

## As ideias iniciais de Clausius sobre entropia e suas possíveis contribuições à formação de professores

### *Clausius's initial ideas about entropy and their possible contributions to teacher education*

KATYA MARGARETH AURANI

Universidade Federal do ABC | UFABC

155

**RESUMO** Através da análise dos resultados de Carnot publicados em 1824, Clausius estabelece as duas leis da termodinâmica e a definição formal da entropia, em 1867. Mostramos que o ponto de partida de Clausius foi uma suposição que é desconhecida atualmente; segundo ele existiria nos ciclos reversíveis uma equivalência das transformações. Ele elaborou sua suposição inicial em forma de um teorema, que ele chamou de “teorema da equivalência das transformações”. Quantificando essa equivalência, no ciclo reversível, ele estabeleceu inicialmente valores equivalentes para as transformações que hoje reconhecemos como sendo os valores da entropia associados às transformações. A equivalência das transformações constitui uma compreensão original do conceito de entropia por Clausius, que é totalmente coerente com o quadro conceitual moderno da termodinâmica. Discutimos algumas contribuições dessas concepções para a formação de professores, e algumas ideias de Amélia I. Hamburger, e de Michael R. Matthews, sobre a utilização da história e filosofia da ciência na formação de professores.

**Palavras-chave** entropia – história da termodinâmica – formação de professores.

**ABSTRACT** By analyzing Carnot's results published in 1824, Clausius establishes the two laws of thermodynamics and the formal definition of entropy in 1867. We show that Clausius's starting point is an assumption which is currently unknown; according to him there is an equivalence of transformations in the reversible cycles. He elaborated his initial assumption in the form of a theorem, which he called the “theorem of equivalence of transformations.” By quantifying such equivalence, he established equivalent values for the transformations, which we now recognize as the values of entropy associated with the transformations. The idea of equivalence of transformations constitutes a unique understanding of the concept of entropy by Clausius, and that it is wholly consistent with the modern conceptual framework of thermodynamics. We discuss some contributions of these conceptions to teacher education, and some ideas by Amelia I. Hamburger and Michael R. Matthews on the use of history and philosophy of science in teacher education.

**Keywords** entropy – history of thermodynamics – teacher education.

## Introdução

Em 1824, Carnot publica o texto em que desenvolve uma análise original do funcionamento da máquina a vapor. Isso porque não se preocupa com melhorias de caráter técnico como se fazia na época, mas se propõe a determinar os princípios envolvidos na produção da potência motriz do fogo. Ele cria o que conhecemos hoje como o ciclo de Carnot, e enuncia o seguinte princípio: "a produção de calor sozinha não é suficiente para dar origem à potência motriz do fogo; é necessário que haja o frio; sem isso o calor seria inútil."<sup>1</sup> Nesse princípio, reconhecemos o que hoje chamamos de 2ª lei da termodinâmica. Entretanto, Carnot ainda utilizava a antiga teoria do calórico em seus desenvolvimentos.

Clausius toma conhecimento dos resultados de Carnot através dos trabalhos de Clapeyron e de Lorde Kelvin. Em uma sequência de trabalhos publicados entre 1854 e 1867, vai investigar as transformações que ocorrem no ciclo de operações definido por Carnot, chegando então a estabelecer a definição do conceito de entropia e o enunciado das duas leis da termodinâmica.<sup>2</sup>

Discutimos a seguir os primeiros passos das investigações de Clausius, evidenciando suas primeiras concepções sobre as transformações que ocorrem nos ciclos reversíveis, e que o auxiliaram no estabelecimento do formalismo envolvido nos trabalhos acima mencionados.

Na próxima seção, trataremos da coerência que Clausius estabelece entre o trabalho de Carnot de 1824 e as descobertas ligadas à conservação da energia. Nas três seções seguintes, vamos analisar os desenvolvimentos e considerações de Clausius sobre a equivalência das transformações. Em seguida, discutiremos a ideia da equivalência das transformações como uma nova compreensão da entropia. Finalmente, será discutida a relevância dessa ideia para o ensino do conceito de entropia.

