

História da Física

A termometria nos séculos XIX e XX

(*The thermometry in the XIXth and the XXth centuries*)

Denise Prazeres Lopes Pires¹, Júlio Carlos Afonso¹ e Francisco Artur Braun Chaves²

¹*Departamento de Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

²*Departamento de Física da Matéria Condensada, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Recebido em 14/6/2005; Revisado em 7/10/2005; Aceito em 23/1/2006

Este trabalho descreve alguns aspectos da evolução da medida da temperatura. No século XIX a concepção do zero absoluto rompeu com a arbitrariedade das escalas termométricas então em uso, que eram baseadas na dilatação volumétrica de líquidos como mercúrio e etanol. Novos métodos de medição de temperatura foram desenvolvidos, sendo a base do funcionamento de termopares e pirômetros. A construção e o uso do termômetro foram reconhecidos como etapas fundamentais no ensino da física experimental em escolas e universidades. A associação do termômetro com o densímetro foi de grande importância no controle de processos industriais e como ferramenta de ensino. Novos formatos foram propostos para novas aplicações na ciência e na indústria. A contribuição mais importante ao longo do século XX foi o estabelecimento das escalas internacionais de temperatura. O formato do termômetro clássico baseado na expansão térmica de um líquido se manteve essencialmente o mesmo nos últimos 300 anos. Contudo, existe uma clara tendência à substituição dos termômetros de mercúrio por modelos digitais.

Palavras-chave: termometria, termômetro, escala termométrica.

This work describes some aspects on the evolution of the temperature measurement. In the XIXth century, the concept of absolute zero was a great advance since no arbitrary points were needed, in contrast to the current thermometric scales based on the volumetric expansion of liquids such as mercury and ethanol. Other temperature measurement methods were developed, being the principle of thermocouples and the pyrometers. The construction and use of a thermometer were early recognized as fundamental steps in teaching experimental physics in secondary schools and universities. The association between the thermometer and the densimeter was of great value for control of industrial processes and teaching purposes. The instrument found new designs in order to cover its new applications in science and industry. The most important contribution in the XXth century was the establishment of international temperature scales. The design of the classical thermometer based on the thermal expansion of a liquid has been essentially the same along the last 300 years. However, there is a clear tendency to replace such models by digital versions.

Keywords: thermometry, thermometer; thermometric scale.

1. A necessidade do termômetro

Através de seus sentidos o homem trava conhecimento com o mundo físico que o cerca. A primeira noção de temperatura de um sistema é estabelecida a partir da sensação térmica que o tato proporciona, traduzida pelos termos frio, quente, gelado etc. O conhecimento empírico do calor e da temperatura foi se acumulando desde tempos muito longínquos na evolução da humanidade [1].

No entanto, para fins científicos, o critério “sensitivo” para avaliação das temperaturas é vago e impreciso, pois depende da pessoa e das condições nas

quais a mesma se encontrava anteriormente. Além de ser um instrumento “diferencial” (uma vez que só consegue distinguir entre “mais frio” e “mais quente” em relação à sua própria temperatura), o corpo humano induz facilmente o observador em erro, dado que é sensível a outras grandezas, como por exemplo a condutividade térmica [2-5] (uma maçaneta metálica “parece mais fria” ao tato do que a madeira da porta onde se encontra colocada, apesar de estarem ambas à mesma temperatura).

Daí a necessidade de se estabelecer um instrumento padronizado de medida de temperatura que independa do sentido do tato. Chama-se termômetro o instru-

¹E-mail: julio@iq.ufrj.br.

mento para medir a temperatura dos corpos. Ele faz uso de comparações entre a variação de propriedades das substâncias como volume, pressão, resistência elétrica, variação de cor, etc. para relacioná-las com a variação da temperatura [1-5].

Embora se trate de uma grandeza fortemente inserida no cotidiano, a temperatura apresenta alguns aspectos que a fazem um caso peculiar entre as grandezas físicas. Basta pensar, por exemplo, que se forem unidos dois pedaços de metal com 1 m de comprimento cada o comprimento total resultante será de 2 m; já o mesmo não se passa ao juntar dois corpos encontrando-se cada um deles inicialmente à temperatura de 10 °C, pois não passaremos a ter um corpo a 20 °C, mas sim a 10 °C (a temperatura é uma propriedade intensiva).

2. Princípios gerais de uma escala termométrica

A maneira mais fácil de estabelecer uma escala termométrica é achar uma substância que possua uma propriedade que se modifica de modo regular com a temperatura e tenha praticidade de uso. Por exemplo, o comprimento de uma barra aumenta (dilatação), quando esta se torna mais quente. A temperatura t da barra é avaliada indiretamente pelo valor assumido pelo comprimento L .

Sendo x uma grandeza conveniente que define uma das propriedades do corpo (no caso acima, $x = L$), a cada valor de x faz-se corresponder um determinado valor t de temperatura. Ao aquecer um corpo, ocorrem concomitantemente três dilatações: a linear, a superficial e a volumétrica, No caso da barra, o comprimento é a dimensão preponderante, de sorte que a dilatação linear é a relevante neste caso.

A grandeza x é denominada grandeza termométrica. A correspondência entre os valores da grandeza x e da temperatura t constitui a função termométrica. A utilização do termômetro para avaliação da temperatura de um sistema fundamenta-se no fato de que, após algum tempo em contato, o sistema e o termômetro alcançam o equilíbrio térmico [1,2,5]. Se for empregada uma substância em que o fenômeno da dilatação seja marcante, pode-se medir a quantidade da dilatação ou da contração pondo-a em contato com um corpo de temperatura diversa, e conhecer, assim, a temperatura deste último corpo.

Existem vários tipos de termômetros que diferem um do outro pela grandeza termométrica. Nos termômetros de líquido, como os de mercúrio e de etanol, a grandeza termométrica é o volume do mesmo que, ao variar, faz mudar a altura da coluna. Nos termômetros de gás a grandeza termométrica é o volume do gás (se a pressão permanece con stante) ou a pressão do gás (quando o volume é constante). No termômetro de resistência de platina a grandeza termométrica é a resistência elétrica de um fio desse metal.

O modelo mais comum é o termômetro de mercúrio (esquema na Fig. 1). A expansão térmica desse metal é uniforme, prestando-se bem para medidas de temperatura entre -30 °C e + 320 °C. Ele não adere ao vidro. Sua aparência metálica facilita a leitura. O etanol é usado para medições de temperaturas baixas, onde o mercúrio congela (-38,9 °C). Corantes costumam ser adicionados para visualizar a leitura, visto que o álcool é incolor [2,3,5]. Ao bulbo que contém o líquido, adapta-se uma haste capilar. O pequeno diâmetro visa exatamente destacar a dilatação ou a contração da substância, aumentando a precisão da leitura [1.2.5]. Apesar dos líquidos não terem forma própria e estarem contidos em recipiente sólidos, o que permite apenas o estudo da dilatação volumétrica de líquidos, essa dilatação, sob as condições de construção do termômetro, pode se processar de forma uniforme, desde que respeitados os limites das temperaturas de fusão e de ebulição da substância [6,7].

