

HISTÓRIA DA CIÊNCIA, INTERDISCIPLINARIDADE E ENSINO DE FÍSICA: O PROBLEMA DO DEMÔNIO DE MAXWELL

History of Science, interdisciplinarity and Physics Teaching: the Maxwell's Demon problem

Cristiano Mattos¹
Amélia Império Hamburger²

Resumo: Propomos que uma evolução de idéias científicas seja usada como instrumento de aprendizagem de conteúdos específicos e, em particular, para ressaltar como os conteúdos se articulam entre as disciplinas. Como exemplo, apresentamos um estudo sobre a proposta do “demônio de Maxwell” e discussões sobre sua “exorcização”, isto é, um estudo sobre a compreensão da natureza de um ser inteligente que atua dentro de um sistema físico e de como seria essa atuação. Estão envolvidos nesse problema fenômenos relacionados com várias teorias – Termodinâmica, Física Molecular, Mecânica Estatística, Teoria da Informação – dentro das disciplinas de Física, Química, Biologia, Computação. Entre diversas questões epistemológicas e conceituais aí contidas, será enfatizada a questão do objeto limitado de uma teoria científica, isto é, da limitação de seu significado aos fenômenos por ela compreendidos. A delimitação dos fenômenos estudados e as teorias e técnicas caracterizam a compreensão que vai realizar sua emergência concreta nos laboratórios. Essa compreensão vai dar também a possibilidade de atuação interdisciplinar.

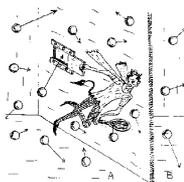
Unitermos: Ensino de Física, História e Epistemologia da Física, Limite de Significado da Teoria Científica, Interdisciplinaridade.

Abstract: We propose that an evolution of scientific ideas be used as an instrument of learning specific content and, also how the subjects permeate the disciplines. As an example, we present a study about the “Maxwell's demon” problem and some discussions about its “exorcization”, that is, an understanding of the nature of the intelligent being that acts inside a physical system and what is the meaning of the performance. Several phenomena are involved in this problem within the theories – Thermodynamics, Molecular Physics, Statistical Mechanics, Information Theory – and disciplines such as Physics, Chemistry, Biology and Computation. Among several epistemological and conceptual questions concerned with this problem, we will emphasize the limits to the objectives of a scientific theory, that is, the limitation of the meaning of a theory to the range of phenomena it describes and explains. The delimitation of the studied phenomena, and also the theories and the techniques, characterize the understanding that will accomplish its concrete emergence in the laboratory. This comprehension will also give the possibility of interdisciplinary actions.

Keywords: Physics Education, History and Epistemology of Physics, Limit of meaning of a Scientific Theory, Interdisciplinarity.

¹ Unesp – Depto. de Física e Química, C.P. 205, CEP 12516-410, Guaratinguetá, SP, Brasil. USP – Instituto de Física, C.P. 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: mattos@if.usp.br)

² USP – Instituto de Física, C.P. 66318, CEP 05315-970, São Paulo, SP, Brasil. (e-mail: aimperio@if.usp.br)



*O diabo não há! É o que eu digo...
Existe é homem humano. Travessia.*
(Guimarães Rosa)

Introdução

A importância de se integrar a História e a Filosofia da Ciência ao Ensino de Ciências vem sendo estudada, há alguns anos, por diversos pesquisadores (IMPÉRIO-HAMBURGER, 1989, 1990; SOLOMON *et al.*, 1992; MATTHEWS, 1994). Algumas propostas têm sido feitas no sentido de ampliar a compreensão do que é o processo científico e facilitar o processo de ensino-aprendizado de ciências tornando mais claros conceitos científicos ou mesmo a própria natureza da ciência (ADÚRIZ-BRAVO *et al.*, 2003). Por exemplo, o uso da História da Ciência tem sido defendido na formação de estudantes e professores de ciências para promoção de mudanças conceituais (JENSEN & FINLEY, 1995; SELLEY, 1996; LIN, 1998) e para compreensão dos aspectos “intrínseco”, “cultural” e “instrumental” da ciência (ADÚRIZ-BRAVO *et al.*, 2003). O aspecto intrínseco se refere à própria atividade humana de reflexão sobre a natureza e os limites da linguagem para expressá-la, se confundindo mesmo com a própria atividade científica. O aspecto cultural se refere à importância da compreensão do desenvolvimento histórico de valores humanos, mostrando as relações entre o fazer ciência e a construção de cidadania. O aspecto instrumental é o uso dessas disciplinas como instrumento próprio para ensinar conteúdos específicos, revelando obstáculos, das mais diversas naturezas, para a construção do conhecimento científico. Nos últimos anos tem se procurado incluir esses significados em reformas curriculares (JENKINS, 1990; NIELSEN & THOMSEN, 1990; ADÚRIZ-BRAVO, 2001; PCN, 2000).

Método

A estratégia de retomar os contextos originais da criação e evolução de significados dos conceitos científicos, pela leitura e análise de textos originais e de historiadores da Ciência, tem sido bastante frutífera, uma vez que se tornam claras as imprecisões iniciais e o posterior refinamento conceitual (IMPÉRIO-HAMBURGER, 1990). Apresentamos neste trabalho momentos em que um pensamento novo é analisado no limite das estruturas conceituais estabelecidas – as leis da termodinâmica (KUHN, 1975). Esse é um bom exemplo do surgimento de novos significados do conceito de entropia. O problema do demônio de Maxwell trás consigo uma diversidade de questões, tanto do campo da Física como da Biologia e da Teoria da Informação. Estudamos a origem do problema e acompanhamos sua evolução histórica e epistemológica afim de prepará-lo como um exemplo que pode ser utilizado nos cursos de formação de professores de ciências (MATTOS, 1991).

