



FABIO CHALUB  
Universidade  
Nova de Lisboa  
chalub@fct.unl.pt

## AMANHÃ SERÁ OUTRO DIA

Entre as muitas frases que são comumente atribuídas ao genial físico Albert Einstein, uma diz que "dentre todas as teorias da física, a única que não será descartada no futuro será a termodinâmica".

Que será que significa dizer que uma teoria física não será jamais ultrapassada? Será então que a termodinâmica, que começa com o estudo das máquinas térmicas, não é propriamente ciência? Afinal, todo o conhecimento científico pode ser um dia provado errado.

Já na época de Einstein, a termodinâmica era muito mais do que o estudo das máquinas a vapor. Os trabalhos de Ludwig Boltzmann, no século XIX, que aplicou ao estudo dos gases tanto a mecânica de Newton como a teoria das probabilidades, levaram a uma maior compreensão da dinâmica dos gases, e, a partir daí, das máquinas térmicas.

Normalmente – por razões históricas e pedagógicas –, a termodinâmica é sintetizada em quatro leis. A "lei zero" informa que se um corpo está em equilíbrio térmico com outros dois (isto é, não transfere nem recebe calor), então estes dois corpos também estarão em equilíbrio entre si. Isto implica que a capacidade de receber ou transferir calor poderá ser quantificada por um único número, a que chamamos de *temperatura*. No passado houve muita confusão entre a sensação de calor e o conceito de temperatura. Aliás, uma das primeiras definições da palavra "quente" é "aquilo que causa a sensação de calor". Um simples experimento, antigamente visto como parte da física mas que hoje está mais ligado à psicologia sensorial, mostra a falsidade desta definição. Coloque uma mão em água fria, outra em água quente. Após alguns minutos, retire as mãos dos recipientes originais e coloque-as num único recipiente contendo água morna e verá que a sensação de calor não é objetiva, sendo diferente em cada mão.

Estabelecido o que acontece quando estão em contacto

dois corpos à mesma temperatura, a pergunta seguinte é o que ocorre quando eles **não** estão em equilíbrio térmico. Neste caso, haverá a transferência de calor do de maior temperatura para o de menor temperatura, de acordo com duas leis: a primeira lei da termodinâmica afirma existir uma nova quantidade, chamada *energia*, que é sempre conservada nos processos que não interagem com o exterior (isolados), enquanto a segunda lei afirma que uma outra quantidade, a que chamamos *entropia*, que sempre cresce nas mesmas condições.

Há ainda uma terceira lei que impõe restrições ao comportamento da entropia quando nos aproximamos da temperatura conhecida como *zero absoluto* (aproximadamente  $-273^{\circ}\text{C}$ ).

O conceito central da termodinâmica, e que é efetivamente diferente de todo o resto da física, é a entropia. Provavelmente era disto que Einstein falava ao considerar que a termodinâmica sempre resistiria aos avanços da ciência. No entanto, um conceito necessário em qualquer teoria física, atual ou futura, pode facilmente ser classificado como matemático, não como físico.

Discutir se a entropia é física ou matemática está evidentemente fora dos objetivos deste texto; aceitemos que é um conceito que transita bem entre estas áreas. Não é o único, evidentemente. Há um grande número de leis físicas que estabelecem uma igualdade entre conceitos do mundo real e construções abstratas, nomeadamente geométricas.

Voltemos então à entropia. Há três definições importantes: a original, a partir do estudo das máquinas térmicas, feita por Rudolf Clausius entre 1855 e 1865; a estatísti-

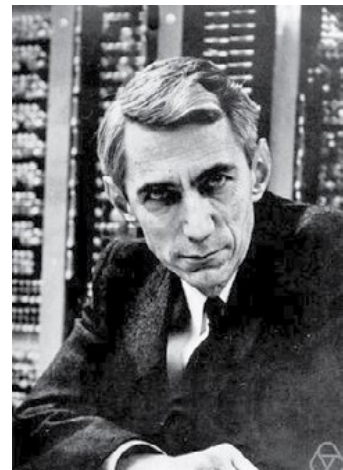


Figura 1. Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann e Claude Shannon. Os autores dos três conceitos de entropia que discutiremos neste texto. Fonte: Wikimedia Commons.

ca, de Ludwig Boltzmann, publicada em 1877, e finalmente a baseada na teoria da informação, de Claude Shannon, anunciada em 1948. Veja uma revisão crítica em [1] e veja a figura 1.

Vamos apresentar brevemente estes conceitos em ordem inversa. Para Shannon, grosso modo, a entropia mede a quantidade de possibilidades compatíveis com o que já sabemos. À medida que ganhamos informações, as possibilidades – ou seja, a incerteza – reduzem-se. A entropia mede a informação e definimo-la, informalmente, como o negativo da "quantidade de perguntas de resposta sim ou não que nos permitem conhecer exatamente o estado de um determinado sistema". Quanto mais perguntas são necessárias, menos informações temos, portanto maior é a nossa ignorância do sistema e menor a entropia. (Maior ou menor entropia depende da escolha de um sinal na definição matemática de entropia, e isto não é feito de forma consistente na literatura científica – de qualquer maneira, o que é importante é que esta seja monótona no tempo, sempre crescente ou sempre decrescente, indicando uma assimetria entre o passado e o futuro. Tentaremos ser consistentes neste texto.)

Imagine o seguinte problema simples: eu penso num número entre 1 e  $1024 = 2^{10}$ . Quantas perguntas terá o leitor de fazer, no mínimo, para concluir o número que pensei? Bastarão dez perguntas, pois em cada uma poderá dividir o grupo em dois ("é maior do que 512?" etc.).

No entanto, eu posso passar uma informação: "o número é par". Automaticamente, o número de perguntas necessárias diminui em 1. Dizemos que eu dei "1 bit" de informação, e a entropia aumentou uma unidade. Neste

caso, a palavra entropia tem o significado de incerteza. À medida que aumenta a informação disponível (quando as perguntas são respondidas), diminui a incerteza, aumenta a entropia. Para o leitor interessado, uma bela discussão não técnica dos conceitos desenvolvidos por Shannon pode ser encontrada em [2].

A formulação de Boltzmann não é muito diferente. Para Boltzmann, a entropia mede a quantidade de microestados de um dado sistema, associado ao macroestado do mesmo.

Repetiremos esta ideia com maior cuidado. Boltzmann queria compreender os resultados do Clausius e percebeu que isto decorreria da aplicação das leis da mecânica newtoniana a todos os constituintes de um gás. No entanto, tipicamente um gás é formado por  $10^{23}$  moléculas, um número tão grande que mesmo os computadores de hoje não são capazes de modelar. Portanto, Boltzmann aplicou as técnicas da estatística para perceber uma série de características médias desta enorme quantidade de pequenos constituintes.

Contudo, ao estudar estas propriedades médias, Boltzmann não estava a limitar a aplicabilidade do seu estudo. Na verdade, ninguém está interessado em saber onde está cada molécula de um gás. O que nos interessa saber são características macroscópicas, como a pressão do mesmo ou o volume que ele ocupa. Não me interessa saber quais ou quantas moléculas de oxigênio eu estou a respirar. Só quero que ele tenha pressão suficiente para chegar aos pontos mais profundos do pulmão e ser distribuído pelo corpo.

Assim, enquanto nós olhamos apenas para o *macroestado* (propriedades macroscópicas observáveis e de grande interesse), a mecânica newtoniana descreve o comporta-

