

## A CRÔNICA DO CALOR: TERMOMETRIA (The Heat Chronicle: Thermometry)

JOSÉ MARIA FILARDI BASSALO

*Departamento de Física da UFPA*

*66059 Campus Universitário, Guamá*

*Belém, Pará*

### RESUMO

Nesta primeira parte da "Crônica do Calor", apresentamos um estudo histórico da Termometria, isto é, um estudo da evolução dos termômetros. Destacamos, de início, a construção dos primeiros termoscópios inventados por Galileu (1592) e complementados pelos cientistas da "Accademia del Cimento" (1657), bem como a dos primeiros termômetros a gás (Amontons, 1695) e de líquido (Fahrenheit, 1709). Em seguida, examinamos a questão das escalas termométricas (Fahrenheit, 1724; Réaumur, 1730; Celsius, 1742; Kelvin, 1848) e a construção dos termômetros a gás. Por fim, concluímos a crônica com o estudo de outros tipos de termômetros: de resistência, termopar, de radiação (contínua e discreta), etc.

### ABSTRACT

In the first part of this "Heat Chronicle" a historical study of thermometry is presented, that is, a study of the evolution of the thermometers. At the beginning, the emphasis is on the construction of the first thermoscopes invented by Galileo (1592) and complemented by the "Accademia del Cimento" scientists (1657), as well as on the construction of the first gas (Amontons, 1695), and liquid (Fahrenheit, 1709) thermometers. Next, the question of the thermometrical scales is discussed (Fahrenheit, 1724; Réaumur, 1730; Celsius, 1742; Kelvin, 1848). Finally the chronicle ends with the study of other types of thermometers such as resistance, thermocouple, radiation (continuous and discrete), etc.

Termometria é a parte da Física que estuda a medição da temperatura por intermédio de um instrumento denominado Termómetro. A despeito de que o homem, desde que apareceu na Terra, haja sentido sensações diferentes ao experimentar o quente e o frio, primeiro com a presença ou com a ausência do Sol, e depois com a descoberta do fogo, foi somente em tempos mais ou menos recentes (século XVII) que ele começou a medir a temperatura com relativa precisão, conforme veremos no decorrer desta Crônica.

Parece haver sido o homem de Pequim (*Homo erectus*), que habitou as cavernas cerca de 500 000 anos atrás, quem primeiro utilizou o fogo para aquecer-se quando sentia frio, e para orientar-se em suas caminhadas na escuridão. Mais tarde, o homem foi dominando o fogo, quer para proteger-se dos animais, quer para cozer seus alimentos. Contudo, na medida em que foi descobrindo com o fogo o ponto de fusão dos metais e "cozendo" as cerâmicas passou, assim, a construir utensílios e armas, e a edificar cidades, dando então seguimento às diversas revoluções civilizatórias historicamente definidas<sup>(1)</sup>.

Os gregos antigos, conhecedores dos graus de quente e de frio e de suas nuances (muito quente, muito frio, pouco quente, pouco frio) realizaram experiências rudimentares com o calor, chegando mesmo a fazer algumas aplicações práticas. Com efeito, Teodoros (f. c. Século VI, a. C.) introduziu um sistema de aquecimento central no templo de Diana, em Éfeso, por intermédio da expansão do ar quente. (Aliás, esse tipo de expansão foi muito utilizado nos santuários dos Deuses para provocar "aparições" divinas. Por exemplo, quando se queimavam as oferendas no altar do Templo Santo, o ar quente ao expandir-se abria a porta do santuário e a Divindade aparecia para o devoto<sup>(2)</sup>.)

A expansividade do ar quente também foi objeto de estudo por parte do filósofo grego Empedócles de Agrigento (c. 490-c.430) e do engenheiro Filon de Bizâncio (c. 300 a. C. - ?), chegando este a descrever um aparelho que mostrava a relação entre a expansão do ar e a variação da temperatura, dispositivo que no século XVII teve seu uso disseminado, sendo reconhecido então como um termoscópio<sup>(3)</sup>, o

precursor do termómetro. Aparelho semelhante a esse também foi descrito pelo engenheiro Heron de Alexandria (c. 20 A. D. - ?) em seu livro Pneumática. É oportuno frisar que esse grego se notabilizou por haver descrito, também nesse livro, os princípios do sifão e da máquina a vapor - a eolípila<sup>(4)</sup> - isto é, uma esfera oca com dois tubos recurvados e presos nela própria, de tal modo que, ao receber vapor de água fervendo, este, ao escapar pelos tubos recurvados, fazia-a girar. Muito embora alguns médicos dos primeiros séculos desta era hajam tentado representar numericamente os diversos graus de temperatura entre o quente e o frio, foi somente na Idade Moderna (1453-1789) que foram construídos aparelhos cada vez mais precisos, objetivando medir esses graus de temperatura. Com efeito, o primeiro deles foi construído pelo físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), em 1592<sup>(5)</sup>. Era um frasco de vidro com gargalo muito estreito. Foi colocada água colorida até a metade do frasco, sendo o mesmo colocado de boca para baixo em um recipiente contendo a mesma água colorida. Dessa forma, com a variação da temperatura, o ar contido no bulbo se expandiria ou contrairia e a coluna de água no gargalo se moveria para baixo ou para cima<sup>(6)</sup>. No entanto, esse dispositivo apresentava duas limitações. Como ele estava em contacto com ar, a pressão atmosférica, até então desconhecida<sup>(7)</sup>, alterava profundamente os resultados. Algo que só foi constatado mais tarde. Por outro lado, como Galileu não utilizou nenhuma escala termométrica, o seu aparelho era simplesmente um termoscópio, muito embora ele haja sugerido que se poderia medir a temperatura através de modificações de determinadas grandezas dos corpos como, por exemplo, sua expansão.

Apesar dessas limitações, o termoscópio de Galileu foi muito utilizado na primeira década de 1600. A partir daí, esse instrumento começou a ser lentamente aperfeiçoado. Com efeito, em 1611, o médico italiano Santorio Santorio (1561-1636) adaptou ao termoscópio galileano uma escala termométrica rudimentar. Inicialmente registrou os níveis que a coluna de água do tubo atingia quando em contacto com o gelo fundido e a chama de uma vela; em seguida, dividiu o intervalo

correspondente em 110 partes iguais<sup>(8)</sup>. Por usar esse dispositivo em seus doentes, Santorio Santorio é considerado como o inventor do primeiro termômetro clínico<sup>(9)</sup>. Por outro lado, um amigo de Galileu, o nobre veneziano Giovanfrancesco Sagredo, em 1613, efetuou uma série de observações com o termoscópio de Galileu, havendo, inclusive, contribuído para o desenvolvimento da termometria<sup>(10)</sup>.

Com o decorrer do tempo, novos aperfeiçoamentos foram sendo introduzidos no termômetro<sup>(11)</sup>. Uma inovação em relação ao termoscópio de Galileu foi a introduzida pelo químico e médico francês Jean Rey (1582-1632), em 1630, ao considerar a água como substância termométrica, ao invés do ar, como ocorria nos termoscópios tipo galileano. Rey considerou um frasco com um bulbo e uma haste longa e delgada, no qual introduziu água. As mudanças de temperatura eram meramente observadas em virtude da variação do nível da água na haste. Com esse simples instrumento, Rey descobriu que o estanho e o chumbo quentes, aumentavam sua massa quando em contato com o ar<sup>(12)</sup>.

Como esses termômetros até agora descritos tinham contacto direto com o ar, a sensibilidade de suas medidas variava com a pressão atmosférica. Essa dificuldade foi contornada pelo soberano italiano Fernando II de Toscana (1610-1670), por volta de 1644, ao construir um termômetro do tipo-Rey, porém com a extremidade da haste longa hermeticamente fechada. Uma outra inovação introduzida por ele foi a de considerar o álcool como substância termométrica, pois seu ponto de congelamento é mais baixo do que o da água. A fundação em Florença, da Accademia del Cimento (Academia das Experiências), em 1657, por dois discípulos de Galileu, os físicos italianos Vincenzo Viviani (1622-1703) e Torricelli, fez aumentar o conhecimento da termometria, em decorrência das experiências termométricas realizadas por cientistas dessa Academia (que teve decidido apoio de Fernando II na instalação e funcionamento) durante os dez anos de sua existência. Além do desenvolvimento de novas técnicas de construção de termômetros, essas experiências apresentaram inovações, como, por exemplo, a adoção pioneira do uso de mercúrio como substância termométrica.

O avanço no estudo dos termômetros de líquido não impediu que também fossem feitos novos estudos com os termômetros de ar. Assim é que, em 1672, Hubin construiu, em Paris, o primeiro termômetro de ar, que não sofria influência da pressão atmosférica, uma vez que era constituído de um tubo selado, cheio de ar, adaptado à extremidade aberta de um tubo barométrico em forma de U. Um termômetro de ar foi também construído pelo físico francês Guillaume Amontons (1663-1705), em 1699<sup>(13)</sup>. No entanto, esse termômetro era do tipo usado por Galileu, com a diferença de que o ar utilizado era comprimido com mercúrio ao invés da água, como no tipo galileano. Com esse instrumento rudimentar, Amontons mostrou que a água sempre fervia à mesma temperatura<sup>(14)</sup>, e cada gás mudava igualmente de pressão para uma dada variação de temperatura, permanecendo (praticamente) constante o seu volume<sup>(15)</sup>. Ainda como consequência dessas experiências, que foram publicadas em 1699 e 1702, Amontons aventou a idéia do zero absoluto como um estado de repouso absoluto em que todo movimento cessaria, ou seja, um ponto de frio máximo<sup>(16)</sup>. (É interessante frisar, conforme veremos mais adiante, que somente em 1848, o físico e matemático escocês William Thomson, Lord Kelvin (1804-1907), conceituou corretamente essa temperatura.)

A necessidade do uso de escalas termométricas já era sentida em meados do século XVII. No entanto, somente em 1688 é que o francês Joachim Dalencé, construtor de instrumentos, no livro intitulado *Traitez des Baromètres, Thermomètres et Notionètres, ou Hygromètres*, mostrou que uma escala termométrica deve ser definida a partir de duas temperaturas fixas<sup>(17)</sup> e não apenas a partir de uma<sup>(18)</sup>. Desse modo, escolheu como pontos fixos as temperaturas de fusão do gelo e da manteiga, para as quais adotou, respectivamente,  $-10^{\circ}$  e  $+10^{\circ}$ , havendo então dividido o intervalo entre elas em 20 partes iguais. Por sua vez, em 1694, o físico italiano Carlos Renaldini (1615-1698) substituiu o ponto de fusão da manteiga pelo da ebulição da água<sup>(19)</sup>. A escolha dos pontos fixos de uma escala termométrica foi a tônica do século XVIII. Assim, já em 1701, o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em trabalho publicado no Volume 22 do *Philosophical Transactions, Abridged*,

(pág. 824), apresentou uma escala de graus de calor, começando com o 0, "o calor do ar no inverno no qual a água começa a congelar", passando por 12 que é, para ele, o calor do corpo humano, e finalizando em 192 que representa o calor do "carvão betuminoso de uma pequena cozinha soprado por um fole". Para construir essa escala, Newton utilizou um termômetro e um pedaço de ferro quente<sup>(20)</sup>.

A construção de termômetros e a adoção de uma escala termométrica também foi objeto de estudo por parte do astrônomo dinamarquês Olaus (Olé Römer (1644-1710). Assim, em 1702, construiu um termômetro de álcool, havendo escolhido como pontos fixos de sua escala, o ponto de ebulição da água, para o qual adotou o valor 60, e o ponto de fusão do gelo. Para este, inicialmente, adotou o valor 7,5, posteriormente, em 1708, trocou para 8. Como Römer raramente utilizava a parte superior de sua escala em suas observações meteorológicas, ainda em 1708, passou a usar a temperatura do sangue humano como limite superior de sua escala atribuindo-lhe, então, o valor 22,5. Muito embora esse trabalho de Römer em termometria haja sido esquecido, o seu grande mérito foi o de haver estimulado o físico germano-holandês Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736) a trabalhar nesse assunto, após a visita que fez a Römer, em 1708<sup>(21)</sup>. (É interessante observar que em alguns livros de história da ciência Fahrenheit é também apresentado como vidreiro. Isto traz à lembrança a importância do trabalho dos vidreiros nesse período histórico, (séculos XVII e XVIII), já que os experimentos e os instrumentos dependiam muito do trato com o vidro.)

Logo em 1709, Fahrenheit construiu um termômetro de álcool<sup>(22)</sup>. No entanto, somente em 1714 é que apresentou sua escala termométrica, escolhendo como pontos fixos a temperatura na qual uma mistura de gelo e sal (amoníaco ou do mar) se funde, tomada como zero (correspondente à temperatura mais baixa até então registrada na cidade de Danzig, onde nasceu, e ocorrida em 1709), e a temperatura do sangue humano, para qual adotou o valor 96. A famosa escala Fahrenheit usada até hoje nos países anglo-saxões, só foi apresentada em 1724, na qual os pontos fixos são as temperaturas de fusão do gelo<sup>(32)</sup> e da ebulição da

Água (212). Contudo, nessa escala a temperatura do corpo humano vale 98,6(23).

Em virtude de o mercúrio aderir às paredes do estreito tubo termométrico, as substâncias termométricas mais utilizadas na época de Fahrenheit eram o álcool puro ou misturado com água. No entanto, com a descoberta de um novo método de depuração do mercúrio, que impedia sua aderência nos tubos capilares, Fahrenheit construiu, em 1718(24), um termômetro de mercúrio. Desse modo, era possível registrar temperaturas muito acima do ponto de ebulição da água e muito abaixo de seu ponto de fusão. Por outro lado, como o mercúrio apresentava um coeficiente de expansão térmica praticamente constante(25), um termômetro de mercúrio podia ser graduado externamente com muito maior precisão através de subdivisões mais finas. (Daí Fahrenheit propor sua nova escala apenas em 1724, conforme vimos(26).)

Com seu termômetro que, na época, era o de maior precisão, Fahrenheit fez uma série de experiências. Assim, confirmou a descoberta de Amontons de que o ponto de ebulição da água era fixo, bem como testou outros líquidos e descobriu que os mesmos possuíam também pontos de ebulição fixos sob condições normais. Descobriu, ainda, que esses pontos se modificavam com as variações de pressão. Por outro lado, em 1721, Fahrenheit descobriu a sobrepressão da água ao observar, numa noite de inverno, que a água contida em uma garrafa só congelava se a mesma fosse agitada(27).

Ainda na primeira metade do século XVIII, apareceram duas outras escalas termométricas até hoje conhecidas. A primeira delas é devida ao cientista francês René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757)(28) ao escolher, em 1730, o ponto de fusão do gelo como o zero de sua escala. Por outro lado, para o intervalo de 1° de sua escala, Réaumur o considerou como a milésima parte do volume ocupado pelo fluido termométrico na temperatura de 0°. (Essa escala foi apresentada por Réaumur nas Mém. Acad. r. des. Sci., Paris (1730):452; ibid (1731): 250). Como este fluido utilizado era álcool diluído em água, o mesmo começou a entrar em ebulição na temperatura de 80°, razão pela qual admitiu ser

essa a temperatura de ebulição da água. Se não fosse por esse acidente, Réaumur poderia ter sido o primeiro a apresentar uma escala centígrada<sup>(29)</sup> o que, contudo, ocorreu em 1742, proposta pelo astrônomo sueco Anders Celsius (1701-1744), e publicada pela Real Sociedade Sueca. (Kongl. Svensk. Vet. Akad., Handlingar, 3: 171). No início, Celsius tomou o ponto de fusão do gelo como (100 graus) e o ponto de abulição da água como (0 grau). Contudo, em 1743, von Linné inverteu essa escala e, em 1745, introduziu as notações °C °R e °F, utilizadas até hoje<sup>(30)</sup>.

A escolha de novas escalas bem como a construção de novos tipos de termômetros continuaram no século XVIII. Por exemplo, em 1772, o suíço Jean-André Deluc (1727-1817), registrou em seu livro *Recherches sur les Modifications de l'atmosphère*, cerca de 60 escalas; porém, dessas, somente as escalas Fahrenheit, Réaumur e Celsius sobreviveram até o nosso século. Por outro lado, os termômetros até então utilizados não eram capazes de registrar a máxima e a mínima temperaturas ocorridas num determinado intervalo de tempo. (A primeira idéia de construir termômetros que registrassem a temperatura mais alta ou a mais baixa, ou ambas, foi proposta pelo matemático suíço Jean Bernoulli I (1667-1748), em carta que escreveu, em 1698, ao também matemático alemão Gottfried Wilhelm Leibnitz (1646-1716).) Desse modo, em 1782, o inglês James Six (? -1793) construiu um termómetro de máxima e mínima, composto de um tubo recurvado duplo em U, contendo álcool e mercúrio e um índice de ferro esmaltado para indicar a temperatura, índice esse que era posto em contacto com a coluna de mercúrio por intermédio de um ímã. Quando o mercúrio dilatava, espurrava o índice, e quando se contraía, o álcool passava pelo índice deixando-o no lugar. Assim, ficavam registradas as temperaturas máxima e mínima<sup>(31)</sup>. Por seu lado, num trabalho publicado em 1794 (*Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 3: 247), o químico escocês Daniel Rutherford (1749-1819) descreveu outro tipo de termómetro de máxima e mínima. Porém, esse dispositivo era diferente do de Six, já que era composto de dois termômetros horizontais e independentes, um de mercúrio, para registrar as temperaturas máximas, e o outro de álcool para registrar as temperaturas mínimas. As máximas



eram indicadas devido ao rompimento da coluna de mercúrio quando este se resfriava, e as mínimas eram registradas por deslocamento da coluna de álcool para um pequeno cilindro de metal (que servia de índice), quando a temperatura se elevava<sup>(32)</sup>.

A arbitrariedade na escolha dos pontos fixos de uma escala termométrica, além do uso de líquidos (água, álcool, mercúrio) como substâncias termométricas, eram as principais dificuldades encontradas para o desenvolvimento da termometria até o século XVIII. Com efeito, os líquidos, de modo geral, têm respostas diferentes à variação de temperatura (a água, por exemplo, se contrai ao invés de se expandir quando a temperatura se eleva de 0°C a 4°C<sup>(33)</sup>). Portanto, dois termômetros usando líquidos diferentes e com os mesmos pontos fixos para a sua escala apresentavam uma ligeira diferença para o intervalo de grau. Por outro lado, a própria escolha dos pontos fixos (fusão do gelo, ebulição da água, mistura de gelo e sal, etc.) particularizava bastante o termômetro. No entanto, na medida em que foram aprimorados os estudos sobre os gases, conforme veremos a seguir, verificou-se que todos eles se comportam relativamente da mesma maneira com relação a uma determinada variação de temperatura, e que, portanto, seriam ideais como substância termométrica e mais ainda, que suas propriedades (volume, pressão, etc.) poderiam servir de escala termométrica. Dessa modo, foram construídos os termômetros a gás<sup>(34)</sup>.

Muito embora hajam sido feitas experiências com o ar atmosférico desde antes de Cristo, conforme salientamos anteriormente, foi somente a partir da segunda metade do século XVII que começaram a ser descobertas as primeiras leis referentes aos gases<sup>(35)</sup>. Vejamos como. Em 1661, Boyle, ao fazer experiências nas quais media o volume de ar sob várias pressões e à mesma temperatura, anunciou a seguinte lei: - "O volume  $V$  de um gás a uma determinada temperatura é inversamente proporcional à pressão  $P$ ". Mais tarde, em 1679, o físico francês Edmé Mariotte (1620-1684) redescobriu essa lei, razão pela qual a mesma ficou conhecida como lei de Boyle-Mariotte:  $PV = \text{constante}$ . Por sua vez, em 1699 e 1702, utilizando o termômetro que construira, Amontons descobriu que

os gases mudavam igualmente de pressão para uma dada variação de temperatura. Ao estudar a expansão dos gases quando aquecidos, o químico francês Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850), em 1802, anunciou a seguinte lei: "Todos os gases se dilatam igualmente e seu coeficiente de dilatação  $\alpha$  vale  $1/266,66$ " (36). (É oportuno esclarecer que o físico francês Jacques-Alexandre-Cesar Charles (1746-1823), em 1787, chegou a um resultado semelhante a esse de Gay-Lussac, conforme este químico registrou nesse seu trabalho de 1802 (37).) Mais tarde, em 1852, o químico e físico franco-alemão Henri Victor Regnault (1810-1878) obteve para o valor aproximado de  $1/273$  (38). As leis de Boyle-Mariotte e de Amontons-Charles-Gay-Lussac podem ser escritas, conjuntamente, na forma:  $PV = P_0 V_0 [1 + \alpha (t - t_0)]$ , onde  $P_0$  e  $V_0$  são, respectivamente, a pressão e o volume do gás na temperatura  $t_0$ . (Nessa expressão, verifica-se que se  $t$  é constante ( $t = t_0$ ) resulta a lei de Boyle-Mariotte; se, contudo, a pressão é constante ( $P = P_0$ ), tem-se a lei de Charles-Gay-Lussac; e se o volume for constante ( $V = V_0$ ), obtém-se a lei de Amontons.)