Neste trabalho apresentamos o problema colocado por Maxwell em 1871 e sua resolução por Brillouin (1962) no contexto da Teoria da Informação. Esta solução pode ser acompanhada por um estudante de graduação, de um curso de Ciências Exatas, que tenha conhecimentos básicos de termodinâmica, mecânica estatística e conhecimentos introdutórios de Física Moderna. Apresentamos também desdobramentos do problema na Biologia e na Computação.

Desse modo o problema é um excelente exercício sobre os processos físicos e as questões epistemológicas relativas ao limite das teorias científicas, em particular os limites da Segunda Lei da Termodinâmica.

Origens do demônio e suas múltiplas naturezas

J. C. Maxwell (1871), com a familiaridade desenvolvida em seus estudos sobre distribuição de velocidades das moléculas de um gás, propôs o seguinte problema sobre:

“Um ser cujas faculdades são tão refinadas que pode seguir o percurso de cada molécula e está habilitado a fazer o que para nós ainda é impossível [...] Vamos supor que um recipiente esteja dividido em duas partes A e B, por uma pequena parede, na qual há um pequeno buraco, e que um ser que pode ver moléculas individualmente, abre e fecha esse buraco, de maneira a permitir apenas que as moléculas mais rápidas passem de A para B, e que as mais lentas passem de B para A. Esse ser, sem realizar trabalho algum, aumentará a temperatura de B e diminuirá a de A, em contradição com a segunda lei da termodinâmica”³ (MAXWELL, 1871, p. 328-329).

A proposta de geração de diferenciais térmicos sem custo energético levaria ao *moto perpétuo*, violando a Segunda Lei da Termodinâmica. Foi W. Thomson (1874, ver, por exemplo, in LEFF & REX, 1990, p. 5) quem chamou esse ser de “demônio inteligente” de Maxwell.

Estudos históricos (KLEIN, 1970; COLLIER, 1990; LEFF & REX, 1990) mostram, em textos de Maxwell, que ele não estava propondo que a energia pudesse ir de um corpo mais frio para um corpo mais quente e nem que a entropia pudesse decrescer, numa visão probabilística dos fenômenos. Maxwell procurou com seu problema, mostrar limites de significado das leis da termodinâmica.

Qual sua [do demônio] finalidade principal? Mostrar que a Segunda Lei da Termodinâmica tem, apenas, uma certeza estatística⁴. (MAXWELL in LEFF & REX, 1990, p. 5).

Maxwell parece ter preferido que o “ser”, por ele proposto, não tivesse uma natureza tão controvertida como a de um demônio, mas podia ser considerado simples como uma válvula:

[...] para demônios menos inteligentes podem produzir uma diferença na pressão assim como na temperatura simplesmente permitindo todas as partículas ir de uma direção enquanto impede que todas vão na direção contrária. Isso reduz o demônio a uma válvula. Como tal o avalie. Não o chamem mais de demônio mas sim de válvula, por exemplo, como aquelas de pressão hidráulica.⁵ (MAXWELL in LEFF & REX, 1990, p. 6).

Entretanto, apesar dessa posição em contrário, a idéia do demônio foi incorporada ao problema de Maxwell, como ilustra o antigo símbolo da Sociedade Americana de Vácuo (figura 1)

³ “What was their chief end? To show that the 2nd law of Thermodynamics has only a statistical certainty.” (MAXWELL in LEFF & REX 1990, 5)

⁴ Leff & Rex se referem a Maxwell por meio de uma citação feita por C. G. Knott (1911) *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait* de uma carta, sem data, de Maxwell para Tait. O livro de Leff & Rex (1990) usa de forma inspiradora a História e a Filosofia da Ciência.

⁵ “... for less intelligent demons can produce a difference in pressure as well as temperature by merely allowing all particles going in one direction while stopping all those going the other way. This reduces the demon to a valve. As such value him. Call him no more a demon but a valve like that of the hydraulic ram, suppose.” (MAXWELL in LEFF & REX 1990, 6).



Figura 1: Caricatura do demônio da pressão, antigo símbolo da Sociedade Americana de Vácuo.

Mecânica Estatística e informação

Boltzmann funda a Mecânica Estatística, introduzindo a probabilidade não como um instrumento explicativo da teoria, mas como uma propriedade física do sistema. (BOLTZMANN, 1872; AURANI, 1993, 1999) Foi dessa forma que se estabeleceram as ferramentas matemáticas adequadas para o desenvolvimento da Mecânica Quântica e dos estudos sobre sistemas irreversíveis e de comportamento aleatório (MATTOS, 1991).

Em 1897 houve uma discussão entre Boltzmann e Planck sobre como calcular e interpretar a distribuição da radiação do corpo negro medida por Planck (BUCHWALD, 1985; FLAMM, 1998; ALBUQUERQUE, 1989). Planck estudava a reflexão de ondas eletromagnéticas numa caixa de paredes refletoras interpretando-as como um conjunto de osciladores harmônicos em interação com a radiação. Boltzmann, então faz a seguinte sugestão:

É certamente possível e seria gratificante derivar de leis gerais, para o fenômeno da radiação, um teorema análogo ao teorema da entropia usando os mesmos princípios da teoria do gás.⁶ (BOLTZMANN, 1897, in FLAMM, 1998, p. 3).