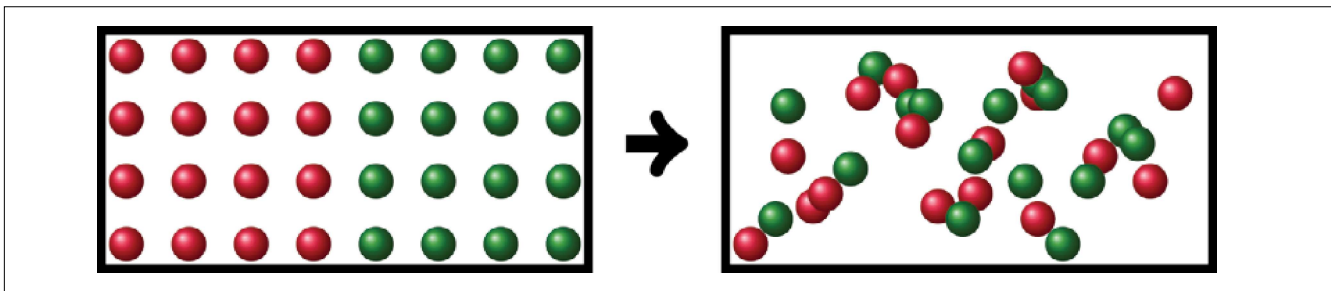


Figura 2. Começamos com uma situação altamente ordenada, que nos faz pensar que "alguém" (alguma inteligência) preparou a condição inicial, em que dois gases estão perfeitamente separados, com moléculas dispostas em pontos altamente simétricos. À medida que o tempo passa, o gás evolui para uma situação em que nenhum padrão é óbvio. Há muitas situações compatíveis com o macroestado da direita, mas poucas – talvez até apenas uma – compatíveis com a situação da esquerda.

mento de cada molécula (propriedades microscópicas não observáveis e desinteressantes). Diversos microestados podem conduzir ao mesmo macroestado; a entropia mede a incerteza que temos sobre o microestado, a partir do conhecimento apenas do macroestado.

Uma importante diferença da abordagem de Boltzmann, relativa àquela de Shannon, é que neste caso temos estados que se alteram no tempo de acordo com certas leis físicas. Esta alteração dá-se com alterações dos macroestados e dos microestados. No entanto, a evolução dá-se de forma que, à medida que o tempo passa, um sistema evolui para macroestados que têm um maior número de microestados compatíveis. A entropia aumenta com o passar do tempo.

Esta é a primeira lei física que estabelece uma direção preferencial para o tempo. Preferencial, pois a entropia aumenta estatisticamente. Um evento raro pode fazer com que ela decresça. De leis simétricas entre o passado e o futuro – como são as leis de Newton –, é possível conseguir uma assimetria apenas por considerar uma quantidade enorme de agentes a interagir. Este resultado assombrou e, em larga medida, continua a assombrar o mundo. Veja a figura 2.

Do ponto de vista prático, forneceu a explicação que Clausius queria. Clausius percebeu que os estudos sobre eficiência de máquinas térmicas do seu predecessor francês, Sadi Carnot, levavam à construção de uma grandeza, que ele chamou de entropia, com algumas propriedades interessantes: depende apenas do macroestado do sistema<sup>1</sup>, nunca decresce, qualquer que seja o ciclo, e a sua taxa de crescimento mede a eficiência do ciclo. A entropia de Clausius não é apenas uma construção teórica e pode ser medida em laboratório. Quando consideramos todos os

efeitos de uma máquina térmica, a entropia do Universo (ou, melhor, do sistema fechado que inclui a máquina e o ambiente em que esta funciona, trocando energia) irá sempre aumentar, sendo o seu aumento relacionado com a eficiência da máquina, ou seja, quanto da energia é efetivamente convertida em trabalho. A entropia de Boltzmann e de Clausius é discutida em muitos livros de física estatística, como [3].

Por fim, é importante chamar a atenção para o facto de que o conceito de entropia não é, nem nunca foi, sinónimo de desordem. Apesar de esta utilização ser muito comum na linguagem corrente, não tem nenhum paralelo na sua utilização técnica.

E porquê toda esta discussão? Ora, a segunda lei da termodinâmica estabelece uma *seta do tempo*. Difere o passado do futuro. Após cerca de 15 anos, está na hora de apontar para o futuro e seguir em frente. Este será o meu último texto na coluna Na Linha de Frente da *Gazeta*. Mas estarei por aí, em novos desafios. Um abraço a todos os leitores e leitoras!

## REFERÊNCIAS

- [1] Arie Ben-Naim. "Entropy and Information Theory: Uses and Misuses". *Entropy* 21, 1170 (2019).
- [2] James Gleick. *Informação*. Temas e Debates, 2012.
- [3] F. Reif. *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*, Waveland Press, 2009.

<sup>1</sup> A formulação mais usual é dizer que depende do estado, mas não da história do sistema; a história, no entanto, está codificada no microestado.