156

## A coerência entre os resultados de Carnot e as descobertas ligadas à conservação da energia

Clausius inicia suas investigações em 1854, buscando uma coerência entre os resultados de Carnot e as descobertas relacionadas à conservação da energia. Essas descobertas foram feitas entre 1842 e 1847, por Mayer, Joule e Helmholtz, entre outros.<sup>3</sup>

Segundo a teoria do calórico, na máquina a vapor, o calórico desenvolvido na fornalha era absorvido pelo vapor, provocava o movimento do pistão, e depois era liberado para a água fria do condensador. Assim, de acordo com essa teoria, a mesma quantidade de calórico que era absorvida na fornalha, era posteriormente perdida para a fonte fria. O calórico absorvido na fornalha chegava intacto à água do condensador.

Na coerência estabelecida por Clausius fica claro que, da quantidade de calor recebida da fonte quente, uma parte deve se transformar em trabalho, enquanto uma outra parte é perdida para a fonte fria. Assim, a quantidade de calor perdida para a fonte fria não é igual àquela absorvida da fonte quente. Nas palavras de Clausius:

"Em todos os casos onde uma quantidade de calor é convertida em trabalho, e onde o corpo, efetuando essa transformação, retorna no final às suas condições iniciais, uma outra quantidade de calor deve ser necessariamente transferida de um corpo mais quente para um corpo mais frio; e a magnitude desta última quantidade de calor, em relação à primeira, depende somente das temperaturas dos corpos entre os quais o calor passa, e não da natureza do corpo efetuando a transformação."<sup>4</sup>

A partir daí, Clausius vai se propor a quantificar a relação entre as quantidades de calor envolvidas e as temperaturas utilizadas na produção de trabalho a partir do calor. Em suas exposições, utilizará um princípio fundamental que hoje conhecemos como a formulação de Clausius para a segunda lei da termodinâmica:

*O calor não pode nunca passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente sem que ocorram ao mesmo tempo mudanças associadas. Tudo que sabemos em relação à troca de calor entre dois corpos de temperaturas diferentes confirma isso, pois o calor em toda parte manifesta uma tendência em igualar diferenças de temperatura, e conseqüentemente em passar numa direção contrária, isto é, do corpo mais quente para o mais frio. Sem explicações adicionais, conseqüentemente, a veracidade do princípio será garantida.<sup>5</sup>*

## As transformações e sua equivalência

Clausius inicia sua análise do ciclo de Carnot identificando nele dois tipos de transformações. O primeiro tipo seria a transformação de calor em trabalho. O segundo seria o da transformação de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, que tem lugar quando o calor passa do corpo quente para o corpo frio.

Segundo Clausius, essas transformações podem se compensar, de forma que um processo circular se efetiva através delas sem que nenhuma mudança permanente seja introduzida no sistema. Por isso, Clausius diz que essas transformações podem ser encaradas como “fenômenos de mesma natureza”, e que elas são, portanto, equivalentes.<sup>6</sup>

Dito isso, o próximo passo é determinar os parâmetros da equivalência.

## O valor equivalente das transformações

Ainda no artigo de 1854, Clausius define os valores equivalentes associados às transformações. Ele enuncia assim o teorema da equivalência das transformações:

*Se a quantidade de calor  $Q$  da temperatura  $T$  é produzida a partir do trabalho, o valor equivalente dessa transformação é  $Q/T$ , e se a quantidade de calor  $Q$  passa de um corpo à temperatura  $T_1$  para um corpo à temperatura  $T_2$ , o valor equivalente da transformação é  $Q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$ , em que  $T$  é uma função da temperatura que é independente do tipo de processo por meio do qual a transformação é efetuada.<sup>7</sup>*

Esses valores têm sinais positivos ou negativos conforme a direção da transformação que eles representam: Clausius define-os arbitrariamente, supondo positivas as transformações de trabalho em calor e de calor de uma temperatura mais alta a calor de uma temperatura mais baixa. Essa é a origem do quociente  $Q/T$ , e portanto do conceito de entropia, no pensamento de Clausius: a equivalência das transformações. Logo no início de suas investigações, essa ideia é vista por ele como um teorema, o “teorema da equivalência das transformações”.

Portanto, ao expressar a quantificação da equivalência entre as transformações, ou a matematização dessa equivalência, é que o quociente  $Q/T$  adquire relevância no tratamento dos fenômenos do calor por Clausius.

Assim, num processo circular em que as trocas das quantidades de calor  $Q_1, Q_2, Q_3$ , são efetuadas com reservatórios de calor  $K_1, K_2, K_3$ , às temperaturas  $T_1, T_2, T_3$ , Clausius chega à expressão matemática do equivalente total das transformações envolvidas,

$$N = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} + \dots = \sum_i \frac{Q_i}{T_i}. \quad (1)$$

Se os corpos  $K_1, K_2, K_3$ , podem sofrer alterações de temperatura, então essa expressão deve relacionar quantidades infinitesimais de calor  $dQ$  e as temperaturas que o corpo possuía durante a troca. A somatória pode ser substituída por uma integral e a expressão adquire a forma mais geral:

$$N = \int \frac{dQ}{T}. \quad (2)$$

Utilizando seu princípio fundamental de que o calor não passa espontaneamente do corpo mais frio para o corpo mais quente, Clausius chega a uma restrição para o valor do equivalente das transformações nos processos circulares. Nos processos reversíveis<sup>8</sup>, “as transformações ocorridas devem cancelar umas às outras, de forma que a soma algébrica seja zero”. Se não fosse assim, argumenta Clausius, poderíamos separar as transformações que não se anulassem, da totalidade do processo, obtendo obviamente transformações de mesmo sinal; se elas fossem negativas, teríamos a possibilidade da passagem de calor do frio para o quente ou da conversão de calor em trabalho, sem nenhuma compensação; se o sinal das transformações não compensadas fosse positivo, bastaria inverter o processo, e teríamos transformações negativas não compensadas. Nos processos irreversíveis, a soma algébrica de todas as transformações só pode ser positiva, pois as transformações negativas não poderiam ocorrer sem compensação.

Essa demonstração evidencia que a existência de uma direção preferencial para as transformações implica que só ocorra reversibilidade no caso em que essas transformações se compensem.

## A formulação mais geral do teorema de equivalência das transformações

Até aqui, Clausius demonstra o teorema da equivalência das transformações para processos cíclicos. A extensão a processos que não são cíclicos é feita no artigo de 1862.<sup>9</sup> Nesse artigo, Clausius observa que terá de considerar o trabalho interno realizado nas mudanças de arranjo da substância, pois para processos que não são cíclicos, a substância não retorna ao estado inicial no final do processo.<sup>10</sup>

Clausius parte da equação que conhecemos hoje como a primeira lei da termodinâmica. Um corpo, ao receber uma certa quantidade de calor por um processo reversível, tem alterado o seu conteúdo de calor de um infinitesimal  $dH$ . Seja  $dL$  o trabalho interno e externo então realizado pelo calor na alteração de arranjo. Clausius escreve:

$$-dQ = dH + AdL,$$

ou

$$dQ + dH + AdL = 0, \quad (3)$$

em que  $A$  é o equivalente em calor de uma unidade de trabalho e  $-dQ$  representa o calor subtraído de outro corpo.

O conteúdo de calor,  $H$ , está presente em todos os desenvolvimentos posteriores de Clausius. Através desse conceito é que ele vai chegar à formulação matemática da segunda lei da termodinâmica. Num rodapé, Clausius observa que é possível uma formulação alternativa dessa última expressão, em que não aparece  $dH$ . Se separarmos o trabalho realizado em trabalho interno,  $dI$ , e trabalho externo,  $dW$ , temos

$$dQ + dH + AdL + AdW = 0. \quad (4a)$$

Podemos então introduzir a função  $U$  tal que  $dU = dH + AdI$ , escrevendo a equação (4a) na forma mais conhecida da primeira lei,

$$dQ + dU + AdW = 0. \quad (4b)$$

A equação (4b), incorporando a função  $U$ , é mais próxima das descrições atuais nos livros didáticos. Para chegar à formulação matemática da segunda lei e ao conceito de entropia, Clausius utilizou a expressão anterior, (4a), em que aparece a função  $H$ .

Para tratar os processos que não são cíclicos, Clausius julga necessário introduzir um novo conceito, o de desagregação, que diz respeito ao arranjo dos constituintes das substâncias, e que cresce por efeito do calor, à medida que aumenta a dispersão no corpo.

Com o intuito de determinar a expressão do conceito de desagregação, Clausius considera que é através dela que o calor realiza trabalho, e define as seguintes condições:

*Desde que o aumento da desagregação é a ação por meio da qual o calor realiza trabalho, tem-se que uma quantidade de trabalho deve manter uma razão definida com a quantidade pela qual a desagregação é aumentada; fixaremos conseqüentemente a determinação ainda arbitrária da magnitude de desagregação de tal forma que, a qualquer temperatura, o aumento da desagregação seja proporcional ao trabalho que o calor pode realizar nessa temperatura.<sup>11</sup>*

Com relação à dependência da desagregação com a temperatura, Clausius salienta que, se a mesma desagregação ocorre a temperaturas diferentes, o trabalho correspondente deve ser proporcional à temperatura absoluta.

Assim, se  $dZ$  traduz uma alteração infinitesimal da desagregação do corpo, e  $dL$  a correspondente quantidade infinitesimal de trabalho, Clausius estabelece

$$AdL = TdZ. \quad (5)$$

Substituindo essa expressão na equação (3), temos

$$dQ + dH + TdZ = 0,$$

que resulta em

$$\frac{dQ + dH}{T} + dZ = 0.$$

Essa equação pode ser finalmente integrada, fornecendo a expressão para uma mudança finita nas condições do corpo,

$$\int \frac{dQ + dH}{T} + \int dZ = 0. \quad (6)$$

Essa última expressão é a procurada equivalência entre as transformações para qualquer processo reversível. Nela aparece a integral de  $dZ$ , uma grandeza que não precisava ser considerada nos processos circulares, uma vez que neles as alterações de desagregação devem se compensar no final, de modo a retornar às condições iniciais; nesses processos circulares e reversíveis, essa integral se anula.

Em vista da introdução do novo termo, que pode ser visto como o valor equivalente de uma transformação, Clausius define um novo tipo de transformação, além das transformações de calor e trabalho, e de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura. O terceiro tipo diz respeito às alterações no estado de desagregação do corpo, ao arranjo interno do corpo.

Na expressão anterior,  $dH$  representa a variação na quantidade de calor do corpo, enquanto  $dQ$  representa o calor simultaneamente trocado com outros corpos. Clausius observa que a soma  $dQ + dH$ , quando positiva, representará a quantidade de calor obtida a partir do trabalho; quando negativa, a quantidade do calor que foi convertida sem trabalho.

A expressão (6) formaliza a compensação entre as transformações calor-trabalho e as alterações da desagregação. Ela se aplica a processos reversíveis.

O próximo passo é a extensão dessa conclusão a processos irreversíveis. Para tanto, é preciso considerar a restrição sobre a ocorrência de transformações negativas, já anunciadas para processos cíclicos, incluindo agora as alterações de desagregação.

A equação (5) expressa a relação entre uma mudança infinitesimal da desagregação e o trabalho realizado pelo calor, num processo reversível. No caso de uma operação irreversível, se a alteração na desagregação for positiva, e a força do calor realiza trabalho, não é todo trabalho que o calor pode realizar naquela temperatura que é efetuado; então, a alteração de desagregação pode ser maior que o valor calculado a partir do trabalho. Um exemplo é a expansão livre do gás perfeito; no final do processo, sua energia interna é a mesma e o gás não realiza trabalho, porém, para levá-lo de volta ao volume inicial, é necessário efetuar trabalho sobre ele; isso ocorre por causa da alteração no grau de dispersão do gás. Nesse caso limite, enquanto há um acréscimo de desagregação, o trabalho realizado pelo gás é nulo.

Se a alteração de desagregação é negativa, o trabalho se transforma em calor. Já que parte do trabalho realizado sobre o gás pode ser convertido em movimento molecular, o valor da desagregação pode ser menor em termos absolutos, mas ainda assim algebricamente continua sendo maior que o valor calculado a partir do trabalho. Assim, em ambos os casos,

$$dZ \geq \frac{AdL}{T}. \quad (7)$$

Dessa forma a equação (3) pode ser tomada como uma desigualdade para incluir processos irreversíveis,

$$\frac{dQ + dH}{T} + dZ \geq 0. \quad (8)$$

160

O princípio da equivalência das transformações pode então ser enunciado em sua forma mais geral, incluindo processos que não são cíclicos: "A soma algébrica de todas as transformações ocorrendo em qualquer condição de alteração pode ser somente positiva, ou, em caso extremo, igual a zero."<sup>12</sup> Numa forma mais compacta: "Transformações não compensadas só podem ser positivas."<sup>13</sup>

O teorema da equivalência das transformações representa assim a ideia fundamental da segunda lei, que norteou o pensamento de Clausius, e que o levou ao conceito de entropia: as transformações têm um sentido privilegiado.