Planck foi convencido por Boltzmann a relacionar o cálculo das energias envolvidas com a entropia (S) do corpo negro, usando a fórmula probabilística de Boltzmann $S = k \ln W$, onde W é probabilidade de um dado estado do sistema. Esse procedimento levou Planck à descoberta da variação discreta de energia dos osciladores como *quanta* proporcionais às frequências ($h\nu$) das ondas absorvidas. Nessa experiência as constantes k (de Boltzmann) e h (de Planck) foram introduzidas (ALBUQUERQUE, 1989).

Nos anos que se seguiram houve um aumento substancial do número de trabalhos sobre o movimento browniano. Einstein obtém sua famosa equação de difusão, enquanto Jean Perrin comprova experimentalmente, via processos difusivos, a existência dos átomos em movimento (OLIVEIRA, 1993).

Smoluchowski, em 1912, é um dos primeiros a estudar o efeito do movimento browniano nos processos de medida e na aparente quebra do segundo princípio da termodinâmica (BRILLOUIN, 1962; SREDNIAWA, 1991; GORDON, 2004a). Ele trabalhou com problemas de sensibilidade de aparelhos de medida e sua imprecisão devido ao movimento browniano das agulhas dos aparelhos (ISING, 1926). Smoluchowski argumenta que, no caso do “demônio da pressão”, a porta da armadilha, em determinado instante, teria um movimento aleatório, descontrolando o processo de seleção das moléculas:

⁶ “It is certainly possible and would be gratifying to derive for radiation phenomena a theorem analogously to the entropy theorem from the general laws for these phenomena using the same principles as in gas theory. L. Boltzmann: “Uber irreversible Strahlungsvorgänge II., Berliner Ber. (1897) 1016–1018, in Flann (1998).

⁷ “As far as we know today, there is no automatic, permanently effective perpetual motion machine, in spite of the molecular fluctuations, but such a device might, perhaps, function regularly if it were appropriately operated by intelligent beings...” (SMOLUCHOWSKI, 1914, p. 89, in SZILARD, 1929).

[...] até onde sabemos hoje, não há uma máquina de moto perpétuo (de 2.º tipo) automática, que seja sempre efetiva, apesar das flutuações moleculares. Porém, talvez tal dispositivo pudesse funcionar regularmente se ele fosse operado de maneira apropriada por seres inteligentes [...] (SMOLUCHOWSKI, 1914, p. 89, in SZILARD, 1929).

Para tentar saber qual seria essa forma adequada de operar, Szilard (1929) em seu famoso artigo *On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by Intervention of Intelligent Beings*, mostrou, em detalhes, usando argumentos termodinâmicos, a necessidade do demônio obter informação sobre o sistema, para que possa, eventualmente, diminuir sua entropia:

“Em primeiro lugar, desejamos aprender que circunstâncias condicionam a diminuição de entropia que ocorre quando seres vivos inteligentes intervêm em um sistema termodinâmico. Veremos que isso depende de um certo tipo de acoplamento entre diferentes parâmetros do sistema. [...] Veremos que, simplesmente por causa desta faculdade de memória, a segunda lei seria violada, se a medição pudesse ocorrer sem compensação. Percebemos que a segunda lei não fica tão ameaçada quanto poderíamos pensar, tão logo vemos que a diminuição de entropia resultante da intervenção seria completamente compensada se a execução de tal medição fosse, por exemplo, sempre acompanhada pela produção de $\ln 2$ unidades de entropia. Neste caso será possível encontrar uma lei mais geral de entropia, que se aplica universalmente para todas as medições.” (SZILARD, 1929).

Com o desenvolvimento da mecânica quântica, J. C. Slater⁸ (1939, in BRILLOUIN, 1962) aponta para o problema de como representar a visualização das moléculas como uma medida, afinal seria necessário explicar, frente ao princípio da incerteza, como o demônio mediria simultaneamente a posição e a velocidade da partícula para decidir em que compartimento ela deveria ficar. (Demers [1944, 1945] mostra que o princípio de incerteza só seria aplicável no caso em que o sistema fosse composto de moléculas leves a alta pressão.)

Com o desenvolvimento da Cibernética (WIENER, 1948), a axiomatização da Teoria de Comunicação (SHANNON & WEAVER, 1949) e de sua generalização na Teoria da Informação (KINCHIN, 1953), são retomadas discussões sobre o demônio de Maxwell, que conserva esse nome até hoje. Como consequência, surgem questões, conceitualmente mais precisas, sobre a possibilidade da obtenção de informação pelo demônio, para que o sistema tivesse sua entropia diminuída.

Entropia e vida

Contemporaneamente ao desenvolvimento das teorias da informação, discute-se a representação do funcionamento dos seres vivos e a limitação das leis físicas conhecidas. Bohr destaca o problema e propõe solução, em seu célebre seminário *Light and Life* (BOHR, 1933):

[...] constatar a importância das propriedades das partes nas funções dos seres vivos, não basta para explicar os fenômenos biológicos. Portanto, o problema é saber se ainda nos falta um dado fundamental para a análise dos fenômenos naturais, antes de compreender a vida baseando-se na experiência da física [...] Neste caso, a existência da vida deveria ser considerada como um fato elementar sem explicação possível, como um ponto de partida para a Biologia, da mesma maneira que o quantum de ação, que parece com um elemento irracional para a Mecânica Clássica, constitui com as partículas elementares o fundamento da Física Atômica. (BOHR, 1933, 458).

⁸ SLATER, J. C. *Introduction to Chemical physics*. New York: McGraw-Hill, 1939.

Após o estabelecimento da Mecânica Quântica, M. Delbruck e E. Schrödinger, começam as primeiras tentativas de encontrar uma descrição física para os fenômenos da vida. Delbruck aplica, em moléculas de DNA, as técnicas de espalhamento de raios-X para a determinação da estrutura cristalina de sólidos, com o objetivo de conhecer a estrutura física do código genético. Este procedimento desemboca no trabalho de Watson e Crick e no primeiro modelo da molécula do DNA (CRICK, 1955; DELBRUCK, 1986).

Schrödinger (1944) propõe, pela primeira vez, a conexão entre os conceitos de negentropia e de informação. Usa a Mecânica Estatística, para analisar os fenômenos da evolução, seleção natural e a estabilidade do sistema vivo.

Brillouin (1962) analisa diversas experiências da física sob a ótica da teoria da informação, deixando claro a limitação que impõe na análise dos fenômenos que analisa:

(...) não estamos em posição de investigar o processo do pensamento, e não podemos, no momento, introduzir em nossa teoria qualquer elemento envolvendo o valor humano da informação. Essa eliminação do elemento humano é uma séria limitação, mas é o alto preço que temos que pagar para sermos, agora, capazes de estabelecer o corpo desse conhecimento científico.¹⁰ (BRILLOUIN, 1962, p. X).

Brillouin dedica grande atenção ao problema do demônio de Maxwell, retomando a relação entre os conceitos de entropia, negentropia e informação. Este passa a ser um dos principais trabalhos de “exorcização” do demônio. Partindo do princípio levantado por Demers (1945), de que o demônio deveria ver individualmente o átomo (ou molécula) para selecioná-lo, utiliza a teoria da informação para analisar um aparelho físico que representasse a atuação do demônio.

O demônio informado de Brillouin

Brillouin mostra que o demônio, para tomar sua decisão, precisa “ver” as moléculas e propõe a luz como o instrumento de medida usado para obter a informação a partir da qual basearia sua decisão. Representa o demônio de Maxwell como sendo um sistema composto por uma bateria e uma lâmpada, em um recipiente totalmente isolado, inicialmente a uma temperatura T_0 , dividido em duas partes, com uma pequena porta entre elas e uma célula fotoelétrica acoplada à porta.

Inicialmente a bateria aquece o filamento da lâmpada a uma temperatura $T_1 \gg T_0$ onde se obtém luz visível, de frequência ν_1 . O demônio detecta a molécula com pelo menos um quantum de energia $h\nu_1 (> kT_0)$, liberado pela molécula, aumentando sua entropia de

$$\Delta S_d = \frac{h\nu_1}{T_0} = kb \quad (1)$$

onde $b = (h\nu_1/kT_0) \gg 1$. Do ponto de vista estatístico, ao se determinarem estados de uma molécula, diminui-se o número de estados possíveis do gás, diminuindo assim sua entropia. A variação de entropia do sistema pode ser escrita como:

$$\Delta S_G = S_G - S_{G0} = k \ln \frac{P_t}{P_0} \quad (2)$$

P_0 representa o número inicial de configurações microscópicas possíveis do gás e $P_1 = P_0 - p$, é o número total de configurações depois de realizadas p configurações. Logo $P_1 < P_0$. Mas, se uma ação inicial do demônio se der num período de tempo curto, o número de configurações realizadas é muito menor do que as que estão por se realizar, ou seja, se $p \ll P_1$ então $P_1 \approx P_0$, o que permite, na expansão em série do logaritmo, a seguinte aproximação:

$$\Delta S_G = -k \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

Dessa forma, podemos escrever a variação total da entropia do sistema (gás-demônio), até este instante como:

$$\Delta S_S = \Delta S_d + \Delta S_G = k \left(\frac{b-p}{P_0} \right) > 0 \quad (4)$$

onde $b \gg 1$ e $0 < (p/P_0) \ll 1$. Isto implica que, nesta primeira parte do processo, a entropia total aumentou, em concordância com o segundo princípio da termodinâmica. Em seguida Brillouin estende a análise para a segunda parte do processo, quando o demônio faz uso da informação.

A decisão

O custo da informação obtida deve ser balanceado com o ganho de se separarem as moléculas rápidas e lentas nos compartimentos. Assim, interpreta-se que o demônio, realizando um trabalho *quasi*-estático de abrir e fechar a porta divisora do sistema, promova uma diferença de temperatura ΔT , entre as partes A e B , cujas temperaturas podem ser consideradas como:

$$T_B = T_0 + \left(\frac{\Delta T}{2} \right) > T_A = T_0 - \left(\frac{\Delta T}{2} \right) \quad (5)$$

onde $T_B - T_A = \Delta T > 0$. O demônio distingue e seleciona uma molécula rápida do compartimento A com energia cinética ligeiramente maior que a energia cinética média,

$$K_+ = \frac{3}{2} kT_0 (1 - \epsilon_1) \quad (6)$$

e a deixa passar para o compartimento B do sistema. O essencial é que seja finito. Podemos considerar ϵ_1 sendo da ordem da unidade de energia. Logo em seguida o demônio seleciona uma molécula, vinda do compartimento B , com uma energia cinética ligeiramente menor que a energia cinética média,

$$K_- = \frac{3}{2} kT_0 (1 - \epsilon_2) \quad (7)$$

sendo $\epsilon_2 \approx \epsilon_1$, deixando-a passar para o compartimento A do sistema. Para a “visualização” das moléculas, o demônio precisou de, no mínimo, dois *quanta* de luz, de modo que ao detectá-las aumenta sua entropia de:

$$\Delta S_d = 2 kb \quad (8)$$

No sistema terá sido criada uma diferença de potencial térmico, ou seja, uma transferência de energia do compartimento A para o compartimento B , da ordem de:

$$\Delta Q_G = K_+ - K_- = \frac{3}{2} kT(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (9)$$

o que corresponde a uma variação da entropia do gás:

$$\Delta S_G = \Delta Q \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) = -\Delta Q \frac{\Delta T}{T^2} = -\frac{3}{2} k(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{\Delta T}{T}, \quad (10)$$

como $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ e são finitos, tomando $\Delta T \ll T$ podemos fazer a seguinte aproximação:

$$\eta = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{\Delta T}{T} \Rightarrow \Delta S_G = -\frac{3}{2} k\eta. \quad (11)$$

Dessa forma a variação da entropia total do sistema composto pelo demônio e pelo gás, depois da atuação do demônio é dada por:

$$\Delta S_S = \Delta S_d + \Delta S_G = k \left(2b - \frac{3\eta}{2} \right) > 0 \quad (12)$$

Houve, portanto, uma variação de entropia maior que zero conforme o segundo princípio Brillouin estabeleceu, então, de forma quantitativa, um princípio que define a condição para poder haver medida de informação, isto é, o limite inferior do aumento de entropia do sistema que dá a possibilidade de haver uma medida física. Esse limite inferior é da ordem de grandeza da constante de Boltzmann:

“Apesar de tudo, descobrimos uma lei física muito importante na equação acima: toda medida física requer um aumento de entropia correspondente, e há um limite inferior, abaixo do qual a medida se torna impossível. Esse limite corresponde a uma alteração na entropia da ordem de k , a constante de Boltzmann. Discussão mais precisa vai provar que o limite exato é $k \ln 2$, ou aproximadamente $0,7 k$ para um *bit* de informação obtida.”⁹ (BRILLOUIN, 1962, p. 168).

Esse princípio configura que qualquer processo de medição tem um custo termodinâmico mínimo que vai servir de base para a definição de unidade de informação, o *bit*. Brillouin chama de Lei Física a expressão de um limite da teoria da informação, pois podemos dizer que os fenômenos que geram entropias menores que $k \ln 2$, não são objetos dessa teoria (MATTOS, 1991).

⁹ We have, nevertheless, discovered a very important physical law in eq. (13.10): every physical measurement requires a corresponding entropy increase, and there is a lower limit, below which the measurement becomes impossible. This limit corresponds to a change in entropy of the order of k , Boltzmann's constant. A more accurate discussion will prove later that the exact limit is $k \ln 2$, or approximately $0.7 k$ for one bit of information obtained. (BRILLOUIN, 1962, p. X).

O Demônio na computação

A associação entre o demônio de Maxwell e os processos de obtenção e destruição de informação gerou o aparecimento de uma nova área de pesquisa a “Termodinâmica da Computação” (BENETT, 1982; BENETT & LANDAUER, 1985; JAYNES, 1996). Bennett (1973) sugere e Fredkin e Toffoli (1982) mostram teoricamente que os computadores mais eficientes são os reversíveis, resultado correspondente ao ciclo ideal de Carnot para as máquinas térmicas. Mas, da mesma forma que os ciclos reais, as operações de processamento de dados, como copiar informação de um sistema para outro, são processos irreversíveis que não diferem muito da operação de medida feita pelo demônio de Maxwell. Isto pode ser compreendido com o argumento de Brillouin, de que toda medida (obtenção de informação) requer, no mínimo, a geração de $k\ln 2$ de aumento de entropia por cada *bit* de dado processado (medida do estado do *bit*), ou seja, o processo é irreversível.

Se tomarmos como exemplo qualquer sistema físico que pode ser ordenado em termos de um conjunto de unidades binárias – *bits* – como um ábaco ou um computador – aliado à premissa de que seus distintos estados lógicos correspondem a seus distintos estados físicos (por exemplo a configuração elétrica de um *chip*), é possível mostrar a limitação termodinâmica do processamento de cópia de uma informação (BENETT & LANDAUER, 1985).

Por exemplo, para se iniciar um registro de memória, precisamos saber em que estado está o sistema. Para isso o “ordenamos” (realizamos trabalho sobre ele) de modo a deixá-lo em uma configuração conhecida, independente do seu estado anterior. Suponhamos um registro de memória de n *bits*. Este registro pode ter 2^n estados possíveis, mas para deixá-lo em condições de fazer um registro que possamos compreender, é necessário saber seu estado inicial antes do registro. Para isso deixamos, por exemplo, todos os *bits* no valor 0. Numa analogia com a Termodinâmica, esta operação corresponde ao processo em que um pistão de um êmbolo realiza trabalho, comprimindo um gás. Nessa analogia o estado do gás corresponde ao estado do armazenador de memória. No caso de um *chip* o estado é constituído de uma seqüência de configurações físicas do seu estado eletrônico, isto é, se há corrente elétrica ou não, o que responde aos estados binários 1 e 0, respectivamente.

De acordo com a premissa de Benett e Landauer (1985), ao “comprimirmos” um estado lógico do sistema, na verdade “comprimimos” (ordenamos) seu estado físico (*chip*), diminuindo assim a entropia do sistema físico. Mas como reconhece o princípio de Brillouin, tal diminuição de entropia está associada a um aumento de entropia nas vizinhanças do sistema. Ou seja, não se pode iniciar um registro de memória sem gerar um aumento de entropia das vizinhanças do sistema de pelo menos $k\ln 2$. Neste sentido, iniciar uma memória é uma operação termodinamicamente irreversível (BENETT & LANDAUER, 1985). A discussão sobre como a operação computacional determina o aumento da entropia ainda não está acabada. Bub (2000) afirma que é a destruição da informação que gera um custo entrópico irreversível, criticando os argumentos de Earman e Norton (1998) de que o custo se dá na aquisição da informação.

Outras áreas que têm tido grande repercussão é o tratamento de problemas de medidas em Mecânica Quântica (por exemplo, ZUREK, 2003, e GORDON, 2004b), a Termodinâmica da computação e o desenvolvimento de computadores quânticos (BENETT *et al.*, 1997). Tais questões têm levado em consideração os limites computacionais de processamento de informação, ou seja, o fato de que um computador dissipa no mínimo $kT\ln 2$ J/*bit* de informação irreversível. Há as questões sobre a capacidade de um computador quântico capturar toda a complexidade do processamento que ocorre em um sistema físico quântico, que do ponto de vista da teoria é reversível (KAK, 1995).

Também recente é o uso da estrutura conceitual do problema do demônio de Maxwell para estudar os fenômenos da dinâmica de trocas iônicas em membranas celulares. O mesmo tipo de problema pode ser encontrado no sistema de filtragem das membranas celulares, identificar moléculas e permitir ou não sua passagem para manter o equilíbrio dinâmico da homeostase celular. Da mesma forma podemos pensar na eficiência termodinâmica desse processo, e mais uma vez no “Ciclo de Carnot” dessa troca de informação dinâmica (LIMA *et al.*, 1994; SCHNEIDER, 1994, 1996).

Conclusão e desdobramentos

O problema do demônio de Maxwell apresentado neste trabalho, ainda está aberto, mas está cada vez mais bem compreendido como uma ferramenta para explorar os limites da Segunda Lei da Termodinâmica e elucidar melhor a fronteira de ordem-desordem de um sistema. Do ponto de vista epistemológico as principais questões em jogo são o *limite da Segunda Lei da Termodinâmica e o custo entrópico das medidas*.

A necessidade de atualizarmos o Ensino de Ciências, de modo a incorporar critérios e ações científicas com conteúdo específico, é uma das maiores dificuldades nos cursos de formação de professores de ciências. Na maioria das vezes as regras, ou critérios, que levam a uma decisão científica, não são explícitos. Não se aprende ciência apenas com regras, mas também com exemplos (MATTOS, 2000; MATTOS, 2004). Assim, uma das grandes dificuldades a serem enfrentadas é a escassez de novos exemplos de problemas interdisciplinares, suficientemente simples e solúveis.

O problema do demônio de Maxwell como um exercício, representa um excelente exemplo de questões sobre os limites das teorias científicas, um problema, sem dúvida, de natureza epistemológica, assim como o é a necessidade de criação de novos conceitos para dar conta da diversidade de aspectos de um problema de fronteira. Estas questões podem estar presentes nos conteúdos de disciplinas ligadas à História das Ciências ou à evolução dos conceitos científicos, que podem contribuir como instrumentos no aprendizado, para revelar a forma dinâmica e não acabada, não limitada a uma disciplina, com que a ciência se desenvolve.

A História da Ciência, no ensino de ciências, tem sido usada, seja por professores seja nos livros didáticos, como uma historiografia de fatos curiosos, superficiais quanto aos conceitos científicos. O mesmo acaba por ocorrer com a atividade de resolução de problemas (LIN *et al.*, 2002). Há muito se sabe que é comum professores e estudantes aprenderem a resolver problemas por meio da aplicação de algoritmos, tendo dificuldade quando apresentados a questões conceituais (GABEL *et al.*, 1984; SÁNCHEZ RON, 1988; NAKHLEH & MITCHELL, 1993). A grave consequência dessa mecanização na resolução de problemas é que professores de ciências tendem a assumir a habilidade de aplicação de algoritmos como indicativos de competência científica (NAKHLEH, 1993).

Todo e qualquer estudo da ciência, seja histórico ou epistemológico, é um recorte baseado em critérios, estejam eles explícitos ou não (FIEDLER-FERRARA & MATTOS, 2002). No caso do problema do demônio de Maxwell, em particular sua “exorcização”, o recorte feito é uma combinação de critérios epistemológicos, axiológicos e ontológicos. O problema tem aspectos epistemológicos no sentido de que trata do limite das teorias da física, exigindo uma abordagem intradisciplinar, cujo sentido se refere ao fato de sua solução depender de diferentes teorias dentro de uma mesma disciplina, a Física. Têm aspectos axiológicos, no sentido de que há definição das finalidades para o desenvolvimento do conhecimento em questão. Os aspectos ontológicos são caracterizados no sentido de que a natureza dos problemas não está clara em determinados momentos ao longo do tempo em sua evolução histórica.