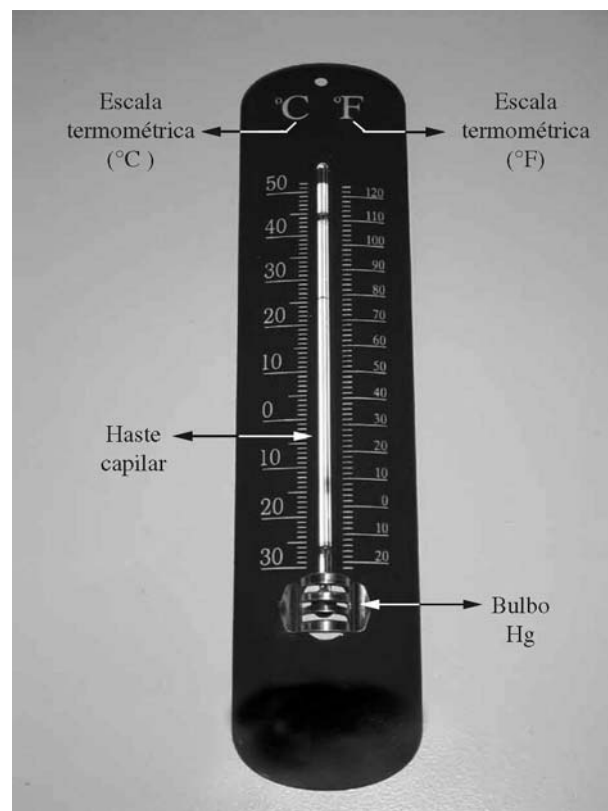


Figura 1 - Termômetro comum evidenciando o líquido inserido no bulbo e na haste capilar.

O tubo capilar deve ser feito de vidro capaz de resistir ao intervalo de temperatura em que o termômetro será utilizado, bem como ser livre de quaisquer rugosidades e irregularidades internas, o que comprometeria a precisão do instrumento [2,8]. Além disso, não deve ser quimicamente reativo com o líquido. Para tornar desprezível a dilatação do vidro frente à do líquido, emprega-se material que tenha sofrido processo de recozimento [6,7]. O tubo deve ter em toda parte o mesmo

diâmetro interno afim de que as divisões iguais da escala correspondam a iguais variações de temperatura, ou seja, a leitura seja linear [5,7,8]. No enchimento do termômetro de mercúrio, adapta-se um funil no topo da coluna e aquece-se o reservatório (bulbo) para dilatar o ar, tornando-o rarefeito; coloca-se então o metal no funil e resfria-se o reservatório. O ar contrai-se e puxa o mercúrio para dentro. Repete-se esta operação até o enchimento do bulbo e da parte inferior do tubo. Para que a dilatação do líquido seja uniforme, o ar deve ser expulso do interior do tubo capilar. Aquece-se o mercúrio contido no bulbo até que o tubo fique cheio por completo de líquido; separa-se o funil e fecha-se o topo do instrumento a fogo (solda). Ao resfriar, faz-se vácuo acima da coluna do mercúrio. Para líquidos como o etanol, deixa-se um pouco de ar para evitar a fragmentação da coluna líquida quando do resfriamento.

Na construção do termômetro, a sensibilidade é parâmetro crucial e pode ser entendido sob dois pontos de vista [9,10]: a) a rapidez de resposta do instrumento às variações de temperatura, e b) a capacidade de distinguir pequenas variações de temperatura. No caso (a), o termômetro possui reservatório com pequena quantidade de líquido, o que permite estabelecer o equilíbrio mais rapidamente; na situação (b), aumenta-se o espaçamento entre as frações de grau da escala termométrica, o que exige maiores massas de líquido ou então restringe-se o seu funcionamento a uma faixa de temperatura estreita, como é o caso do familiar termômetro clínico.

A rigor, os termômetros de dilatação de líquidos, baseiam-se na lei de expansão volumétrica do líquido com a temperatura dentro de um recipiente fechado [1,5]. Esta relação não é linear, porém, para diferenças de temperaturas pequenas, a função termométrica se reduz a uma forma linear do tipo:

$$t(x) = ax + b, \quad (1)$$

onde t é a temperatura da substância utilizada e que muda com a propriedade x da substância. As constantes a e b dependem da substância utilizada e podem ser calculadas especificando dois pontos na escala de temperatura. Para isso, escolhem-se dois sistemas cujas temperaturas sejam invariáveis no decorrer do tempo e que possam ser reproduzidas facilmente quando necessário. Em geral, os sistemas (pontos fixos) escolhidos são: a) primeiro ponto fixo (ponto do gelo) - fusão do gelo sob pressão normal (uma atmosfera): t_G , e b) segundo ponto fixo (ponto do vapor) - ebulição da água sob pressão normal (uma atmosfera): t_V . O intervalo delimitado entre as marcações feitas (correspondentes às temperaturas t_V e t_G) é dividido em partes iguais. Cada uma das partes desse intervalo é a unidade (o grau) da escala.

O conjunto dos valores numéricos que pode assumir a temperatura t constitui a escala termométrica, a qual é estabelecida ao se graduar um termômetro. Os valo-

res numéricos atribuídos à temperatura de um sistema qualquer dependem da escala usada, mesmo quando elas estão baseadas nos mesmos pontos de referência [2,3]. A rigor, o número que indica a temperatura é um valor arbitrário definido quando do estabelecimento da escala. Assim, um corpo a 30 °C é mais quente que um outro a 10 °C, mas isso não significa que o primeiro corpo seja três vezes mais quente que o segundo.

3. A evolução da medição da temperatura

3.1. Primórdios (séculos XVI-XVIII)

A invenção do termoscópio, termômetro cujo princípio físico era a expansão do ar [5,11,12], teve papel primordial no desenvolvimento da termologia, sendo mencionado por numerosos estudiosos entre o final do século XVI e o início do XVII. Este instrumento (Fig. 2) consiste de um bulbo contendo um tubo longo com um extremo mergulhado em um líquido (água, etanol, vinho) [2,3]. Um pouco do ar no tubo era expulso antes de colocar o líquido. Isto fazia com que este subisse no tubo. Quando o ar restante no tubo e no bulbo era aquecido ou esfriado, o nível do líquido no tubo variava, refletindo uma mudança na temperatura do ar. Uma escala no tubo permitia que uma medida dessas flutuações fosse feita. Um grave defeito deste aparelho é a sua sensibilidade à variação da pressão atmosférica no local onde ele se encontrava, pois ele era um instrumento aberto ao meio exterior. Além disso, o líquido (sensor termométrico) evaporava-se com o tempo, tornando as leituras ainda mais inexatas e não reproduzíveis [3,5].

