação apresentada no seminário “Epistemologia da ciência e perspectivas de ensino: que articulações?”, Évora.
- Purrington, R. D. (1997). *Physics in the Nineteenth Century*. Nova Jérсия: Rutgers University Press.
- Reeves, H. (1990). *Malicorne: Reflexões de um observador da Natureza*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em francês publicado em 1990).
- Reeves, H. (1995). *Últimas notícias do cosmos: De regresso ao primeiro segundo*. Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em francês publicado em 1994).
- Reeves, H. et al. (1997). *A mais bela história do mundo: Os segredos das nossas origens*. (2ª ed.). Lisboa: Gradiva. (Trabalho original em francês publicado em 1996).
- Rutherford, F. J. (2001). Fostering the History of Science in American Science Education. *Science & Education*, 10, 569-580.

- Seroglou F., Koumaras P. (2001). The Contribution of the History of Physics in Physics Education: A Review. *Science & Education*, 10, 153 – 172.
- Sichau, C. (2000). Practising Helps: Thermodynamics, History, and Experiment. *Science & Education*, 9, 389 – 398.
- Silva, D., M. (2003). *Desafios da Física: Física e Química – A 10º ano*. Lisboa: Lisboa Editora.
- Smith, C. (1998). *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. Londres: The Athlone Press.
- Solbes, J., Traver, M. J. (1996). La utilización de la Historia de las Ciencias en la enseñanza de la Física y la Química. *Enseñanza de las ciencias*, 14 (1), 103 – 112.
- Solbes, J., Traver, M. (2001). Resultados obtenidos introduciendo Historia de la Ciencia en las clases de Física y Química: Mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas. *Enseñanza de las ciencias*, 19 (1), 151 – 162.
- Solbes, J., Traver, M. (2003). Against a Negative Image of Science: History of Science and Teaching of Physics and Chemistry. *Science & Education*, 12, 703 – 717.
- Solomon, J. (1992). *Getting to know about energy in school and society*. Londres: The Falmer Press.
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: The utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science & Education*, 6, 277 - 284.
- Speltini, C., Ure, M., C., D. (2002). Conservation in Physics Teaching, History of Science and in Child Development. *Science & Education*, 11, 475 – 486.
- Speyer, E. (1994). *Six Roads From Newton: Great discoveries in Physics*. Nova Iorque: Wiley Popular Science.

- Stengers, I. (1979). *A descrição da actividade científica por T. Kuhn na história e prática das ciências*. A regra do jogo.
- Stengers, I. (1994). D'un cycle parfait à la mort de l'univers. *Les Cahiers de Science & Vie*, 20, 68 - 82.
- Stiefel, B. M. (Abril, 1996). Aproximación didáctica a textos originales. In *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, Publicação trimestral (Número 8, Ano III).
- Stuewer, R. H. (1998). History and Physics. *Science & Education*, 7, 13 – 30.
- Thomas, H., Thomas, D., L. (s.d.). *Vidas de grandes cientistas*. Lisboa: Edição «Livros do Brasil». (Tradução original em inglês).
- Valente, M. J. (1999). *Uma leitura pedagógica da construção histórica do conceito de energia: Contributo para uma didáctica crítica*. Tese de doutoramento não publicada, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Vaquero, J. M., Santos A. (2001). Heat and Kinetic Theory in 19<sup>th</sup>- Century Physics Textbooks: The Case of Spain. *Science & Education*, 10, 307 – 319.
- Wang, H. A., Marsh D. D. (2002). Science Instruction with a Humanistic Twist: Teachers' Perception and Practic in Using the History of Science in Their Classrooms. *Science & Education*, 11, 169 – 189.
- Valente, M. (1998). Duas visões sobre o conhecimento do mundo: a “controvérsia” entre Planck e Mach olhada pela Pedagogia. In Seminário sobre o positivismo. Évora: Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência.