

Seção especial: Centenário da morte de William Thomson (1824-1907)

A escala termométrica absoluta baseada na teoria da potência motriz  
de Carnot\* e calculada a partir das observações de Regnault<sup>†‡</sup>  
(On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat  
and calculated from Regnaut's observations)

William Thomson<sup>1</sup>

Tradução do artigo "On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat and calculated from Regnaut's observations".

Translation of the paper "On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat and calculated from Regnaut's observations".

A determinação da temperatura é reconhecida, há um longo tempo, como um problema da maior importância, na ciência física. Tornou-se, correspondentemente, um assunto da mais cuidadosa atenção e, especialmente nos últimos anos, de pesquisas experimentais bastante elaboradas e aprimoradas; e nós estamos, então, no presente, de posse de uma solução prática do problema, tão completa como desejado, até mesmo para as investigações mais acuradas. Entretanto, a teoria da termometria ainda está longe de se encontrar em um estado tão satisfatório. O princípio a ser seguido para construir uma escala termométrica pode dar a impressão de ser óbvio, à primeira vista, pois poderia parecer que um termômetro perfeito devesse indicar iguais quantidades de calor, correspondendo a iguais elevações de temperatura, estimadas pelas divisões enumeradas de sua escala. Entretanto, agora é reconhecido (a partir das variações nos calores específicos dos corpos), como um fato experimentalmente demonstrado, que a termometria sob essa condição é impossível, o que nos deixa sem qualquer princípio no qual fundamentar uma escala termométrica absoluta.

A seguir em importância, para o estabelecimento [de um princípio] primário de uma escala absoluta, independentemente das propriedades de qualquer tipo

particular de material, é a fixação de um sistema arbitrário de termometria, de acordo com o qual resultados de observações feitas por diferentes experimentadores, em várias posições e circunstâncias, possam ser exatamente comparados. Esse objetivo é completamente alcançado por meio de termômetros construídos e graduados de acordo com os métodos claramente definidos, adotados pelos melhores construtores de instrumentos, dos dias atuais, quando os processos experimentais rigorosos são seguidos, os quais são recomendados, especialmente por Regnault, para interpretar suas indicações, em um modo comparável [com a leitura de outros termômetros]. O tipo particular de termômetro menos propenso a variações incertas de qualquer espécie é o fundamentado na expansão do ar e esse é, geralmente, adotado como padrão para a comparação de termômetros de todas construções.<sup>2</sup>

Portanto, a escala que é usada, presentemente, para estimar temperatura é aquela do termômetro de ar; e, em pesquisas acuradas, sempre é tomado cuidado para reduzir a essa escala as indicações do instrumento realmente utilizado, quaisquer que possam ser suas construção e graduação específicas.

O princípio de acordo com o qual a escala do termômetro de ar é graduada é, simplesmente, que ex-

\*Publicado em 1824 no trabalho intitulado *Réflexions sur la Puissance Motive du Feu* por M.S. Carnot. Nunca tendo encontrado o trabalho original, foi somente através de um artigo de M. Clapeyron, sobre o mesmo assunto, publicado no *Journal de l'École Polytechnique*, v. XIV, 1834, e traduzido no primeiro volume de *Scientific Memoirs*, de Taylor, que o autor se tornou familiarizado com a teoria de Carnot.

<sup>†</sup>Um relatório da primeira parte de uma série de pesquisas realizadas por M. Regnault, por ordem do Governo Francês, para avaliar os vários dados físicos de importância na teoria da máquina a vapor, acaba de ser publicado em *Mémoires de l'Institut*, do qual [esse relatório] constitui o vigésimo primeiro volume (1847). A segunda parte das pesquisas não foi ainda publicada.

<sup>‡</sup>Tradução por Wilma Machado Soares Santos e Penha Maria Cardoso Dias.

<sup>1</sup>Publicado nos Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, junho 1848; Philosophical Magazine, outubro, 1848. Reimpresso em *Mathematical and Physical Papers of William Thomson* (Cambridge University Press, Cambridge, 1882), v. 1, p. 100-106.