As propriedades dos gases traduzidas por essas leis, principalmente a lei de Amontons e a de Charles-Gay-Lussac, formam a base dos termômetros a gás. Assim, temos os de pressão-constante, nos quais o volume do gás é que determina a temperatura correspondente; e os de volume-constante, é a sua pressão que determina a temperatura procurada. Nesses tipos de termômetro, é claro que a temperatura procurada  $t$  é função de uma temperatura de referência  $t_0$  (geralmente tomada como a do ponto-tríplice da água) e do volume  $V_0$ , ou da pressão  $P_0$  do gás nessa temperatura referencial, respectivamente (39). Como os gases que obedecem às leis acima referidas são chamados gases ideais, a escala termométrica que usa o volume ou a pressão do gás como propriedade térmica, é denominada de escala de temperatura de gás-ideal. Por outro lado, como essa escala não depende do tipo de gás utilizado, ela foi chamada de escala absoluta de temperatura.

Os termômetros a gás e sua respectiva escala apresentavam limitações em sua utilização, pois os gases reais não se

comportam como os ideais. Portanto, havia dificuldade na operacionalização dos mesmos, principalmente com relação à manutenção da pressão (ou volume) constante, conforme fosse o tipo de termômetro considerado. Além do mais (e pelas mesmas razões já referidas), a escolha do tipo de gás (H, He, O, N, ar, etc) também provocava pequenas variações na escala. Por essa razão, Lord Kelvin, em 1848<sup>(40)</sup>, propôs definir uma escala que fosse independente da substância termométrica utilizada. Para isso, lançou mão da eficiência da máquina de calor que havia sido descrita pelo físico francês Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), em 1824, no famoso livro *Reflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines propres à développer cette Puissance*. Essa máquina descrita por Carnot é uma máquina ideal sem atrito, que realiza um ciclo completo, de modo que a substância usada - vapor, gás ou outra - qualquer - é levada de volta a seu estado inicial. Nesse ciclo, mais tarde chamado ciclo de Carnot, o "calórico" era transformado em "força" mecânica e essa transformação dependia apenas da diferença de temperatura entre a fonte quente (caldeira) e a fonte fria (condensador)<sup>(41)</sup>.

Pois bem, Kelvin demonstrou que para essa máquina de Carnot, se  $Q_1$  unidades de calor são extraídas da caldeira e  $Q_2$  unidades de calor são devolvidas ao condensador, então uma escala de temperatura poderia ser definida através da relação:  $Q_1/Q_2 = T_1/T_2$ , onde  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas absolutas da caldeira e do condensador, respectivamente. Ora, para estabelecer o tamanho da unidade de sua escala (posteriormente denominada escala Kelvin) era preciso definir de modo arbitrário uma temperatura ( $T_1$  ou  $T_2$ ) e por intermédio da expressão acima, calcular a outra temperatura. Isso, no entanto, era impraticável, já que a máquina de Carnot era ideal. Desse modo, para tornar sua escala operacional, Kelvin adotou o princípio de Celsius, isto é, da escala centesimal, escolhendo como zero de sua escala, o zero absoluto de Amontons, o que correspondia a uma temperatura aproximada de  $-273,7^\circ\text{C}$ . Portanto, a relação entre as escalas Celsius e Kelvin seria dada por<sup>(42)</sup>:  $T(K) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,7$  o que resultava ser os pontos fixos de fusão do

gelo e de ebulição da água, respectivamente, dados por 273,7K e 373,7K (43).

Para Kelvin, o zero absoluto<sup>(44)</sup> de Amontons era atingido quando a energia cinética das moléculas e não o seu volume (como indicava a lei de Amontons-Charles) se anulava, conforme concluiu em 1856. Logo depois, em 1859, o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou a relação entre energia cinética e temperatura absoluta em seus estudos sobre a Teoria Cinética dos Gases<sup>(45)</sup>, assunto que será ainda objeto desta Crônica do Calor em trabalho futuro.

A noção de temperatura absoluta proposta por Kelvin teve boa aceitação porque era muito conveniente ao estudo da Termodinâmica, razão pela qual o engenheiro e físico escocês William John Macquorn Rankine (1820-1872) introduziu uma outra versão dessa temperatura para uso dos engenheiros. No entanto, em sua escala, o grau tinha o tamanho do grau da escala Fahrenheit, o que dava para o zero absoluto (este, tomado como o seu início), o valor de  $-459,67^{\circ}\text{F}$ . Desse modo, a relação entre as escalas Rankine e Fahrenheit é dada por:  $T(^{\circ}\text{R}) = t(^{\circ}\text{C}) + 459,67$  (46). (É oportuno salientar que Rankine é considerado um dos fundadores da Termodinâmica e, particularmente importante, é o seu trabalho sobre a teoria da máquina a vapor, exposta no livro *A Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers*, publicado em 1859. Entre 1852-1859, havia trabalhado no conceito de energia como sendo a capacidade de realizar trabalho, conceito esse que já havia sido discutido pelo físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829). Também é interessante observar que Rankine foi ainda um excelente engenheiro civil, havendo pesquisado bastante sobre a estabilidade dos taludes de solos<sup>(47)</sup>.)

Até as primeiras décadas do século XIX os termômetros tinham como substância termométrica, basicamente, líquidos e gases que, normalmente, se expandem com o aumento da temperatura e, portanto, o volume ou a pressão deles era então usado como propriedade termométrica desses termômetros<sup>(48)</sup>. No entanto, no decorrer daquela

século, os sólidos também passaram a ser utilizados nos termômetros e uma série de propriedades dessas substâncias foram relacionadas com a temperatura, constituindo-se nas propriedades termométricas necessárias para servir como escala termométrica. Dentre essas propriedades, destacam-se a resistência elétrica, a força eletromotriz e a radiação eletromagnética, conforme veremos a seguir<sup>(49)</sup>.

Em 1821, o químico inglês Sir Humphry Davy (1778-1829) observou que arames de metais diferentes apresentavam resistências elétricas também diferentes, chegando, inclusive, a ordenar os metais segundo sua condutibilidade. Por essa ocasião, observou ainda que essa resistência aumentava com a elevação de temperatura, já que um fio, levado ao rubro fraco pela passagem de uma corrente, perdia essa coloração quando esquentado por uma chama de vela<sup>(50)</sup>. Apesar dessa descoberta, isto é, de que a resistência elétrica  $R$  é uma função da temperatura ( $R(t)$ ), a mesma só foi utilizada para construir um termômetro em 1871, pelo inventor germano-inglês Sir William (Karl Wilhelm) Siemens (1823-1883). A substância termométrica por ele escolhida, a platina, foi mais tarde considerada como a substância padrão dos termômetros de resistência elétrica, devido a sua estabilidade e precisão na medida da temperatura, conforme demonstrou o físico inglês Hugh Longbourne Callendar (1863-1930) ao construir, em 1886, também um termômetro desse tipo<sup>(51)</sup>.

A precisão dos termômetros de platina foi sendo cada vez mais melhorada, tanto que em 1927, por ocasião da 7ª CGPM, na qual trinta e um países estiveram representados, esse tipo de termômetro foi escolhido para calibrar os instrumentos científicos e industriais. De um modo geral, o intervalo de temperatura em que o termômetro de platina pode ser usado é de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $+1200^{\circ}\text{C}$ , e a calibração do instrumento é feita por intermédio da fórmula:  $R_{pt} = R_0 (1 + At + Bt^2)$ , onde  $R_0$  é a resistência do fio de platina quando é posta em contacto com o gelo fundente,  $A$  e  $B$  são constantes determinadas em dadas temperaturas fixas (ebulição da água ou do oxigênio, fusão do zinco, prata ou ouro, etc), e  $t$  é a temperatura correspondente a  $R_{pt}$ .

No entanto, como a platina é muito cara, outros metais também passaram a ser usados nos termômetros de resistência, principalmente cobre e níquel. Porém, o cobre é limitado a temperaturas menores do que  $120^{\circ}\text{C}$ , e o níquel a menores do que  $30^{\circ}\text{C}$  (52).

Termômetros de resistência elétrica também foram desenvolvidos para medir temperaturas criogênicas<sup>(53)</sup>, isto é, temperaturas compreendidas entre frações e dezenas de kelvins. Nesses termômetros é usado o fato de que, para certas substâncias a baixas temperaturas a sua resistência elétrica aumenta rapidamente quando diminui a temperatura, como acontece, por exemplo, com o carbono (comumente usado em circuitos eletrônicos) e com o semicondutor germânio dopado com arsênico. (Os termômetros de germânio são usados no intervalo de 0,2 a 20 K, no qual a sensibilidade do termômetro de platina é muito baixa.) O desenvolvimento da Física dos Semicondutores permitiu a construção de uma outra classe de termômetros semicondutores de resistência - os chamados termistores -, que trabalham no intervalo de 4 K a  $300^{\circ}\text{C}$  (573 K), sendo que em temperaturas ambientes eles são dez vezes mais sensíveis que os de platina, porém muito menos estáveis<sup>(54)</sup>.

Em virtude da descoberta do efeito termoelétrico, feita pelo físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831), outros termômetros elétricos foram construídos, além dos de resistência acima descritos. Em 1821, Seebeck colocou um disco de bismuto sobre uma placa de prata e uniu-os por meio de fios a um galvanômetro. Pois bem, ao apertar com a mão esses fios contra o disco de bismuto, percebeu que o galvanômetro registrava "uma polarização magnética" (corrente elétrica, conforme mais tarde foi identificada). Substituindo o bismuto por antimônio, Seebeck observou que a "polarização" invertia de sentido e, de pronto, identificou esse fenômeno como sendo devido ao calor de sua mão, razão pela qual denominou-o de termoelétrico. Em vista disso, construiu um termoelemento constituído de um retângulo com duas bandas metálicas soldadas entre si nas extremidades, no qual uma agulha magnética era desviada quando as soldas eram submetidas a uma diferença de temperatura<sup>(55)</sup>. Estava descoberto o efeito termoelétrico,

posteriormente conhecido como efeito Seebeck<sup>(56)</sup>. É interessante registrar que em fevereiro de 1822, Seebeck estabeleceu com os seus termoelementos uma série de tensões termoelétricas. Estas, mais tarde, foram reconhecidas como forças eletromotrizes termoelétricas, depois dos trabalhos de W. G. Hankel (1844) e Kelvin (1855)<sup>(57)</sup>.

O aparecimento de uma força eletromotriz (FEM) térmica entre pares de metais diferentes cujas extremidades soldadas (junções) estão sujeitas a uma diferença de temperatura -o efeito Seebeck-conforme vimos acima, deu ensejo para que se construíssem termômetros, que passaram então a ser conhecidos como termopares. Uma de suas junções, chamada quente ou junção medida, é colocada em contacto com a temperatura a ser medida; a outra, chamada fria ou junção referência, é mantida em contacto com uma temperatura conhecida de referência. Desse modo, o termopar é calibrado medindo-se a FEM  $\epsilon$  em várias temperaturas conhecidas, enquanto a junção fria é mantida na temperatura de 0°C. Portanto, uma temperatura  $t$  correspondente a uma dada  $\epsilon$  será calculada por intermédio da expressão:  $\epsilon = a + bt + ct^2 + dt^3$ , onde as constantes  $a, b, c$  e  $d$ , dependem do material de cada termopar. O intervalo de temperatura de uso do termopar depende dos materiais de que é composto. Por exemplo, para um par de platina e platina-ródio (10%), o intervalo vai de -50°C a 1600°C. Convém observar que uma das vantagens de termopar é que ele atinge rapidamente o equilíbrio térmico com o sistema cuja temperatura se deseja determinar, por ser sua massa muito pequena<sup>(58)</sup>.

Desde que o homem descobriu o fogo vem percebendo que existe uma relação entre calor e radiação emitida por um corpo quente. Por exemplo, o ferro em brasa é rubro, a luz do sódio é amarela, dentre outros. No entanto, somente na segunda metade do século XIX é que foi possível medir a temperatura de um corpo quente em função da radiação por ele emitida, na medida em que o estudo da energia térmica radiante foi sendo sistematizado. Neste estudo, basicamente, se procurava encontrar a relação entre a intensidade  $I$ <sup>(59)</sup> da radiação de comprimento da onda ( $\lambda$ ) com a temperatura absoluta  $T$ , e com o próprio  $\lambda$ ,

já que, em 1859, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) enunciou, empiricamente, uma lei na qual afirmou haver tal relação, isto é,  $I(\lambda, T)$ . Pois bem, tendo em vista esta relação, tipos de termômetros foram então construídos, os chamados termômetros de radiação ou pirômetros, destinados, principalmente, a medir altas temperaturas, por exemplo, como as de alto-forno, que atingem temperaturas acima de  $500^{\circ}\text{C}$  (60).

Um dos primeiros tipos de termômetro de radiação foi o bolômetro, inventado pelo sueco A. F. Svanberg, em 1851, e aperfeiçoado pelo físico e astrônomo norte-americano Samuel Pierpont Langley (1834-1906), em 1881. Esse aparelho se constitui, basicamente, em uma resistência de platina colocada em um dos braços de uma ponte de Wheatstone. Quando uma radiação atinge essa resistência, uma mudança de valor é registrada no galvanômetro da ponte, e a intensidade da radiação pode então ser calculada. Com esse instrumento, Langley, em 1886, estudou o espectro solar na região infravermelha<sup>(61)</sup>, bem como mediu a intensidade da radiação solar em outros comprimentos de onda. Muito embora o bolômetro haja, sobretudo, sido usado para medir a intensidade da radiação solar, posteriormente foi utilizado também para medir a temperatura de corpos quentes, até um limite de  $600^{\circ}\text{C}$  (62).

Os termômetros de radiação ou pirômetros propriamente ditos foram construídos tendo como base a função  $I(\lambda, T)$  obtida pelo físico alemão Max Karl Ernst Planck (1858-1947; PNF, 1918), depois de várias tentativas feitas no sentido de obter aquela função. O valor obtido por Planck foi o seguinte:  $I(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2/\lambda T) - 1]$ , onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes. O primeiro desses termômetros a ser inventado foi o pirômetro óptico ou pirômetro de filamento desaparecido constituído por uma luneta na qual estão montados um filtro de vidro vermelho e uma lâmpada incandescente, sendo esta ligada no circuito elétrico. Para medir a temperatura de um alto-forno, por exemplo, dirige-se a luneta para a fornalha e varia-se a resistência do reostato do circuito elétrico até que o brilho do filamento incandescente da lâmpada se iguale ao da fornalha, sendo então a



temperatura desta lida diretamente no amperímetro que foi previamente calibrado (brilho versus corrente). Para temperaturas acima de  $1500^{\circ}\text{C}$  o brilho da fonte é primeiro atenuado por um filtro de vidro neutro. (Nos pirômetros modernos, o olho humano é substituído por uma célula fotoelétrica.). É oportuno salientar que esse tipo de termômetro não mede a temperatura verdadeira, a menos que a fonte seja um corpo negro, já que a expressão obtida por Planck é válida apenas para corpos negros (63).

Além dos pirômetros ópticos que são monocromáticos, isto é, registram temperaturas para uma determinada cor, existem, ainda, os pirômetros de radiação total que recebem o espectro total de energia radiada pela fonte, sendo sua temperatura determinada tendo por base a lei de Stefan-Boltzmann dada por  $R = \sigma T^4$ , onde R (Radiância) representa a intensidade total da radiação (energia por unidade de área e por unidade de tempo) de um corpo negro de temperatura T e  $\sigma$  é uma constante denominada de constante de Stefan-Boltzmann. Muito embora esses pirômetros não sejam muito acurados como o óptico, eles são usados para medir temperaturas limitadas até  $200^{\circ}\text{C}$ , na região correspondente ao infra-vermelho. É oportuno registrar que esses pirômetros de radiação total são usados na indústria para controle de temperatura (64).

Ao concluirmos esta Crônica da Termometria, faremos uma ligeira referência sobre a determinação de altas temperaturas (da ordem de milhares de milhões de Kelvins) que ocorrem, por exemplo, nos plasmas (gases ionizados) e estrelas, e sobre a construção de termômetros usando métodos ainda não descritos nesta Crônica. Gases (neutros ou ionizados) extremamente quentes (como os que ocorrem nas chamas, nos plasmas e no interior de estrelas) emitem radiação na forma de linhas espectrais discretas (ou grupos delas com espaçamentos pequenos) ao invés de uma distribuição contínua como ocorre com a radiação térmica. Desse modo, a determinação da temperatura dessas fontes é feita estudando-se, basicamente, a largura dessas linhas (65) ou observando-se a absorção, por essas fontes, de uma radiação de corpo negro que as atravessa. Contudo, a acurácia da Termometria de Radiação (contínua ou

discreta), também chamada espectroscópica, é muito baixa quando comparada à Termometria convencional (66).

Conforme vimos até aqui, de um modo geral, um termômetro é construído tomando-se como base qualquer propriedade física que varie com a temperatura. Assim, descrevemos os termômetros de líquido, de gás, de resistência, os termopares e os de radiação. Contudo, outros termômetros foram idealizados tendo em vista existir uma relação entre a variação de uma determinada propriedade física de um corpo e a temperatura responsável pela mesma. Assim, foram construídos os termômetros bimetais baseados na dilatação térmica dos metais; os termômetros acústicos fabricados tendo em vista o fato de que a velocidade de propagação de uma onda sonora através de um meio é função de sua temperatura; os termômetros magnéticos baseados na dependência da temperatura apresentada pela suscetibilidade magnética; os termômetros de ruído térmico que usam o princípio de que em qualquer condutor elétrico o movimento dos elétrons no mesmo é randômico e a extensão de seu movimento é função da temperatura; os termômetros piroelétricos tendo em vista o fenômeno da piroeletricidade (67); os termômetros de viscosidade gasosa que usam a resistência oferecida por um tubo capilar ao fluxo de um gás através dele quando há uma variação de temperatura, etc. Todos esses termômetros (68), é claro, têm aplicabilidade em intervalos de temperatura bem definidos, podendo alguns deles medir temperaturas extremamente baixas ( $10^{-5}$  °C), como o caso dos termômetros piroelétricos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Penha M. C. Dias (UFRJ), Sílvio R. A. Salinas e Mauro S. D. Cattani (USP), Antonio B. Nassar (UFA e UCLA), J. R. Serra da UFA, aos "referees" da Revista de Ensino de Física, Sra. Neuza Ferraz Cid (Biblioteca do IFUSP) e à Biblioteca Central da UFA por terem permitido o acesso a algumas referências

utilizadas neste trabalho. Agradeço, também, ao SECOM-UFFA pela impressão do texto e a minha mulher, Célia Coelho Bassalo (UFFA), pela redação final.

### NOTAS E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (01) RIBEIRO, D. 1978. O Processo Civilizatório. Editora Vozes.
- (02) FARRINGTON, B. 1961. A Ciência Grega. IBRASA.
- (03) Termoscópio é um aparelho que permite observar as variações da temperatura ambiente (do grego: thérmos - calor e skopsin - observar). O nome Termoscópio foi cunhado em 1617. (BUENO, S. F. 1967. Grande Dicionário Etimológico-Prosódico da Língua Portuguesa. Saraiva, Livradores Editores; ROLLER, D. 1950. The Early Development of the Concepts of Temperature and Heat. Harvard University Press.)
- (04) A eolípila, que vem do latim aeolipyla e que significa porta de Eola, já havia sido rudimentarmente descrita pelo arquiteto romano Marcus Vitruvius Pollio, por volta do século I a. C. (GIBERT, A. 1982. Origens Históricas da Física Moderna. Fundação Calouste Gulbenkian.)
- (05) A data da invenção do "termômetro" de Galileu é controversa. Alguns autores falam em 1592 (BEDFORD, R. E. 1978. Thermometry. IN: ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Macropaedia, Volume 18. The University of Chicago), e outros em 1597 (PLA, C. 1946. Galileo Galilei. Espasa-Calpe Argentina S. A.). Apesar dessa controvérsia, o fato é que no começo de 1600, os discípulos de Galileu, por exemplo, o físico e matemático italiano Benedetto Castelli (1577-1644), já estava bastante familiarizado com o mesmo tanto que, em 1603, fez referência a esse "termômetro". Mais discussões sobre a invenção do termômetro, veja-se: MIDDLETON, W. E. K. 1966. A History of the Thermometer and Its use in Metereology. The Johns Hopkins Press; ROLLER, op. cit.
- (06) GAMOV, G. 1963. A Biografia da Física. Zahar Editora.

- (07) A pressão atmosférica foi medida pela primeira vez em 1643, pelo discípulo de Galileu, o físico e geômetra italiano Evangelista Torricelli (1608-1647).
- (08) GRAHAM, L. 1978. Heat IN: ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Macropaedia. Volume 8. The University of Chicago; MIDDLETON, op. cit.; GIBERT, op. cit.
- (09) Muito embora Santorio Santorio seja considerado o inventor do termômetro clínico, foi o médico escocês Sir William Aitken (1825-1892) quem, em 1852, inventou o termômetro de máxima (até hoje utilizado como termômetro clínico) ao estreitar bastante a coluna de mercúrio impedindo que a mesma baixasse com a diminuição de temperatura. Mais tarde, em 1864, o inventor alemão Heinrich Geissler (1814-1879) também construiu um termômetro de máxima. (É oportuno observar que o médico alemão Karl August Wunderlich (1815-1877) fez uma descoberta importante para a Medicina ao perceber que a febre era sintoma de doença, e não propriamente uma doença.) (ATANES, S. 1989. O termômetro IN: SUPERINTERESSANTE, 3 (4): 38-39.)
- (10) DRAKE, S. 1981. Galileu. Publicações Dom Quixote. Lisboa.
- (11) O termo termômetro parece haver sido introduzido pelo jesuíta Jean Leurechon (1591-1670), em 1624 ou 1626, no trabalho intitulado *Recréation Mathématique*, sob o pseudônimo de H. van Etthen. (ROLLER op. cit; MIDDLETON, op. cit.) É oportuno observar que o inventor holandês Cornelius Jacobszoon Drebbel (1572-1633) - o construtor do 1º submarino - e o médico inglês Robert Fludd (1574-1637), em 1626, também introduziram melhoramentos nos termômetros. (KISTNER, A. 1934. História de la Física. Editora Labor, S. A.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Macropaedia, Volumes III e IV. The University of Chicago, 1978; PLA, op. cit; RONAN, C. A. 1987. A História Ilustrada da Ciência. Jorge Zahar Editor; MIDDLETON, op. cit.)
- (12) MIDDLETON, op. cit.; PETIT LAROUSSE ILLUSTRÉ, 1985.
- (13) MIDDLETON, op. cit.

- (14) A observação de que as temperaturas de fusão e de ebulição dos corpos são sempre constantes, parece haver sido feita pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), em 1668. (GIBERT, op. cit.)
- (15) KRITCHEVSKI, I. R. e PETRIANOV, I. V. 1984. O que é Termodinâmica. Editora Mir; SCHOOLEY, J. 1986. Thermometry. CRC Press; GLASSTONE, S. 1953. Tratado de Química-Física. Aguillar S.A. de Editores.
- (16) MENDELSSOHN, K. s/d. Em Demanda do Zero Absoluto. Editorial Inova Limitada. (É oportuno salientar que Amontons chegou a fixar o valor dessa temperatura. Mais tarde viu-se que, na escala Celsius, ela correspondia a  $-239,5^{\circ}\text{C}$ . (GIBERT, op. cit..))
- (17) A idéia de adotar dois pontos fixos numa escala termométrica é devida ao Jesuíta Honoré Fabri, em 1669. Para o seu ponto mais baixo, escolheu a temperatura de fusão do gelo; mas para o ponto mais alto, admitiu ser "a temperatura mais alta do verão". (MIDDLETON op. cit.; ROLLER, op. cit.)
- (18) A idéia de adotar um ponto fixo como zero, foi independentemente proposta em 1665, pelo físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691), pelo físico Hooke e, também, pelo físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695). Boyle sugeriu o ponto de fusão do Óleo de anis; Hooke, o ponto de fusão do gelo, e Huygens, a fusão do gelo ou a ebulição da água. (ROLLER, op. cit.). (19) Mais detalhes sobre a escolha de pontos fixos da escala termométrica no século XVII, veja-se ROLLER, op. cit. e MIDDLETON, op. cit.
- (20) MAGIE, W. F. 1934. A Source Book in Physics. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- (21) GIBERT, op. cit.; BEDFORD, op. cit.; ROLLER, op. cit.; MIDDLETON, op. cit.
- (22) ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Macropaedia, Volume IV. The University of Chicago, 1978.
- (23) BEDFORD, op. cit.; GRAHAM, op. cit.; MAGIE, op. cit.
- (24) ROSMORDUC, J. 1983. De Tales a Einstein. Coleção Universitária 4. Editorial Caminho; GIBERT, op. cit.

- (25) A expansão térmica dos líquidos foi observada pelo astrônomo inglês Edmund Halley (1656-1742), em 1688. O trabalho relativo a essa observação foi publicado na Phil. Trans. 17: 652 (1693). (MIDDLETON, op. cit.).
- (26) ASIMOV, I. 1974. Os Gênios da Humanidade. Bloch Editores.
- (27) ASIMOV, op. cit.; KISTNER, op. cit.
- (28) Réaumur trabalhou em vários ramos da Ciência. Por exemplo, foi o primeiro a mostrar que os corais eram plantas e não animais; preparou uma espécie de vidro opaco branco ainda hoje conhecido como porcelana de Réaumur. Esclareceu o processo químico da digestão com uma célebre experiência realizada em 1752, usando para isso um falcão. Por fim, foi o primeiro a estabelecer o papel do carbono na fabricação do aço, no famoso livro L'Art de Convertir Fer Forgé en Acier, escrito em 1722, abrindo com isso, o desenvolvimento da Metalurgia. (ASIMOV, op. cit.)
- (29) É oportuno esclarecer que a idéia de uma escala centígrada, tendo como pontos fixos a fusão do gelo e a ebulição da água, já havia sido aventada por vários cientistas. Segundo ROLLER (op.cit), a escala centígrada foi sugerida pela primeira vez pelo sueco Elvius, em 1710 e, independentemente, pelo botânico sueco Carl von Linné (1707-1778), em 1740, e por Christian de Lyons, em 1743. MIDDLETON (op. cit.), contudo, ao fazer uma descrição detalhada e minuciosa sobre a questão das escalas termométricas, demonstrou que outros físicos também se preocuparam com essa mesma questão. Porém, excluiu o nome de Elvius.
- (30) A questão da inversão da escala centígrada é também polêmica. (MIDDLETON, op. cit.)
- (31) SIX, J. 1782. Phil. Trans., 72: 72.
- (32) Veja-se, em MIDDLETON (op. cit.), a descrição de outros tipos de termômetros de máxima e/ ou de mínima.
- (33) Observada por Deluc, em 1776. (KISTNER, op. cit.)
- (34) GAMOV, op. cit.

- (35) Um estudo mais detalhado sobre os gases será feito em outro trabalho desta Crônica do Calor.
- (36) GAY-LUSSAC, L.- J. 1802. Ann. d. Chim., 43: 137. (Veja-se excerto deste trabalho em MAGIE, op. cit.)
- (37) Existe controvérsia entre os autores sobre a lei de Charles-Gay-Lussac, já que alguns deles falam na lei de Amontons-Charles.
- (38) O físico e químico alemão Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) também obteve, independentemente, esse valor. (GIBERT, op. cit.)
- (39) BEDFORD, op. cit.
- (40) THOMSON, W. 1848. Proc. Cambridge Phil. Soc, 1: 66; Phil. Mag., 33:313.
- (41) Mais detalhes sobre a máquina de Carnot serão apresentados em outro artigo desta Crônica do Calor.
- (42) THOMSON, op. cit.
- (43) Embora a escala Kelvin haja sido recomendada como fundamental havia dificuldades práticas em usá-la, pois, em muitos casos, o conhecimento da temperatura termodinâmica Kelvin não permitia reproduzir com precisão o intervalo de temperatura de uma escala, daí a proliferação de muitas escalas. Desse modo, em 1927, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas resolveu adotar uma Escala Termodinâmica Prática Internacional (ETPI). Por outro lado, na Sétima Conferência Geral de Pesos e Medidas (7ª CGPM) realizada em Paris, em 1954, aquele Comitê resolveu acatar a sugestão feita pelo físico e químico norte-americano William Francis Giaque (1895-1982; PNQ, 1949) em 1939, e adotou o ponto-tríplice da água como ponto fixo fundamental, atribuindo-lhe, por definição, a temperatura de  $-273,16^{\circ}\text{K}$ . Desse modo, a temperatura de qualquer corpo podia ser calculada pela expressão:  $T(^{\circ}\text{K}) = 273,16^{\circ} X/X_{tr}$ , onde  $X$  e  $X_{tr}$  representam, respectivamente, as propriedades termométricas da substância termométrica do termômetro utilizado, nas temperaturas  $T$  e  $273,16^{\circ}\text{K}$ . (Mais tarde, por ocasião da 13ª CGPM, realizada em 1967, foi adotado o símbolo  $\text{K}$ , ao invés de  $^{\circ}\text{K}$ .)