Do ponto de vista do Ensino de Ciências, as questões apresentadas com o problema do demônio de Maxwell, podem ser também compreendidas de formas diferentes em função do recorte realizado sejam eles interdisciplinares ou intradisciplinares. Tais formas de representar os recortes possíveis em questões dessa natureza podem ser encontradas em discussões sobre currículos e livros didáticos (ver, por exemplo, FIEDLER-FERRARA & MATTOS, 2002). O exemplo aqui apresentado mostra como os conceitos tomam forma concreta ao serem resolvidos problemas que incluam montagens experimentais e análises rigorosas que revelam as dificuldades de medida das grandezas envolvidas. Os conceitos de entropia, informação e probabilidade têm caráter concreto no exercício de explicitação do demônio de Maxwell. O demônio não é apenas idéia, pode ser compreendido como um sistema físico.

As questões aqui abordadas têm tido desdobramentos interdisciplinares, que podem nos levar a novas perguntas, como por exemplo: quais são os princípios físicos que podem descrever o processamento de informações fenotípicas e genotípicas em seres vivos? Quais processos “termo-informáticos” estão relacionados com o aprendizado dos seres vivos? Questões que vêm sendo tratadas por disciplinas criadas recentemente, em particular pela Ciência Cognitiva, pela Psicologia Evolutiva e pela Genética Molecular (GARDNER, 1985; HERTZ *et al.*, 1991; SCHNEIDER, 1996). Este pequeno exercício de ampliação do tema, mostra a infinidade de recortes possíveis do objeto estudado, tornando clara a riqueza conceitual encontrada nos exemplos de situações em limites das teorias, como é o caso do demônio de Maxwell.

Referências

ADÚRIZ-BRAVO, A. *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. 2001. Tese (Doutorado)-Universitat Autonoma de Barcelona, Barcelona, 2001.

_____. *et al.* Three aspects when teaching the philosophy of science to science teachers. In: **ESERA Conference**, 4, 2003, Noordwinjkrhout. Disponível em: www1.phys.uu.nl/esera2003/programme/pdf%5C012S.pdf. Acesso em: 13 dez. 2003.

ALBUQUERQUE, I. F. M. **Entropia e a quantização da energia**: cálculo termodinâmico de Planck. 1989. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

AURANI, K. M. A probabilidade no início das pesquisas de Boltzmann sobre a Segunda Lei da Termodinâmica. In: VIDEIRA, A. A.; SALINAS, S. (Org.). **A cultura física**: contribuições em homenagem a Amelia Imperio Hamburger. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2001. p. 41-50.

BENETT, C. H.; LANDAUER R. The fundamental physical limits on computation. **Scientific American**, New York, p. 38-46, jul. 1985.

_____. Logical reversibility of computation. **IBM Journal of Research and Development**, New York, v. 17, p. 525-532, 1973.

_____. The thermodynamics of computation: a review. **International Journal of Physics**, v. 21, n. 12, 1982.

BENETT, C. H. *et al.* Strengths and weaknesses of quantum computing. **Siam Journal on Computing**, Philadelphia, v. 26, n. 5, p. 1510-1523, 1997.

BOHR, N. Light and life revisited. **International Council for Science Review**, v. 5, p. 194, 1963.

BRILLOUIN, L. Life, thermodynamics, and cybernetics. **American Scientist**, New Haven, n. 37, 1949.

BRILLOUIN, L. **Science and information theory**. 2. ed. New York: Academic Press, 1962.

BUB, J. Maxwell's Demon and the thermodynamics of computation. **Studies in History and Philosophy of Science: Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, Elmsford, v. 32, n. 4, p. 596-579, 2001.

BUCHWALD, J. Z. **From Maxwell to microphysics: aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century**. Chicago: University of Chicago Press, 1985.

COLLIER, J. D. Two faces of Maxwell's Demon reveal the nature of irreversibility. **Studies in History and Philosophy of Science**, Elmsford, v. 21, p. 257-268, 1990.

CRICK, F. H. C. The structure of the hereditary material. In: PIEL, G; FLANAGAN, D.; SVIRSKY, L. (Ed.) **The physics and chemistry of life**. New York: Simon and Schuster, 1955. p. 118-133.

DARRIGOL, O. Statistical and combinatorics in early quantum theory. **Historical studies in the physical and biological sciences**, Los Angeles, v. 19, 1988.

DELBRUCK, M. **Mente y matéria: ensayo de epistemología evolutiva**. Madrid: Alianza, 1986.

DEMERS, P. Les Démons de Maxwell et la théorie des quanta. **Canadian Journal of Research**, Ottawa, v. 3, n. 23, p. 47-55, 1945.

EARMAN, J.; NORTON, J. D. Exorcist XIV: the wrath of Maxwell's demon, part I, from Maxwell to Szilard. **Studies in the History and Philosophy of Modern Physics**, v. 29, p. 435-471, 1998.

FIEDLER-FERRARA, N.; MATTOS, C. R. Seleção e organização de conteúdos escolares: recortes na pandisciplinaridade. In: ENCONTRO DE PESQUISADORES EM ENSINO DE FÍSICA, 8, 2002, São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBF, 2002. Disponível em: <http://www.sbf1.if.usp.br/eventos/epf/viii>. Acesso em: 25 dez. 2002.

FLAMM, D. **Ludwig Boltzmann a pioneer of modern physics**. Disponível em: <http://www.if.usp.br/physics-9710007.1998>. Acesso em: 04 abr. 2000.