<sup>2</sup>Termômetros construídos com diferentes materiais e escalas (NT).

pansões absolutas iguais da massa de ar ou [da massa de] gás no instrumento, sob uma pressão constante, devem indicar diferenças iguais dos números na escala; o comprimento de um “grau” sendo determinado [arbitrando] um dado número para o intervalo entre os pontos de fusão e ebulição. Ora, foi descoberto por Regnault que vários termômetros, construídos com ar sob diferentes pressões, ou com diferentes gases, dão indicações que coincidem [de modo] tão próximo, que as variações não são apreciáveis, a menos que sejam usados certos gases, tal como ácido sulfuroso, que se aproximam das condições físicas dos vapores na saturação.<sup>3</sup> Essa circunstância remarcável realça muito o valor prático do termômetro de ar; mas ainda assim, um padrão rigoroso só pode ser definido, fixando-se em um certo gás a determinada pressão, como substância termométrica. Embora se tenha, assim, um princípio estrito para construir um sistema *definido* para a estimativa da temperatura, entretanto como referência é essencialmente ainda feita a um corpo específico como substância termométrica padrão, nós não podemos considerar que tenhamos chegado a uma *escala absoluta* e nós só podemos considerar a escala realmente adotada, em estrito senso, como *uma série arbitrária de pontos de referência enumerados, suficientemente próximos para os requisitos da termometria prática*.

No estado atual da ciência física, entretanto, surge uma questão de extremo interesse: *Existe algum princípio no qual uma escala termométrica absoluta pode ser fundamentada?* Parece-me que a teoria de Carnot da potência motriz do calor permite-nos dar uma resposta afirmativa.

A relação entre potência motriz e calor, como estabelecido por Carnot, é tal que *quantidades de calor e intervalos de temperatura* estão envolvidos como os únicos elementos na expressão para a quantidade de efeito mecânico a ser obtida através da agência do calor; desde que nós tenhamos, independentemente, um sistema definido para medidas de quantidades de calor, então estaremos de posse de uma medida para intervalos, de acordo com a qual diferenças absolutas de temperatura podem ser estimadas. Para tornar isso compreensível, umas poucas palavras para explicar a teoria de Carnot devem ser ditas; mas para uma completa descrição dessa muito valiosa contribuição para a ciência

física, o leitor deve-se dirigir a qualquer dos trabalhos mencionados acima (o tratado original de Carnot e o artigo de Clapeyron sobre o mesmo assunto).

No estado atual da ciência, nenhuma operação é conhecida pela qual calor pode ser absorvido sem elevar a temperatura da matéria ou sem se tornar latente e produzindo alguma alteração na condição física do corpo, no qual ele é absorvido; e a conversão de calor (ou *calórico*) em efeito mecânico é provavelmente impossível,<sup>4</sup> certamente ainda não descoberta.<sup>5</sup> Em máquinas reais, para se obter efeito mecânico através da agência do calor, devemos, conseqüentemente, procurar a fonte de potência, não em qualquer absorção e conversão, mas, simplesmente, em uma transmissão de calor. Ora, Carnot, partindo de princípios físicos universalmente reconhecidos, demonstra que é pela *descida* do calor, de um corpo quente para um corpo frio, através do meio de uma máquina (uma máquina a vapor ou uma máquina a ar, por exemplo), que o efeito mecânico pode ser obtido; e, reciprocamente, ele prova que a mesma quantidade de calor pode, pelo consumo de uma quantidade igual de força de trabalho, ser *elevada* do corpo frio para o quente (a máquina estando, neste caso, *trabalhando ao contrário*); assim como efeito mecânico pode ser obtido pela queda da água em uma roda de água, a água pode ser elevada a um nível mais alto, consumindo força de trabalho, pelo giro da roda ao contrário, ou operando uma bomba.<sup>6</sup> A quantidade de efeito mecânico a ser obtida pela transmissão de uma dada quantidade de calor, através do meio de qualquer tipo de máquina, na qual a economia é perfeita, dependerá, como Carnot demonstra, não da natureza específica da substância empregada como meio de transmissão de calor na máquina, mas somente do intervalo entre a temperatura dos dois corpos entre os quais o calor é transferido.

Carnot examina, detalhadamente, a construção ideal de uma máquina a ar e de uma máquina a vapor, em que, além da condição de economia perfeita ser satisfeita, a máquina é disposta de tal forma que, ao final da operação completa, a substância (ar em um caso e água no outro) utilizada é restaurada a precisamente a mesma condição física do começo. Ele, então, demonstra com que elementos, passíveis de determinação experimental, seja com referência ao ar, seja com re-

<sup>3</sup>Regnault, *Relation des Expériences, &c.*, Quarta Memória, Primeira Parte. As diferenças, é observado por Regnault, seriam muito mais sensíveis, se a graduação fosse efetuada na suposição de que os coeficientes de expansão fossem iguais, em vez de ser fundamentada no princípio apresentado no texto, de acordo com o qual os pontos de fusão e ebulição são experimentalmente determinados para cada termômetro.