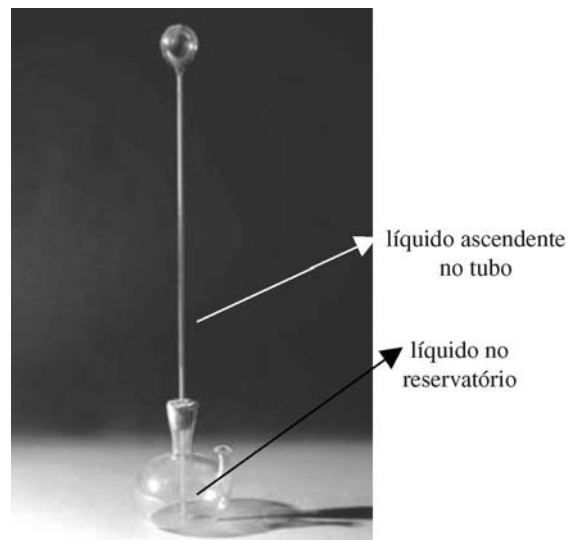


Figura 2 - Esquema de termoscópio do tipo usado por Galileu Galilei.

O desenvolvimento seguinte teve lugar em Florença, na chamada Academia Dei Cimento (1657-1667). O líquido de enchimento era preferencialmente o etanol,

por se dilatar mais que o mercúrio, também aparentemente testado [2,7]. O formato dos termômetros era idêntico aos de hoje, eram fechados (ao contrário dos termoscópios), mas o ar interior não era expulso antes da selagem do tubo, o que impedia a dilatação uniforme do líquido. Porém, ao selar o tubo, a influência da pressão atmosférica sobre a medida desaparecia. Esse aspecto foi um importante avanço na evolução do instrumento. Aparentemente, os pontos fixos eram as temperaturas do inverno e verão florentinos.

Em 1668 Joachin Dalence (1640-1707) foi o primeiro a afirmar que eram precisos dois pontos fixos para se determinar uma escala [2,5,12]. Com base no termômetro de etanol, estabeleceu como pontos fixos o ponto de fusão do gelo e o da manteiga! Em 1694, Renaldini (1615-1698) trocou o ponto de fusão deste pelo de ebulição da água, que era mais prático e reprodutível. Isaac Newton (1642-1727) publicou em 1701 um artigo, *A Scale of Degrees of Heat and Cold*, onde também mencionava a ebulição da água como segundo ponto fixo em sua escala termométrica, além da fusão do gelo (esse artigo também menciona a lei de resfriamento que leva seu nome). A grande dificuldade neste aspecto era o emprego de toda sorte de misturas refrigerantes (água + gelo, gelo + sal de cozinha, gelo + cinzas, gelo + carvão, neve + etanol, neve ou gelo em fusão...) e de vários sensores de temperatura (afora o álcool e o mercúrio, tem-se referência ao uso de alcatrão, óleo de linhaça e de azeite de oliva). Assim, determinar a “temperatura” de um corpo naquele tempo dependia do modo de cada um construir seu instrumento [2,3,6,7,11].

Em 1702, o astrônomo Ole Roemer (1644-1710) utilizando dois pontos fixos em sua escala (fusão do gelo e ebulição da água) deu início à criação de escalas termométricas que se assemelham às que se conhecem hoje em dia, e à construção de termômetros muito próximos aos que se conhece hoje [2,5,7]. Contudo, o uso sistemático de termômetros teve um início bastante difícil. Face a problemas culturais, de comunicação, guerras, diferentes interpretações do fenômeno da temperatura e diferentes maneiras de construir o instrumento, uma enorme quantidade de escalas termométricas foram propostas ao longo do século XVIII, o que dificultava enormemente a interpretação de resultados obtidos em um país em outros. Há referência a 27 escalas em uso na Europa em 1778! [5,11]. Três dessas escalas difundiram-se no meio científico, sendo bastante usadas ao longo dos séculos XIX e XX [2,3,6,7,9,13]: a) A escala Réaumur, de René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), baseada na expansão térmica do etanol. Os pontos fixos eram: o ponto de congelamento da água (0°R) e o ponto de ebulição desta (80°R); b) a escala Fahrenheit, devida a Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736), onde os pontos fixos eram: a temperatura de uma mistura de água, gelo e cloreto de amônio (0°F) e a temperatura de corpo humano (100°F); c) a escala Celsius, proposta por Anders Celsius (1701-1744). Usou o

ponto de ebulição da água em uma extremidade (0°C) e o de congelamento na outra (100°C). A inversão da escala tal como se usa hoje é motivo de controvérsias, mas, talvez isso se deva a outro sueco, o médico Carl von Linné ou Carolus Linnaeus (1707-1778) que convenceu um fabricante de instrumentos científicos, Daniel Ekström (1711-1760), que era mais conveniente para seu trabalho.

Naquela época, as escalas sempre se iniciavam do zero, diferindo apenas sobre a posição desse zero segundo a mistura refrigerante usada. Ao que parece, o que se buscava era trabalhar com misturas refrigerantes as mais frias possíveis para a marcação do “zero” [2,5,6,7].

Os trabalhos de Fahrenheit foram primordiais para o desenvolvimento da moderna termometria. Ele construiu um termômetro de mercúrio (1714) de uso prático (menor tamanho), adotando também a prática de ferver o tubo para expulsar o ar do interior antes do fechamento do mesmo. Além disso, desenvolveu um método para tratar o mercúrio de forma que este não aderisse a um tubo de vidro. Na época, os termômetros feitos com etanol tornavam difícil medir altas temperaturas porque o ponto de ebulição do líquido é muito baixo ($78,3^{\circ}\text{C}$). Os cientistas costumavam misturar água para compensar esse problema, mas a dilatação do material não era uniforme. Isso impedia que a escala do termômetro tivesse subdivisões pequenas. Essa era a grande vantagem do mercúrio sobre o álcool. As pesquisas de Fahrenheit, a partir dos trabalhos de Guillaume Amontons (1663-1705), confirmaram que cada líquido possui um ponto de ebulição fixo e também que o ponto de ebulição varia com a pressão. O modelo de termômetro de Fahrenheit revolucionou o sistema de medidas termométricas devido à sua precisão, reprodutibilidade e à qualidade de construção dos modelos por ele produzidos [3,7,9,13].

Em 1794, definiu-se que o grau termométrico seria a centésima parte da distância entre o ponto de fusão do gelo e o de ebulição da água fervente. Surgia assim, a escala centígrada, a outra denominação da Escala Celsius (em 1948, a IX Conferência Internacional de Pesos e Medidas mudou a menção para grau Celsius) [5].

3.2. Século XIX: A consolidação da termometria

A partir do momento em que a temperatura passou a ser determinada com precisão satisfatória, várias grandezas ganharam um importante significado prático no desenvolvimento da Física e da Química a partir do final do século XVIII. Conceitos como calor específico, calores latentes de fusão e de vaporização, condutividade térmica, etc, foram estabelecidos e ganharam metodologias práticas de medida, inviáveis se a termometria não tivesse atingido o grau de desenvolvimento verificado a partir da época de Fahrenheit [14,15].

Desde o início do século XIX, a temperatura foi reconhecida como um dos pontos-chave do ensino básico em Física devido à sua importância na caracterização e na determinação de inúmeros fenômenos físicos, químicos e biológicos. Essa noção impôs-se no ensino das “ciências naturais” e perdura até hoje na atual organização das disciplinas da área de “ciências”, ministradas aos ensinamentos fundamental e médio [16-19].