## Uma compreensão original e coerente do conceito de entropia a partir da equivalência das transformações

A ideia da equivalência das transformações pode ser vista como uma compreensão original das transformações e do conceito de entropia no ciclo de Carnot, ou seja, a de que a entropia é a grandeza relacionada a uma equivalência das transformações envolvidas nos ciclos reversíveis. Clausius expressa essa equivalência através dos valores equivalentes das transformações, que, hoje sabemos, nada mais são do que os valores da variação da entropia associados a cada transformação. Assim, a equivalência das transformações se expressa através dos valores da entropia associados a cada uma delas nos ciclos reversíveis.

Podemos pensar também, a partir da ideia de equivalência de Clausius, que as transformações tendo lugar no ciclo de Carnot se compensam, de modo que o sistema é restaurado às condições iniciais no final de cada ciclo. A ideia da compensação está de acordo com a observação de Clausius de que as transformações têm a mesma natureza. A variação da entropia então, traduz também a compensação das transformações ocorridas.

Dessa forma, à transformação de calor em trabalho deve estar associada uma transformação de calor de uma temperatura alta a calor de uma temperatura baixa num ciclo reversível, de forma que elas se compensem e que a variação final de entropia seja zero. Pela mesma razão, à transformação de calor de uma temperatura mais baixa a calor de uma temperatura mais alta deve estar associada a transformação de trabalho em calor, num ciclo reversível. A necessidade dessa compensação entre as transformações decorre diretamente do fato de que as transformações têm um sentido privilegiado, ou seja da segunda lei da termodinâmica.

Já num processo irreversível, o valor da variação da entropia só poderia ser positiva, e nesse caso só poderiam ocorrer as transformações que segundo a suposição de Clausius têm valor equivalente positivo, ou seja, as transformações de calor em trabalho, de calor de uma temperatura mais alta a calor de uma temperatura mais baixa, e a de um aumento de desagregação. Podemos entender também que são essas as transformações que podem ocorrer sem compensação na natureza.

O teorema da equivalência das transformações foi muito importante no início das investigações de Clausius. A ideia da equivalência das transformações foi utilizada por ele como um guia no desenvolvimento do formalismo que o levou à definição da entropia, feita esta somente no artigo de 1867.<sup>14</sup> Ela pode ser vista como uma maneira própria de Clausius, de enunciar a segunda lei de forma quantitativa, antes da introdução do conceito de entropia.

Essa ideia aparece também em trabalhos de Clausius posteriores à definição da entropia e ao enunciado das duas leis da termodinâmica, na maneira como ele entendia os fenômenos.<sup>15</sup> Mas ela não aparece na apresentação moderna da termodinâmica.

## Possíveis contribuições para o ensino do conceito de entropia

Devo à profa. Amélia Império Hamburger (IFUSP), minha orientadora do mestrado, a ideia de explorar as contribuições de textos originais para a formação de professores. Ela coordenou um programa desenvolvido pelo grupo de alunos de pós-graduação que ela orientava, e que eram também, em sua maioria, professores de física no ensino médio. O programa era chamado de “Epistemologia da física para formação de professores-Programa de pesquisa”. Ela caracterizou assim os objetivos do programa:

*Visamos dar subsídios para cursos específicos para as Licenciaturas, isto é, disciplinas como ‘Instrumentação para o Ensino’ e ‘Prática de Ensino’, e outros cursos que apresentem conteúdos de física em variados níveis de ensino. Incluem-se aí cursos de “História e de Filosofia da Física” e de “Evolução dos Conceitos da Física”. Também é de interesse para outras ciências e seu ensino.*

*Os estudos que estão sendo realizados atualmente buscam visão histórica e filosófica do conteúdo a ser ensinado, procurando mostrar o papel desse conteúdo como mediatizador específico e imprescindível da interação professor aluno na situação da sala de aula.<sup>16</sup>*

A profa. Amélia coloca em evidência aí, a importância da visão histórica e filosófica para dar condições de que o conteúdo a ser ensinado, possa ser visto como aquilo que viabiliza a interação professor-aluno, ou seja, como um conjunto de elementos através dos quais essa interação pode se dar, um “mediatizador específico e imprescindível” dessa interação nas aulas.