<sup>4</sup>Essa opinião parece ser quase universalmente seguida por aqueles que têm escrito sobre esse assunto. Uma opinião contrária, entretanto, foi defendida por Mr. Joule, de Manchester; algumas descobertas muito notáveis que ele fez com referência à *geração* de calor pela fricção de fluidos em movimento e alguns experimentos conhecidos com máquinas eletro-magnéticas parecem indicar uma conversão real de efeito mecânico em calórico. Entretanto, não apresenta evidência de experimento, no qual a operação contrária é exibida, mas deve-se confessar que ainda há muito mistério envolvido em relação a essas questões fundamentais de filosofia natural.

<sup>5</sup>O que Thompson quer dizer é que não há evidência da transformação de calor (*calórico*) em trabalho. Na teoria de Carnot, o *calórico* não é transformado (convertido) em trabalho, embora por sua absorção a substância da máquina térmica expanda, empurrando um êmbolo e realizando trabalho; ao fim da operação, o calórico retorna integralmente à fonte quente. Isso é explicado na continuação do texto (NT).

<sup>6</sup>A “roda de água” é movimentada pela água que cai sobre suas pás; era usada para fazer funcionar máquinas (NT).

ferência a um líquido e seu vapor, a quantidade absoluta de efeito mecânico, devido à transmissão de uma unidade de calor de um corpo quente para um corpo frio, através de qualquer intervalo dado da escala termométrica, pode ser avaliada. No artigo de M. Clapeyron, diversos dados experimentais, confessadamente muito imperfeitos, são apresentados e as quantidades de efeito mecânico devido a uma unidade de calor, descendo um grau do termômetro de ar, em várias partes da escala, são calculadas, a partir deles, de acordo com as expressões de Carnot. Os resultados assim obtidos indicam, muito decisivamente, que o que nós podemos, com muita propriedade, chamar *o valor de um grau* (estimado pelo efeito mecânico a ser obtido pela descida de uma unidade de calor através dele) do termômetro de ar depende da parte da escala na qual [a temperatura] é tomada, sendo menor para altas do que para baixas temperaturas.<sup>7</sup>

A propriedade característica da escala que eu proponho agora é que todos os graus tenham o mesmo valor; isto é, que a unidade de calor que desce de um corpo A, à temperatura  $T^\circ$  dessa escala, para um corpo B, à temperatura  $(T - 1)^\circ$ , deveria produzir o mesmo efeito mecânico, qualquer que seja o número  $T$ . Isso pode justamente ser denominado de escala absoluta, visto que sua característica é inteiramente independente das propriedades físicas de qualquer substância específica.

Para comparar essa escala com a do termômetro de ar, os valores (de acordo com o princípio de cálculo enunciado acima) dos graus do termômetro de ar devem ser conhecidos. Ora, uma expressão obtida por Carnot, a partir da consideração de sua máquina de vapor ideal, possibilita-nos calcular esses valores, quando o calor latente de um dado volume e a pressão do vapor saturado, em qualquer temperatura, são experimentalmente determinados. A determinação desses elementos é o objetivo principal do grande trabalho de Regnault já citado, mas, no presente, suas pesquisas não estão completas. Na primeira parte, a única publicada até o momento, os calores latentes de um dado *peso* e as pressões de vapor saturado, em todas temperaturas entre  $0^\circ$  e  $230^\circ$  (centígrados do termômetro de ar) foram estabelecidos;<sup>8</sup> mas seria necessário, adicionalmente, conhecer as densidades do vapor saturado em diferentes temperaturas, para nos possibilitar determinar o calor latente de um dado volume em qualquer temperatura. M. Regnault anuncia sua intenção de instituir pesquisas com esse objetivo; porém, até que os resultados se tornem conhecidos, nenhum meio temos para completar os dados necessários ao presente problema, exceto estimando a densidade de vapor saturado em qualquer tempera-