As experiências mais básicas envolvem a calibração deste instrumento, muitas vezes fabricado pelos próprios alunos em experimento anterior [17-20]. Esta calibração se faz por meio do emprego de dois pontos fixos, quase sempre o ponto de fusão do gelo e o de ebulição da água. Os equipamentos para essa finalidade variavam bastante no formato. No caso da fusão do gelo, havia sempre uma previsão de isolamento térmico (para retardar o derretimento do gelo) e orifícios de escoamento para drenar a água produzida durante o experimento. A construção e a calibração de um termômetro podem ser consideradas como experiências clássicas na área de ensino.

Os experimentos em que o termômetro desempenhava papel primordial eram bastante numerosos, sendo propostos numa fase mais avançada do ensino; alguns exemplos são listados a seguir:

a) *Determinação da densidade máxima da água*, baseada no procedimento de Thomas Hope (1766-1844) [3,20,21];

b) *Determinação dos calores latente e de vaporização*, onde a água era quase sempre usada como substância nos experimentos [17,20,21];

c) *Estudo da fusão e da ebulição*: a fusão, e especialmente a ebulição, dependem da pressão reinante no meio considerado [16,20];

d) *Estudo da dilatação dos sólidos (linear, superficial, volumétrica)*, cuja modificação de suas dimensões se expressam pelos coeficientes de dilatação linear (α), superficial (β) e volumétrica (γ) [17-19];

e) *Determinação da condutividade térmica*, posto que a propagação do calor depende da condutividade térmica do material [16,19,20];

f) *Varição da densidade com a temperatura* [2,3,17,18,21];

g) *Destilação* [16,20];

h) *Calefação* [16,20];

i) *Estudo da convecção* [21];

j) *Conservação de materiais quentes ou frios* [21].

Medir temperaturas também é fundamental na indústria. Afora a destilação, tem-se a *liquefação de gases* e o emprego de *máquinas térmicas*, onde diferenças de temperatura são necessárias para o funcionamento de máquinas a vapor, e a obtenção de oxigênio, nitrogênio e outros gases pela liquefação seguida de destilação fracionada do ar.

3.3. Século XIX: O zero absoluto

As moléculas de um gás estão em movimento desordenado, denominado agitação ou movimento térmico. Quanto mais intensa a agitação térmica das moléculas, maior será a energia cinética de cada uma e em consequência maior a temperatura [14,15]. Assim, pode-se imaginar que a temperatura mais baixa que pode existir é um estado térmico em que a agitação térmica, isto é, as moléculas estão em repouso. A esse limite inferior de temperatura dá-se o nome de zero absoluto.

Baseado neste estado térmico William Thomson (1824-1907, mais tarde Lord Kelvin) estabeleceu, em 1848, a escala absoluta [1,2]. Kelvin verificou que a pressão de um gás diminuía de $1/273$ do valor inicial quando resfriado a volume constante de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Concluiu, então que a pressão seria nula quando o gás estivesse a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como a pressão do gás é devida ao bombardeio das moléculas sobre as paredes do recipiente, no estado térmico de pressão nula, as moléculas do gás deveriam estar em repouso. Se a temperatura é uma medida do grau de agitação das moléculas, ela deve ser nula quando a agitação for nula. A escala absoluta criada por Kelvin tem origem (zero) no zero absoluto e adota como unidade o kelvin (símbolo K) cuja extensão por definição é igual à do grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Comparando as indicações da escala Celsius e da escala absoluta Kelvin, para um mesmo estado térmico, nota-se que a temperatura absoluta é sempre $273,15$ unidades mais alta que a temperatura Celsius correspondente.

Nessa discussão, passa-se por alto a questão do real estado físico do gás nas vizinhanças do zero absoluto. Contudo, baseado nos trabalhos de Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832), que idealizou um ciclo que proporcionaria rendimento máximo a uma máquina térmica (ciclo de Carnot), e cujo rendimento não depende da natureza do agente térmico utilizado na máquina (depende apenas das temperaturas absolutas das fontes quente e fria), é possível dar uma outra interpretação da escala absoluta de temperatura [1,14,15].

Na máquina de Carnot a grandeza termométrica é a quantidade de calor trocada com as fontes quente e fria. No ciclo de Carnot:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}, \quad (2)$$

onde Q_1 é a quantidade de calor cedida pela fonte quente, Q_2 é a quantidade de calor não convertida em trabalho, T_1 é a temperatura da fonte quente e T_2 é a temperatura da fonte fria.

Adotando o zero absoluto (0 K) como a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot, o rendimento é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

Se a temperatura da fonte fria (T_2) for 0 K, tem-se que $\eta = 1$ (100%).

Portanto, o zero absoluto ou zero Kelvin (0 K) é a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot que apresenta rendimento 100% ($\eta = 1$). Nessa situação, a máquina térmica converte integralmente calor em trabalho, o que não é possível, não há como realizar essa conversão em um processo cíclico. Daí conclui-se que o zero absoluto é inatingível [4,15]. Apesar disso, pesquisas recentes [22] empregando o condensado de Bose-Einstein permitiram atingir temperaturas da ordem de $4,5 \times 10^{-10}$ K. Em 1940, o valor mais baixo atingido era 0,015 K [9].

Além da escala absoluta proposta por Kelvin, existe uma outra escala absoluta proposta por William John Macquorn Rankine (1820-1872), chamada de escala Rankine, hoje praticamente sem uso, e designada por R . A relação entre as duas escalas absolutas é $R = 1,8$ K.

O estabelecimento de um conceito de temperatura baseado em considerações distintas do sentido do tato representou um enorme avanço na Física, mas surpreende que o conceito do zero absoluto tenha passado por décadas na mais completa obscuridade. Compêndios da história da Física e livros didáticos do ensino secundário (atual médio) e superior editados no Brasil ou no exterior até os anos 1940 mal citavam a “existência” do zero absoluto. As menções encontradas pareciam enquadrá-lo como um conceito mais do campo filosófico do que da física experimental propriamente dita. O avanço tecnológico da instrumentação da área da criogenia fez com que o trabalho a baixas temperaturas se tornasse viável.

O século XIX possui uma marca determinante na história da termometria: enquanto até o século XVIII tinha-se todo tipo de escala termométrica e diversos modelos de termômetros, este século se caracterizou pela consolidação do modo de fabricação industrial de modelos que pudessem ser perfeitamente reprodutíveis e o número de escalas termométricas em uso foi significativamente reduzido. Ainda deve-se mencionar que o conceito de temperatura absoluta rompeu a idéia única da arbitrariedade das escalas termométricas. A expansão das aplicações e a maior multiplicidade de modelos permitiu ao termômetro conquistar uma posição de destaque no campo da instrumentação científica [16,20,23].