(ZEMANSKY, M. W. 1957. Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill Book Company, Inc.; SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES. Instituto Nacional de Pesos e Medidas. Ministério da Indústria e do Comércio. 1971; BEDFORD, op. cit.)

- (44) Segundo Kelvin, não poderia haver temperaturas negativas, isto é, menores do que o zero absoluto. Contudo, em 1951, o físico norte-americano Edward Mills Purcell (1912- ;PNF,1952) e seu companheiro R. V. Pound realizaram uma experiência na qual criaram um estado de temperatura negativa para spins nucleares em LiF. (Phys.Rev.,81: 279). Mais tarde, em 1956, N. F. Ramsey reproduziu experiências desse tipo (Phys. Rev., 103:20). Porém, tais temperaturas não são obtidas passando pelo 0 K. Este continua experimentalmente inatingível. Em certas situações, as temperaturas negativas são até mais quentes que as positivas. (É interessante observar que o conceito de temperatura negativa também surge no estudo de masers.) (KUBO, R. 1971. Statistical Mechanics. North-Holland Publishing Company; RESNICK, R. e HALLIDAY, D. 1980. Física 2. Livros Técnicos e Científicos Editora, S. A.)
- (45) ASIMOV, op. cit.
- (46) BEDFORD, op. cit.
- (47) ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume VIII. The University of Chicago, 1978; ASIMOV, op. cit.; KISTNER, op. cit.
- (48) Um outro tipo de termômetro de líquido, diferente dos considerados até aqui, foi inventado pelo físico e matemático escocês Sir John Leslie (1766-1832) - o criador do gelo artificial - com o objetivo de medir diferença de temperatura, razão pela qual ficou conhecido como termômetro diferencial. Basicamente, ele é constituído por um tubo recurvado em U, em ângulos retos, terminados em duas ampolas, cheio com ácido sulfúrico corado de vermelho e completado com ar. A diferença de temperatura entre dois corpos é então medida pelo desnível da coluna do ácido nos dois ramos do termômetro, quando os corpos são colocados em contacto com as ampolas. (Convém registrar



- que em 1810 Leslie baixou a temperatura da água usando uma bomba de ar.) (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume VI. The University of Chicago, 1978.; GRANDE ENCICLOPÉDIA DELTA LAROUSSE, Volume 9. Editora Delta, S. A. 1976.)
- (49) GRAHAM, op. cit.
- (50) DAVY, H. 1821. Phil. Trans., pág. 431.
- (51) SIEMENS, C. W. 1871. Proc. Royal Soc., 19: 443; CALLENDAR, H. L. 1887. Phil. Trans., 178A: 161.
- (52) ZEMANSKY, op. cit.; BEDFORD, op. cit.
- (53) A Criogenia - a Física da produção de baixas temperaturas- será tratada em trabalho futuro desta Crônica do Calor.
- (54) Para uma descrição mais pormenorizada dos termômetros que usam a resistência elétrica como propriedade termométrica, veja-se: WERNICK, J. H. and WOLFE, R. 1978. Thermoelectric Devices IN: ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Macropaedia, Volume 18. The University of Chicago.; MIDDLETON, op. cit.)
- (55) Os trabalhos de Seebeck foram publicados na Abhandlungen der Königlichem Akademie der Wissenschaften in Berlin (págs. 265-374), em 1822-1823. Alguns excertos desses trabalhos podem ser vistos em MAGIE, op. cit.
- (56) Em 1834, o físico francês Jean-Charles-Athanase Peltier (1785-1845) observou que uma junção de dois metais (bismuto e cobre) se tornava mais quente quando era percorrida por uma corrente elétrica em um certo sentido, e se esfriava, quando esse sentido era invertido, constituindo-se em um efeito eletrotérmico, mais tarde conhecido como efeito Peltier. Os efeitos Seebeck e Peltier foram estudados matematicamente, em 1851, por W. Thomson (mais tarde, em 1892, Lord Kelvin). Este físico, em 1856, descobriu um outro fenômeno termoeletrico ao observar que em um pedaço de metal há o aparecimento de uma corrente elétrica, se o mesmo estiver sob um gradiente de temperatura. Tal efeito foi mais tarde chamado de efeito Thomson. Não obstante esforços realizados por físicos e químicos teóricos para compreender o aspecto irreversível desses

- três efeitos termoeletricos, o mesmo só ocorreu com os trabalhos do químico norueguês-norte-americano Lars Onsager (1903-; PNO, 1968), a partir de 1931. (BASSALO, J. M. F. 1987. Crônicas da Física, Tomo I. GEU/UFFA.)
- (57) KISTNER, op. cit.
- (58) ZEMANSKY, op. cit.; BEDFORD, op. cit.
- (59) A intensidade  $I$  é a energia radiada por unidade de tempo, por unidade de área e por unidade de ângulo sólido. (SEARS, F. W. 1959. Termodinâmica. Editorial Reverté, S. A.)
- (60) Os primeiros pirômetros eram bastantes grosseiros e foram usados na técnica de fabricação de cerâmicas. Dentre eles, destacam-se o pirômetro de argila de Wedgwood (provavelmente inventado pelo industrial inglês Josiah Wedgwood (1730 - 1795)), baseado na contração de uma pastilha de argila aquecida, e o pirômetro de cones normais de Seger, constituído por uma série de cones feitos de argila de ponto de fusão conhecido (de 600 a 2000 °C). A temperatura de um alto-forno era então determinada pela observação de quais cones fundiam ou não, ao serem introduzidos no mesmo. (PERUCCA, E. 1955. Física General y Experimental. Volume I: Mécanica-Calor. Editorial Labor, S. A.; DICTIONARY OF PHYSICS. Warner Books, 1985; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume X. The University of Chicago, 1978.)
- (61) A radiação infravermelha foi descoberta pelo astrônomo alemão Sir William (Friedrich Wilhelm) Herschel (1738-1822), em 1800. (GIBERT, op. cit.)
- (62) GIBERT, op. cit.
- (63) Para uma excelente discussão sobre o papel de Planck na explicação da lei da radiação do corpo negro, vejam-se os textos: MEHRA, J. and RECHENBERG, H. 1982. The Historical Development of Quantum Theory. Volume 1, Part 1. Spring-Verlag e JAMMER, M. 1966. The Conceptual Development of Quantum Mechanics. McGraw-Hill Book Company.

- (64) BEDFORD, op. cit.
- (65) BASSALO, J. M. F. e CATTANI, M. 1977. Sobre a Forma de Linhas Espectrais. O Liberal, 9 de outubro.
- (66) BEDFORD, op. cit.
- (67) A piroeletricidade é a propriedade que certos cristais, como a turmalina e o sulfato triglicínico, têm de adquirir cargas elétricas de sinais contrários nas faces opostas quando submetidos à variação de temperatura. (DICTIONARY OF PHYSICS, op. cit.)
- (68) Para uma descrição mais detalhada desses termômetros, veja-se BEDFORD, op. cit.

Original recebido em 10/01/90

Versão revisada em 12/04/90

Aceito para publicação em 28/11/90