tura (a pressão correspondente sendo conhecida pelas pesquisas de Regnault já publicadas) de acordo com as leis aproximadas de compressibilidade e expansão (as leis de Mariotte e Gay-Lussac ou Boyle e Dalton). Dentro dos limites da temperatura natural nos climas ordinários, foi encontrado por Regnault (*Études Hygrométriques*, no *Annales de Chimie*) que a densidade do vapor saturado realmente verifica essas leis, de modo muito próximo; e nós temos razão para acreditar, a partir de experimentos feitos por Gay-Lussac e outros, que a temperaturas tão altas quanto  $100^\circ$  não existe desvio considerável; porém nossa estimativa da densidade do vapor saturado, fundamentada nessas leis, pode ser muito errônea para temperaturas tão altas quanto  $230^\circ$ . Portanto, um cálculo completamente satisfatório da escala proposta não pode ser feito, até que dados experimentais adicionais tenham sido obtidos; mas com os dados que atualmente possuímos, nós podemos fazer uma comparação aproximada da nova escala com aquela do termômetro de ar, o que, pelo menos entre  $0^\circ$  e  $100^\circ$ , será toleravelmente satisfatório.

O trabalho de fazer os cálculos necessários para efetuar uma comparação da escala proposta com a do termômetro de ar, entre os limites  $0^\circ$  e  $230^\circ$  desse, foi gentilmente realizado por Mr. William Steele, antes do Glasgow College, atualmente do St. Peters College, Cambridge. Seus resultados, em formas tabuladas, foram apresentados à Sociedade,<sup>9</sup> com um diagrama, no qual a comparação entre as duas escalas é representada graficamente. Na primeira tabela, as quantidades de efeito mecânico devidas à descida de uma unidade de calor através de graus sucessivos do termômetro de ar são exibidas. A unidade de calor adotada é a quantidade necessária para elevar a temperatura de um quilograma de água de  $0^\circ$  para  $1^\circ$  do termômetro de ar; e a unidade de efeito mecânico é um metro-quilograma; isto é, um quilograma elevado a um metro de altura.

Na segunda tabela, as temperaturas, de acordo com a escala proposta, que correspondem a diferentes graus no termômetro de ar, de  $0^\circ$  para  $230^\circ$ , são exibidas.

## Nota

Se nós somarmos os primeiros cem números apresentados na primeira tabela, encontraremos 135,7 para a quantidade de trabalho devido a uma unidade de calor, descendo de um corpo A a  $100^\circ$  para um [corpo] B a  $0^\circ$ . Ora, 79 tais unidades de calor fundiriam, de acordo com Dr. Black (seu resultado sendo muito ligeiramente corrigido por Regnault), um quilograma de gelo. Portanto,

<sup>7</sup> Isso é o que nós poderíamos antecipar, quando nós refletimos que frio infinito deve corresponder a um número finito de graus abaixo de zero, no termômetro de ar; pois, se estendéssemos o princípio de graduação estrito, mencionado acima, suficientemente longe, nós deveríamos chegar a um ponto correspondendo ao volume de ar sendo reduzido a nada, que seria marcado como  $-273^\circ$  ( $-\frac{100}{0,366}$ , se 0,366 for o coeficiente de expansão); e, portanto,  $-273^\circ$  é, no termômetro de ar, um ponto que não pode ser alcançado em qualquer temperatura finita, embora baixa.

<sup>8</sup> Deve ser a massa de um dado corpo (NT).

<sup>9</sup> Refere-se à Royal Society (NT).

se o calor necessário para fundir uma libra de gelo for, agora, tomado como unidade e se um *metro-libra* for tomado como a unidade de efeito mecânico, a quantidade de trabalho a ser obtida pela descida por uma unidade de calor de  $100^{\circ}$  para  $0^{\circ}$  é  $79 \times 135,7$  ou 10.700, aproximadamente. Isto é o mesmo que 35.100 pés-libras, que é um pouco mais que o trabalho de uma máquina

de um cavalo de potência (33.000 pés-libras) em um minuto; e, conseqüentemente, se tivéssemos uma máquina de vapor, trabalhando com economia perfeita, a um cavalo de potência, a fornalha estando à temperatura de  $100^{\circ}$  e o condensador mantido a  $0^{\circ}$  por um suprimento constante de gelo, uma quantidade um pouco menor do que uma libra de gelo seria fundida em um minuto.