3.4. Século XX: Revisões e redefinições

3.4.1. Termômetro legal - Solução Giauque [1, 14]

O termômetro legal é o termômetro de gás a volume constante, no qual a grandeza termométrica é a pressão do gás. Ele é, por definição, o termômetro padrão, devendo os outros termômetros serem aferidos em com-

paração a ele. Conforme esquema na Fig. 3, esse termômetro consiste de um recipiente A que contém o gás sob baixa pressão. A pressão do gás é medida através da altura h da coluna de mercúrio que preenche o manômetro M . O volume do gás é mantido constante, mediante a movimentação vertical do reservatório R que contém mercúrio e que se comunica com a parte inferior do manômetro. O gás utilizado geralmente é o hélio ou o hidrogênio extremamente rarefeito (quase vácuo). Nessas condições, a função termométrica é linear.

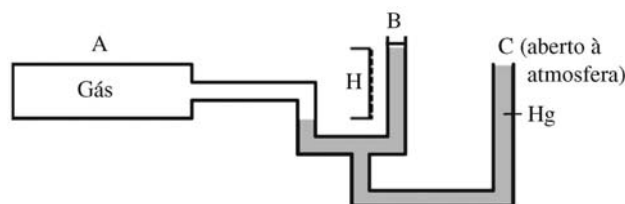


Figura 3 - Termômetro de gás a volume constante: o volume do gás é mantido constante pela movimentação do reservatório R . A cada temperatura corresponde uma altura h de mercúrio.

Existe um zero natural nessa função termométrica - é o ponto em que a pressão do gás ideal é zero. Logo, apenas um outro ponto precisa ser definido, para estabelecer a função termométrica do termômetro legal.

Desde 1954, por proposta de William Francis Giauque (1895-1982), Prêmio Nobel de Química em 1949, o ponto fixo adotado é o ponto triplo da água, estado térmico onde coexistem gelo, água líquida e vapor d'água, em equilíbrio. A este estado térmico corresponde para a temperatura o valor de 273,16 K (0,01 °C).

Seja p_T a pressão que o gás do termômetro exerce na temperatura do ponto triplo da água, p é a pressão do gás que corresponde a uma temperatura T qualquer. Como o gás sofre um processo isocórico, tem-se:

$$\frac{p}{p_T} = \frac{T}{T_T}, \quad (4)$$

$$T = T_T \left(\frac{p}{p_T} \right), \quad (5)$$

$$T = 273,16 \left(\frac{p}{p_T} \right), \quad (6)$$

que constitui a função termométrica do termômetro legal, sendo p_T um valor constante previamente determinado. O estabelecimento do ponto triplo da água como único ponto fixo para definir a escala do termômetro legal é conhecido como solução Giauque.

Uma “célula” de ponto triplo é mostrada na Fig. 4. A célula é resfriada até que a água, gelo, e vapor de água estejam em equilíbrio. A temperatura é 0,01 °C por definição. Um termômetro pode ser calibrado inserindo-o no tubo central.

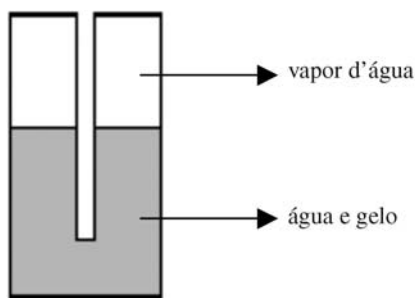


Figura 4 - Descrição de uma célula de ponto triplo da água para calibração de termômetros.

3.4.2. Escala internacional de temperatura [24-26]

Por razões de praticidade e precisão nas medidas de temperatura, foi criada uma escala baseada em fenômenos de mudança de estado físico de substâncias puras, que ocorrem em condições únicas de temperatura e pressão. São chamados de pontos fixos de temperatura. No início do século XX, contatou-se a necessidade de uma escala universal de temperatura definida de modo a ser precisa, reprodutível e simples de usar. Chamou-se esta escala de IPTS - Escala Prática Internacional de Temperatura. A primeira escala prática internacional de temperatura somente surgiu em 1927, face à ocorrência da Primeira Guerra Mundial. Foi revista e modificada em 1948 (IPTS-48). Em 1968 uma nova edição foi publicada (IPTS-68).

Desde 01/01/1990 está em vigor a ITS-90 (Escala Internacional de Temperatura), definida em fenômenos determinísticos de temperatura e que redefiniu alguns pontos fixos de temperatura, como visto na Tabela 1. Ela fora estabelecida três anos antes, na XVIII Conferência Geral de Pesos e Medidas.

Tabela 1 - Pontos fixos estabelecidos na ITS-90, comparados aos valores fixados na IPTS-68.

Pontos fixos	IPTS-68	ITS-90
Ebulição do oxigênio	-182,962 °C	-182,954 °C
Ponto triplo da água	+0,010 °C	+0,010 °C
Solidificação do estanho	+231,968 °C	+231,928 °C
Solidificação do zinco	+419,580 °C	+419,527 °C
Solidificação da prata	+961,930 °C	+961,780 °C
Solidificação do ouro	+1064,430 °C	+1064,180 °C

A introdução dessa nova escala de temperaturas trouxe como consequência a modificação da quase totalidade dos valores numéricos de temperatura. Este aspecto pode ter algumas consequências importantes para todos os que trabalham em áreas onde são necessárias medições rigorosas da temperatura. Uma dada temperatura expressa com base na ITS-90 tem um valor numérico diferente daquele que tinha quando era expressa a partir da IPTS-68, exceto nos casos do zero

absoluto (0 K), da temperatura do ponto triplo da água e de alguns outros pontos. A título de exemplo, o ponto de ebulição da água, à pressão atmosférica “normal” era de 100 °C pela IPTS-68, sendo agora 99,974 °C. Outras grandezas muito utilizadas nos vários domínios técnicos e científicos, que também são afetadas por estas alterações são, por exemplo, a capacidade calorífica, a entalpia e a entropia.

3.4.3. Definição da unidade SI de temperatura termodinâmica [24-26]

A medição das grandezas físicas requer a adoção de um sistema de unidades. Toda a moderna metrologia está baseada num conjunto de definições constantes do Sistema Internacional de Unidades (SI). A temperatura constitui uma das sete unidades ditas “de base”, tendo por unidade o kelvin, o qual se encontra assim definido: “o kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água”. Esta definição foi aprovada pela XIII Conferência Geral de Pesos e Medidas, em 1967, sendo uma revisão da definição primeiramente introduzida em 1954.

O SI reconhece que os valores de temperatura expressos em kelvins não são adequados para a vida diária, acrescentando-lhe a definição de *grau Celsius*, de acordo com a expressão $273,15 + t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K}$ em que t é a temperatura termodinâmica em graus Celsius e T é a temperatura termodinâmica equivalente em kelvins.

4. Medição de altas temperaturas

O uso de líquidos como sensor de temperatura é limitado pelo ponto de ebulição dos mesmos, bem como pela resistência térmica do material de constituição do termômetro. Um laboratório pode possuir fornos de calcinação (muflas) que superam 1000 °C de temperatura de trabalho. Assim, diferentes metodologias foram desenvolvidas para determinar temperaturas elevadas. Os instrumentos concebidos para esta finalidade são os termopares e os pirômetros.