Em outras palavras, os estudos filosóficos e históricos permitem que o professor, durante as aulas, interaja com o aluno através do conteúdo a ser ensinado, e que não faça por exemplo, simplesmente um repositório de fórmulas na lousa.

Michael Matthews, discutindo o papel de história e filosofia da ciência na formação de professores, diz o seguinte:

*Explicar por que uma proposição particular é considerada justificada - por exemplo, uma proposição sobre a herança genética, ou a conservação da energia, ou a valência do sódio –supõe uma epistemologia da ciência. Os professores que pensaram em algumas questões epistemológicas básicas serão muito mais capazes de explicar porque uma proposição é considerada justificada, do que aqueles que não tiveram formação filosófica. Em sala de aula, esta necessidade de ser capaz de explicar crença em proposições é crucial, considerando que os resultados experimentais e as observações das crianças estão geralmente tão em desacordo com aquilo em que ela são convidadas a acreditar.<sup>17</sup>*

Podemos entender que Matthews aponta a necessidade de estudos epistemológicos na formação de professores, para que estes sejam capazes de dialogar com seus alunos sobre questões epistemológicas envolvidas nos temas a serem tratados nas aulas. Desse ponto de vista, a formação filosófica do professor pode ser vista como um recurso valioso, que ele pode usar nas discussões com seus alunos, durante as aulas. O mesmo podemos dizer da formação em história da ciência.

No nosso caso, a questão que se apresenta é : de que forma as ideias de Clausius sobre entropia poderiam contribuir para o ensino desse conceito, pensando-se na formação de professores?

Uma grande dificuldade para a aprendizagem do conceito de entropia é que o ensino dele se restringe, na maioria dos livros didáticos, aos desenvolvimentos matemáticos. A ideia de uma equivalência das transformações nos sugere uma forma mais acessível de apresentar esse conceito, aparentemente tão abstrato e misterioso.

Achamos que a compensação entre as transformações pensada por Clausius torna mais concreta a relação entre as operações que ocorrem nos ciclos reversíveis. Segundo Clausius, no ciclo elaborado por Carnot, as transformações se compensam.

Clausius tratou de questões científicas primordiais para sua época. Enriqueceria a formação do professor tomar contato com as ideias que ele tinha de um conceito fundamental da termodinâmica, e que permitiu a ele chegar à definição formal desse conceito. Seria ainda útil ao professor o contato com essas ideias, na medida em que elas podem fornecer uma apresentação que não se limita à definição matemática . Elas podem propiciar uma compreensão conceitual mais profunda da termodinâmica. A partir do ponto de vista de Clausius, pode-se entender a variação nula da entropia como uma compensação entre as transformações ocorridas no processo.

Seria então profícuo propiciar aos futuros professores uma discussão sobre a definição de entropia que não se limite às questões matemáticas. Pode-se estimular que eles expressem visões próprias sobre as ideias de Clausius e conseqüentemente, sobre a entropia. Também, a discussão não sendo limitada aos aspectos formais, é possível abordar o conceito a nível de seu significado. Os futuros professores discutiriam diferentes maneiras de ver um conceito, e estariam mais preparados para abordar com seus alunos, as concepções que estes trazem para a sala de aula relacionadas a esse conceito. Assim, também estariam melhor instrumentalizados para buscar maneiras mais acessíveis de apresentar os conceitos científicos aos alunos, e novas maneiras de interagir com o aluno através do conteúdo a ser ensinado.

Desse ponto de vista, a discussão histórica não só contribuiria para a melhor compreensão do conceito de entropia, como prepararia melhor o professor para ensiná-lo.