FREDKIN, E.; TOFFOLI, T. Conservative logic. **International Journal of Theoretical Physics**, New York, v. 21, p. 219-253, 1982.

GARDNER, H. **Mind's new science: a history of the cognitive revolution**. New York: Basic Books, 1985.

GORDON, L. G. M. The Decrease in entropy via fluctuations. **Entropy**, v. 6, p. 38-49, 2004.

_____. M. Smoluchowski's trapdoor. **Entropy**, v. 6, p. 96-101, 2004

HERTZ, J.; KROGH, A.; PALMER, R. G. **Introduction to the theory of neural computation**. Reading: Addison-Wesley, 1991.

IMPÉRIO-HAMBURGER, A. Compreensão e limites da teoria física: o conhecimento da natureza em Isaac Newton. **Publicações Ifusp/P-1280**, 1997.

_____. Epistemological and historical studies of physics concepts for science teaching. In: HEGGET, D. E. (Ed.). **More history and philosophy of science for science teaching**. Florida: University Florida Press, 1990.

_____. A evolução dos conceitos nas teorias da física como alternativa de ensino de história da ciência. **Revista da Sociedade Brasileira de Historia da Ciência**, v. 1, p. 32-38, 1989. Número Especial.

ISING, G. Les Fluctuation dans les Appareil de Mesures. **Philosophical Magazine**, London, v. 6, n. 51, p. 827, 1926.

JAYNES, T. E. The evolution of Carnot's principle. In: ERICKSON, G. J.; SMITH, C. R. (Ed.). **Maximum-Entropy and bayesian methods in science and engineering**. Dordrecht-Holland: Kluwer Academic Publishers, 1996. v. 2.

JENSEN, M.; FINLEY, F. Teaching evolution using historical arguments in a conceptual change strategy. **Science Education**, New York, v. 79, n. 2, p. 147-166, 1995.

KAK, S. C. **Information, physics and computation**: technical report ECE-95-04. Louisiana: Louisiana State University, 1995.

KINCHIN, A. I. **Mathematical theory of information**. New York: Dover Publications, 1957.

KLEIN, M. J. Maxwell, his demon, and the second law of thermodynamics. **American Scientist**, New Haven, v. 58, p. 84-97, 1970.

KUHN, T. S. **Estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 1975.

LEFF, H. S.; REX, A. F. **Maxwell's demon**: entropy, information computing. Princeton: Princeton University Press, 1990.

LIMA, N. E.; HENRIQUES, V. B.; PROCÓPIO A. J. Transporte iônico e processamento de informação num demônio de Maxwell de interesse biológico. In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 1994. p.17.

LIN, H. The effectiveness of teaching chemistry through the history of science. **Journal of Chemical Education**, Easton, v. 75, n. 10, p. 1326-1330, 1998.

_____; HUNG, J.; HUNG, S. Using the history of science to promote students' problem-solving ability. **International Journal of Science Education**, London, v. 24, n. 5, p. 453-464, 2002.

MATTHEWS, M. **Science teaching**: the role of history and philosophy of science. New York: Routledge. 1994.

MATTOS, C. R. **Entrando na era do ensino de entropia**. 1991. 159 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

_____. **Uma contribuição dos modelos físicos da aprendizagem para o ensino de ciências**. [S.l.: s.n.], 2004.

MAXWELL, J. C. **Theory of heat**. New York: Am. Press, 1972.

NIELSEN, H.; THOMSEN, P. V. History and philosophy of science in physics education. **International Journal of Science Education**, London, v. 12, n. 3, p. 308-316, 1990.

OLIVEIRA, M. **Átomo**: da conceituação indutiva grega à realização quantitativa européia. 1993. 117 f. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SÁNCHEZ RON, J. M. Usos y abusos de la historia de la física en la enseñanza. **Enseñanza de las ciencias**, Barcelona, v. 6, n. 2, p. 179-188, 1988.

SCHNEIDER, T. D. New approaches in mathematical biology: Information theory and molecular machines. In: CHELA-FLORES, J.; RAULIN, F. (Ed.). **Chemical evolution: physics of the origin and evolution of life**. Dordrecht Holland: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 313-321.

_____. Sequence logos, machine/channel capacity, Maxwell's demon, and molecular computers: a review of the theory of molecular machines. **Nanotechnology**, New York, v. 5, p. 1-18, 1994.

SCHRÖDINGER, E. **What is Life?** Cambridge: Cambridge University Press, 1944.

SHANNON, C.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication**. Illinois: University Illinois Press, 1949.

SOLOMON, J. *et al.* Teaching about the nature of science through history: action research in the classroom. **Journal of Research in Science Teaching**, New York, v. 29, n. 4, p. 409-421, 1992.

SREDNIAWA, B. **Marian Smoluschski's collaboration with experimentalists in the investigations of brownian motion and density fluctuations**: pre-print TPJU-6/91. Cracow: Jagellonian University, 1991.

SZILARD, L. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. **Behavioral Science**, Baltimore, v. 9, p. 301-310, 1964.

WIENER, N. **Cibernética ou o controle e comunicação no animal e na máquina**. São Paulo: Edusp, 1970.

ZUREK, W. H. Maxwell's demon, Szilard's engine and quantum measurements. In: **Los Alamos arXiv:quant-ph/0301076**. [S.l.], 2003.
Disponível em: http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0301/0301076.pdf. Acesso em: 2 fev. 2003.