4.1. Termopar [23,27]

Na prática, são pares de fios de metal dissimilares juntados ao menos em uma extremidade, e que geram uma diferença de potencial (tensão) termoeletrica entre a junção e o par aberto de acordo com o tamanho da diferença da temperatura entre as extremidades. São aplicados extensamente na ciência e na indústria.

Em 1821, o físico Thomas Johann Seebeck (1770-1831) observou que, unindo as extremidades de dois metais diferentes x e y (Fig. 5) e submetendo as junções a e b a temperaturas diferentes T_1 e T_2 , surge uma corrente “ i ” pelo anel.

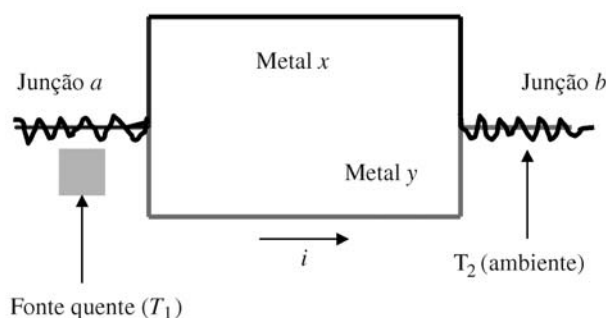


Figura 5 - Dois metais diferentes, x e y com as extremidades unidas (junções a e b) e mantidas a temperaturas diferentes (T_1 e T_2).

Este fenômeno é conhecido por "Efeito Seebeck". Em outras palavras, ao se conectar dois metais diferentes (ou ligas metálicas), têm-se um circuito tal que, se as junções forem mantidas em temperaturas diferentes, surgirá uma f.e.m. termoelétrica e uma corrente elétrica " i " circulará pelo chamado "par termoelétrico" ou "termopar". Qualquer ponto deste circuito poderá ser aberto e nele inserido o instrumento para medir a f.e.m. (força eletromotriz, normalmente da ordem de mV). Uma consequência imediata do efeito Seebeck é o fato de que, conhecida a temperatura de uma das junções, pode-se, através da f.e.m. produzida, saber a temperatura da outra junção. Historicamente [5,23], merece destaque o termopar de platina com 10% de ródio/platina, desenvolvido em 1886 por Henri-Louis Le Châtelier (1850-1936). Ele foi durante muitos anos o instrumento de interpolação das escalas internacionais de temperatura acima de 630 °C. Hoje, é padrão secundário de diversos laboratórios.

Deve-se ter um cuidado todo especial com a junta de referência (chamada às vezes de junta fria), uma vez que a flutuação de sua temperatura pode acarretar erros nas aplicações práticas dos termopares. Assim sendo, procura-se manter a junta de referência em locais onde ocorrem pequenas flutuações de temperatura; no passado, usava-se como referência a temperatura de 0 °C. Na atualidade, os voltímetros que medem a f.e.m. de termopares dispensam esta junta de referência, pois têm circuitos que compensam eletronicamente o fato de a temperatura ambiente não ser 0 °C.

Ao colocar uma junta soldada do termopar num local onde deseja-se medir a temperatura T_1 (junta quente) e a outra extremidade num local à temperatura T_2 (junta fria), aparecerá uma tensão entre os extremos do fio que estão no local à temperatura T_2 . Esta tensão é normalmente de poucas dezenas de milivolts e seu valor varia linearmente com a diferença de temperatura entre as duas extremidades do termopar (desde que essa diferença não seja muito grande):

$$V = K(T_1 - T_2), \quad (7)$$

onde K é a constante termoelétrica que depende dos

materiais componentes dos fios do termopar.

Atualmente [23,27,28], as combinações de materiais mais comumente empregadas na fabricação de termopares são ferro-constantan, cromel-alumel, cobre-constantan, platina/platina-ródio e cromel-constantan. A escolha dos materiais depende da faixa de trabalho (máxima e recomendável), da precisão e da diferença de tensão gerado na faixa de trabalho, e da resistência dos materiais às condições de processo.

4.2. Pirômetro [23,28,29]

O termo "pirômetro" (do grego *pyros*, fogo) foi originalmente atribuído a todos os instrumentos destinados à medição de temperaturas acima da incandescência (aproximadamente 550 °C). Pirômetros são sensores de temperatura que utilizam como informação a radiação eletromagnética emitida pelo corpo a medir.

A idéia de um aparelho para medir temperaturas a partir da radiação emitida pelos corpos incandescentes foi sugerida por Antoine Becquerel (1852-1908), e colocada em prática por Henri-Louis Le Châtelier em 1892, com a construção do primeiro modelo do que foi chamado de pirômetro ótico [28]. A primeira patente desse pirômetro foi concedida em 1901 e os primeiros modelos comerciais foram introduzidos em 1931 [29].

Os pirômetros não necessitam de contato físico, diferente dos termopares, e podem ser divididos em duas classes distintas: os pirômetros óticos que atuam dentro do espectro visível e os pirômetros de radiação que atuam na faixa do visível ao infravermelho curto.

Os pirômetros óticos funcionam basicamente pelo método da comparação. A energia radiante é medida por comparação fotométrica da cor (radiação de corpo negro) do corpo a medir em relação à cor de uma fonte padrão, como um filamento de tungstênio de uma lâmpada elétrica projetada para esse fim. A comparação da cor é feita pelo observador e é dependente da sensibilidade do olho humano em distinguir a diferença de cor entre duas superfícies. Um filtro monocromático para comprimento de onda de radiação vermelha (1.65 mm) auxilia a operação. A comparação da cor é feita basicamente variando a corrente através do filamento da fonte de cor padrão até que esta se iguale àquela do objeto medido.

Nesse pirômetro é necessário que o corpo emita ondas na região do visível, devendo estar a uma temperatura de, no mínimo, 750 °C (diz-se que o corpo está ao rubro). A temperatura máxima de medição é de 2900 °C, mas com anteparo absorvente pode chegar a 5500 °C.

Já os pirômetros de radiação são instrumentos que medem a taxa de emissão de energia por unidade de área numa faixa de comprimento de onda relativamente grande (do visível ao infravermelho curto), utilizando um sistema que coleta a energia visível e infravermelha de um alvo e a focaliza em um detector, sendo conver-

tida em um sinal elétrico. Somente a energia emitida entre 0,3 e 20 mm tem magnitude para ser útil, isto é, o visível e o infravermelho próximo. A Fig. 6 resume o princípio básico do instrumento.

Todos os corpos com temperatura superior a 0 K emitem radiação eletromagnética (energia). A energia emitida por unidade de tempo aumenta à medida que a temperatura do objeto aumenta (fator T^4). Este fato permite que se possam fazer medições de temperatura a partir de medições da energia emitida.