## Conclusão

No início de suas investigações sobre a segunda lei e o conceito de entropia, Clausius supôs a existência de uma equivalência das transformações ocorrendo num ciclo reversível. Formulou a ideia em termos de um teorema que norteou os desenvolvimentos teóricos que o levariam à definição da entropia.

Nos processos cíclicos, apontamos que a equivalência concebida por Clausius se expressava por valores que hoje reconhecemos como sendo a variação da entropia associada às transformações. Transformação aqui deve incluir aquela de calor em trabalho (e vice-versa), e a de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, conforme as concepções de Clausius. Nos processos que não são cíclicos, Clausius teve que considerar ainda o valor equivalente de um outro tipo de transformação, a da desagregação do corpo, relacionada à alterações no arranjo interno do corpo.

A partir da ideia da equivalência de Clausius, podemos pensar que as transformações devem ser associadas de modo que possam se compensar num ciclo reversível, ou, em linguagem moderna, de forma que a soma dos valores de entropia seja zero nesse ciclo.

A equivalência das transformações representa uma nova forma de compreender a entropia e a segunda lei da termodinâmica. Poderia ser explorada no ensino do conceito de entropia se pensado por exemplo, no contexto da formação de professores. Ela permitiria uma abordagem que complementa a formulação matemática do conceito, propiciando uma discussão a nível de seu significado e das diferentes maneiras de vê-lo. Ela apareceria como um recurso a ser utilizado pelo professor nas discussões com os alunos Poderia contribuir assim, para uma maior interação entre o professor e seus alunos através do conteúdo a ser ensinado. Contribuiria também, para uma compreensão mais profunda do conceito de entropia, e finalmente, para melhor preparar os professores que vão ensiná-lo.

## Notas e referências bibliográficas

**Katya Margareth Aurani** é doutora em Epistemologia e História da Ciência pela Universidade de Paris VII. Atualmente é professora na Universidade Federal do ABC. E-mail: [katya.aurani@ufabc.edu.br](mailto:katya.aurani@ufabc.edu.br).

- 1 Carnot, S. *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les machines propres a développer cette puissance*. fac-símile da edição de 1824, Paris: A. Hermann & Fils, 1903.
- 2 Em nosso livro sobre história da termodinâmica, pode ser encontrada uma análise dos trabalhos de Clausius e de Carnot : Aurani,K.M. *As origens da segunda lei da termodinâmica : Entropia e Probabilidade de Estado*, S.Bernardo do Campo : Editora da Universidade Federal do ABC, 2015, SP.
- 3 Idem.
- 4 Clausius, R. On a modified form of the second fundamental theorem in the mechanical theory of heat. (1854) In: Clausius,R.*The mechanical theory of heat with its application to the steam-engine and to the physical properties of bodies*. Edited by T.Archer Hirst, F.R.S.. London : John Van Voorst, 1 Paternoster Row. Printed by Taylor and Francis, Red Lion Court, Fleet Street,1867a, p.116.
- 5 Clausius,1854, op.cit., p.117.
- 6 Idem,p.122.
- 7 Idem,p.126.
- 8 Foi Clausius quem definiu o conceito de reversibilidade a partir dos resultados de Carnot. Aurani,2015, op.cit.
- 9 On the application of the theorem of the equivalence of transformations to the internal work of mass of matter (1862) In: Clausius, 1867a, op.cit.
- 10 Clausius comenta, nesse artigo, que esteve relutante com relação à publicação do mesmo, pelo fato de tratar nele do trabalho realizado pelos constituintes moleculares das substâncias.Ele temia que isso não fosse bem aceito pela comunidade científica em sua época. Aurani,2015,op.cit.
- 11 Clausius, 1862, op.cit., p.227.
- 12 Idem, p.247.
- 13 Idem.
- 14 Clausius, R. On different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for application (1867b) I: Clausius, 1867a, op.cit.
- 15 Clausius, 1867a,op.cit.
- 16 Hamburger, A. I.(org), *Epistemologia da física para formação de professores – Programa de pesquisa*, Publicações IFUSP/P-749, 1998, p.17.
- 17 Matthews, M. R., *Science teaching – The role of History and Philosophy of Science*, Routledge,N.York, 1994, p.201.

[Artigo recebido em Outubro de 2017. Aprovado para publicação em Julho de 2018]