

# Reflexões sobre a Segunda Lei da Termodinâmica e Entropia

*Prof. Dr. Bruno Souza Carmo – PME – EPUSP*

Historicamente, 2ª Lei da Termodinâmica surgiu no sentido de determinar o quão eficiente um ciclo a vapor poderia ser, porém o seu estabelecimento acabou por levar à **criação de um novo ramo da Física, com inúmeras aplicações**. Esta Lei tem fundamental importância em tópicos que vão desde a cinética dos gases até a estrutura do Universo, e tem aplicação na análise do comportamento da matéria em tanto nos processos mais simples, inanimados, quanto nos processos mais complexos que ocorrem nos organismos vivos.

Analisemos dois aspectos conceituais a respeito da 2ª Lei da Termodinâmica. **O primeiro aspecto é que a 2ª Lei dita em que direção uma certa transformação ocorre de forma espontânea**. Neste sentido, a 2ª Lei pode ser entendida como uma condição de contorno, ou como uma restrição à 1ª Lei. É interessante notar que a 2ª Lei é a única lei da Física Clássica que é expressa matematicamente como uma **desigualdade. Não é uma lei de conservação**.

**O segundo aspecto diz respeito à limitação da eficiência de processos, ditada pela 2ª Lei**. Um enunciado alternativo da 2ª Lei é “Em qualquer transformação de uma forma de energia em outra, energia ‘útil’ é perdida (perde-se a oportunidade de realizar trabalho)”. Isto tem uma implicação direta em Ecologia / Ciências Biológicas: do ponto de vista energético, é mais eficiente ser vegetariano, pois a produção de entropia é muito maior no processo produtivo da carne animal, já que a energia tem que passar por uma série de transformações ao longo do processo, e em cada uma delas perdas ocorrem.

Assim como **a formulação da 1ª Lei leva à elaboração do conceito de energia, a formulação da 2ª Lei leva à elaboração do conceito de entropia**. Entretanto, embora essa simetria de associação lei-grandeza leve a crer que o conceito de entropia vai parecer natural para a maioria dos estudantes, já que o conceito de energia o é, não é isso que é verificado. Por isso que é importante discorrer sobre o que fisicamente é a entropia.

**Em termos de termodinâmica estatística, entropia está relacionada com probabilidade**. Um estado de maior entropia é um estado mais provável. Ser menos provável não significa necessariamente ser impossível (ex: mistura com 10 moléculas vs mistura com muitas moléculas). As propriedades macroscópicas de um sistema estão relacionadas com uma média das propriedades da moléculas que compõe a matéria do sistema. A mesma propriedade macroscópica pode resultar de numerosos conjuntos diferentes de estados microscópicos. A chamada lei de Boltzmann expressa a entropia pela equação:

$$S = k \log W$$

onde  $S$  é a entropia do sistema,  $W$  é o número de microestados possíveis que resultam no macroestado em questão, e  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K é a constante de Boltzmann. A ideia da relação do número de microestados com o macroestado resultante pode ser explicado com um exemplo de baralho (conjunto de 6 cartas: 2, 3, 4; J, Q, K; em duas pilhas diferentes [2, 3, 4] e [J, Q, K] (macroestado), com  $(3!)^2 = 36$  microestados possíveis; em contraste com uma pilha somente (macroestado), com  $6! = 720$  microestados possíveis). Este exemplo também mostra a natureza aditiva que a entropia tem em sistemas isolados, mas que não se conserva quando os sistemas são unidos.

Em termos de termodinâmica clássica, **a entropia pode ser entendida como uma medida da dispersão de energia**. A energia sempre tende a se dispersar e difundir, mudanças espontâneas são sempre acompanhadas de dispersão de energia. Esta dispersão leva à eliminação de gradientes de energia que são necessários para a realização de trabalho.

Tradicionalmente a ideia de entropia tem sido vinculada à desordem, caos e aleatoriedade. Entretanto, este tipo de associação é perigosa por permitir interpretações não acuradas, devido à multiplicidade de sentidos que estes termos tem. É sempre importante ressaltar que **o conceito de**

**entropia está intimamente ligado ao conceito de energia.** A 2ª Lei não dá suporte algum ao uso do conceito de aumento de entropia para outras interpretações (exemplo: falar que uma escrivaninha ficará cada vez mais desarrumada se nenhum esforço for feito no sentido de deixá-la arrumada).

Todavia, isso não quer dizer que a 2ª Lei não tenha consequências profundas em muitos fenômenos da natureza diferentes do tradicional sistema, volume de controle ou ciclo normalmente estudados em cursos de Termodinâmicas. Por exemplo, a existência de vida implica em processos de transformação de energia e, para manter esses processos ocorrendo, é preciso controlar a dispersão de energia, ou seja, controlar o aumento da entropia. Para isso, é preciso despende mais energia. **A morte pode ser entendida como a perda da habilidade de “lutar” contra o curso natural da 2ª Lei.** A morte leva ao decaimento, e o decaimento é irreversível.

Um outro aspecto interessante, o aumento de entropia pode ser entendido como a **seta do tempo**, ou seja, define a direção do tempo. A entropia é a única grandeza física que implica em uma direção de progresso. A diferenciação do tempo em relação às outras dimensões se dá por conta da 2ª Lei.

Vale também refletir em cima da seguinte linha de raciocínio: “Se a 1ª Lei é válida, e foi sempre válida, então o universo sempre existiu. Se a segunda lei é válida, e foi sempre válida, então, se o universo sempre existiu, neste momento certamente ele teria atingido a entropia completa (ou máxima).” Porém, isto não aconteceu. Existem ao menos duas explicações possíveis: (1) as leis da Termodinâmica não foram sempre válidas, ou seja, **o universo teve um início**; (2) a entropia máxima também aumenta com o tempo.