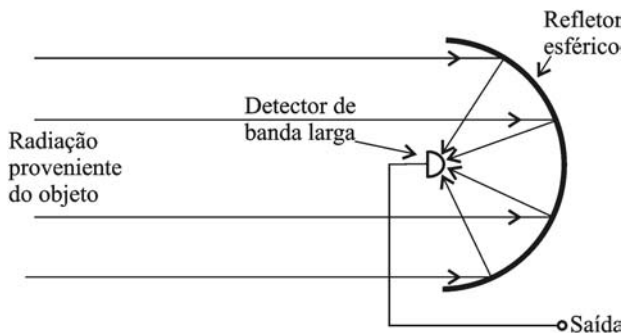


Figura 6 - Esquema genérico de um pirômetro de radiação.

A energia irradiada por um corpo depende, de fato, da emissividade (e) de sua superfície. Ela é máxima para um corpo negro ($e = 1$). Os pirômetros de radiação são calibrados em relação a um corpo negro, e um fator de correção deve ser empregado quando a medição é realizada em um corpo com emissividade diferente. Para isso deve-se conhecer a emissividade da superfície que está sendo medida, o que é um fator de incerteza, visto que a emissividade varia com o estado da superfície, temperatura, etc. Outro fator de incerteza na medição de corpos com emissividade inferior a 1 diz respeito à influência dos corpos vizinhos: a radiação emitida por um corpo vizinho pode vir a ser refletida na superfície de medição e atingir o sensor, falseando a medição.

Outro aspecto diz respeito ao material das lentes utilizado. Materiais como o vidro não transmitem a radiação em comprimentos de onda superiores a 2,8 mm, o quartzo transmite somente até 4 mm, fluoreto de cálcio vai até 10 mm, e iodeto/brometo de tálio transmitem até 30 mm. Na medição de temperaturas mais baixas deve-se ter em mente essas características na hora de escolher o pirômetro adequado. Os pirômetros de radiação diferenciam-se pelo tipo de detector, sendo: térmicos (respondem à energia de todo o espectro e possuem um tempo de resposta relativamente grande) ou de fótons (a radiação incidente libera elétrons na estrutura do detector e produz um efeito elétrico mensurável, e apresentam uma constante de tempo na ordem de 1 ms).

5. A evolução do termômetro de líquido

A análise dos mais de 500 termômetros existentes no acervo do Museu da Química Professor Athos da Sil-

veira Ramos (1906-2002), instalado no Instituto de Química da UFRJ, mostra que não houve mudança significativa no desenho desse instrumento ao longo de mais de 140 anos. (deve-se comparar as Figs. 1 e 7). O tamanho do mesmo pode variar segundo a finalidade à qual se destina (processos e experimentos em escala de bancada, piloto ou industrial), mas pode-se afirmar que o princípio de construção de termômetros que utilizam como grandeza termométrica a expansão térmica de um líquido não se modificou ao longo do tempo [16,30,31].



Figura 7 - Termômetro a álcool (corante amarelo) na escala Celsius (1872). A escala (-10/+50 °C) é gravada na madeira, onde se insere o tubo e o bulbo de vidro na cavidade central. Pertenceu à Escola Politécnica do Rio de Janeiro, atual Escola Politécnica da UFRJ.

No que diz respeito à comparação com figuras de modelos anteriores à época abrangida pelo acervo em exame [2-5,32], observa-se uma tendência à redução do tamanho do instrumento, resultando em aparelhos mais leves e fáceis de manusear, reduzindo o risco de quedas, acidentes e contaminação ambiental devido ao mercúrio. Existe também um outro aspecto relevante, que é a passagem da escala de fabricação artesanal para o modo de produção industrial. Nos Estados Unidos, a primeira empresa foi provavelmente instalada em 1820 [33] na cidade de Nova Iorque, enquanto que na Europa isso já ocorrera no final do século XVIII [34].

Os termômetros de mercúrio são amplamente dominantes sobre os de etanol, estes últimos contendo escalas que nunca ultrapassavam + 50 °C (ou + 40 °R); isso se explica porque os usos mais comuns em trabalhos experimentais e em práticas de ensino exigem aquecimento, situação em que o mercúrio tem maior faixa de temperatura de trabalho que o álcool.

Até por volta de 1920 a escala Réaumur era bastante freqüente nos termômetros, mesmo aqueles de origem não francesa (basicamente, alemã), sendo a partir daí suplantada pela escala Celsius. Apenas nos termômetros oriundos dos Estados Unidos e da Inglaterra é que se encontra a escala Fahrenheit.

Nessa mesma época passou a ser bastante comum a presença de jogos de termômetros de faixa estreita. Suas aplicações compreendem o controle de temperatura de banhos termostáticos, a determinação de propriedades físico-químicas (como a viscosidade, a tensão superficial e a densidade), e o controle de reações químicas e procedimentos como a destilação.

5.1. O termômetro associado a um densímetro

Cerca de 60% do acervo examinado corresponde a instrumentos onde se associa um termômetro a um

densímetro (aparelho flutuador que permite determinar densidades sem o auxílio da balança). Eles podem ser divididos em três partes: a) O bulbo de mercúrio + o elemento flutuador; b) um corpo cilíndrico onde se insere a escala de temperatura por meio de uma tira de papel inserida em seu interior; c) uma haste cilíndrica concêntrica à parte anterior, mas de diâmetro menor, selada na parte superior, onde se insere pela parte interna a escala de densidade (ou outra variável relacionada) impressa em uma tira de papel. Esta escala atravessa a superfície do líquido de modo a permitir a leitura desejada. O instrumento é projetado para que se mantenha na posição vertical (o centro de massa fica localizado na parte inferior do mesmo).

O termômetro-densímetro tornou-se a partir do século XIX um instrumento importante na indústria e no ensino. Numa época em que a análise química ainda iniciava seu desenvolvimento, o emprego da determinação de propriedades físicas era extremamente importante para se caracterizar um dado material. Assim, grandezas como os pontos de fusão e de ebulição, o índice de refração, a densidade, a cor e outros parâmetros físicos eram extremamente valiosos para os analistas. A associação do densímetro com o termômetro compreende-se facilmente, pois a densidade é dependente da temperatura. Isso vale também para solutos dissolvidos em solventes, significando um instrumento de controle para a avaliação da concentração pela determinação da densidade da solução correspondente. Isso tinha particular valor em processos industriais [35]. Os livros de “física industrial” (operações unitárias da indústria química) davam grande ênfase à temperatura e à densidade como meio de controle de processos, como atesta L. Vigreux (1854-1910) (o mesmo idealizador da coluna de destilação que leva seu nome): “não se pode controlar processos unitários sem que se saiba manejar instrumentos de medida de propriedades físicas” [36].

A praticidade do uso, o baixo custo e a leitura simultânea de dois parâmetros de grande importância prática respondeu pela ampla aceitação do instrumento no mercado consumidor. Até hoje, particularmente nas indústrias fermentativas, o termômetro-densímetro desempenha papel primordial, sendo também bastante usado em experimentos de físico-química e no preparo de soluções de ácidos e hidróxido de amônio, a partir da avaliação da concentração do material de partida por meio do referido instrumento.

A escala de densidade varia de líquido para líquido e para cada soluto dissolvido em um solvente. No caso de soluções é comum fixar na haste do instrumento a escala de concentrações do soluto, obtida através de uma regra de três, onde a cada densidade corresponde uma determinada concentração do soluto dissolvido. Por conta disso, existem vários tipos de instrumentos: acidímetros (densidade de soluções de ácidos como clorídrico, fosfórico, nítrico, etc), sacarímetros (soluções de sacarose), alcoolímetros (soluções de etanol) e salímetros (densidade de sais dissolvidos) representam praticamente todo o universo de instrumentos existentes no acervo.

Mesmo nos modelos mais antigos, encontra-se agregada à escala um temperatura de referência onde o aparelho foi construído (normalmente, 15 ou 20 °C, 12 ou 16 °R) e os fatores de correção caso se empregasse o instrumento fora desta referência.

As Figs. 8 e 9 mostram exemplos representativos de termômetros-densímetros. É digno de menção que, mesmo decorrido mais de 100 anos, todos os instrumentos continuam funcionando corretamente, fato admirável, levando-se em conta a delicada tarefa da correta colocação da escala (em papel) da temperatura e da concentração (ou densidade) dentro do instrumento; isto demonstra a robustez e a durabilidade do mesmo.



Figura 8 - Termômetro (°R)-alcoolímetro (40-100% v/v), 1885. Fabricado na Alemanha em vidro sódico. Naquela época, o próprio mercúrio era o elemento de equilíbrio do instrumento.

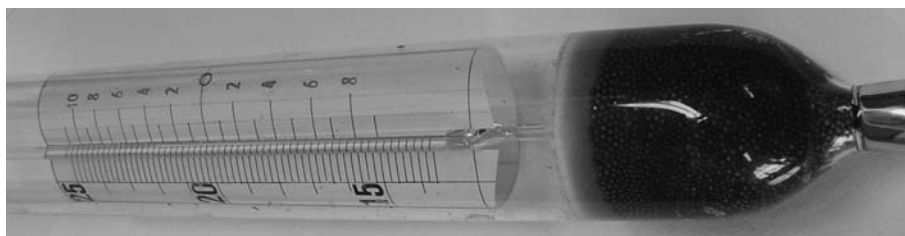


Figura 9 - Alcoolímetro (20-96° Gay Lussac), 1986, calibrado a 20 °C e fator de correção para diferentes temperaturas. Fabricado na Alemanha em vidro pyrex. Observa-se uma importante mudança na construção do instrumento: a substituição, por volta de 1920, do mercúrio pela bolinha de chumbo como elemento de equilíbrio. As bolinhas, inicialmente soltas, passaram mais tarde a ser imobilizadas com resina.

6. Outros tipos de termômetro

6.1. Termômetro de máxima e de mínima

A primeira concepção de um termômetro deste tipo parece ser devida a Robert Hooke (1635-1703), que buscou determinar a temperatura do fundo do mar (termômetro de mínima). Contudo, o modelo de dupla marcação foi introduzido por Rutherford (1753-1819), combinando um de mercúrio (temperatura máxima) e outro de álcool (temperatura mínima).

Este termômetro dá as temperaturas máximas e mínimas ocorridas durante certo período, por exemplo, durante um dia. O bulbo deste termômetro é alongado e o seu tubo é recurvado em forma de U. Na curvatura inferior existe uma pequena porção de mercúrio que é impelida pelo álcool para o tubo das temperaturas máximas, quando faz calor, ou para o das temperaturas mínimas, quando a temperatura decresce. O mercúrio, por sua vez, impele dois índices, colocados cada um num ramo do tubo. Estes índices se deslocam, no interior do tubo, com leve atrito; e fixam-se na posição em que o mercúrio os deixa, marcando deste modo as temperaturas máxima e mínima. No início de um novo período de observação reconduzem-se os índices, que são de ferro esmaltado, para junto do mercúrio, por meio de um pequeno ímã.

Apesar deste uso especial dentro do campo da Meteorologia [9,10], o termômetro de máxima/mínima foi bastante usado no controle de processos químicos em escala piloto e industrial (Fig. 10), onde a temperatura é um parâmetro crítico (reações perigosas ou cujo rendimento depende de seu controle).



Figura 10 - Termômetro de máxima para uso em equipamentos de escala piloto evidenciando o sistema que permite medir até 125 °C. Procedência alemã, feito em vidro neutro, originário da Escola Nacional de Química da Universidade do Brasil, anos 1950.

6.2. Termômetro registrador

Neste modelo, o termômetro registra as temperaturas durante todo um período, por exemplo, uma semana. É muito usado nos observatórios de Meteorologia, mas também encontra emprego industrial, no controle de processos. A Fig. 11 mostra um modelo de termômetro registrador. Ele é provido de um cilindro giratório. A agulha contendo a tinta é movida por um tubo metálico, flexível, recurvado e cheio de petróleo. As dilatações do petróleo obrigam o tubo a distender-se, sendo os seus movimentos transmitidos à agulha por um sistema de pequenas alavancas [9,10].

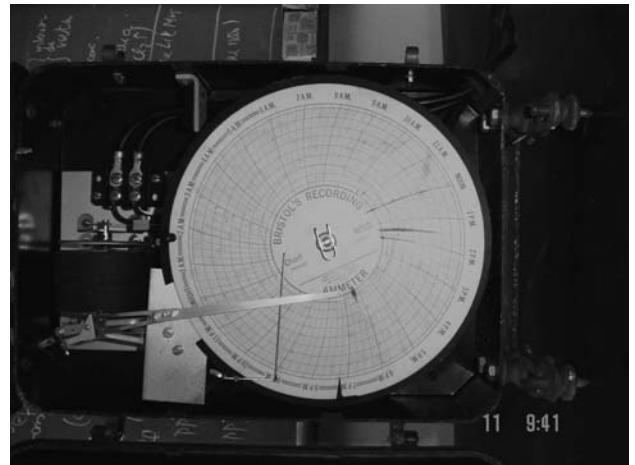


Figura 11 - Termômetro registrador utilizado em medições geológicas (1941), utilizado no Laboratório de Produção Mineral do Ministério da Agricultura (LPM).

6.3. Termômetro clínico

Santorio adaptou o termoscópio para a tarefa de determinar a temperatura do corpo humano. Segundo ele, *os pacientes reclamavam do bulbo do termômetro*. O uso do termômetro por Santorio e de outros dispositivos de medidas e quantificação do funcionamento do corpo humano ajudou a tirar muito do misticismo da medicina [37].

Thomas Clifford Allbutt (1836-1925) observou que, embora os termômetros já fossem bastante utilizados pelos médicos, eles eram desajeitados e de formato pouco cômodo; às vezes requeriam mais de 20 min para uma leitura confiável. Por volta de 1866, Allbutt inventou o termômetro clínico de mercúrio, muito menor que os modelos da época. Este novo termômetro requeria apenas 5 min para tirar a temperatura. O termômetro de Allbutt ainda é o termômetro clínico dominante, apesar da recente introdução do termômetro digital [37].

Segundo o testemunho do próprio Allbutt (1870) [38]:

Eu tenho achado que o termômetro de mercúrio é o melhor para uso comum vou trabalhar com os colegas Harvey e Reynolds para fabricar um termômetro preciso com uma nova forma. (...) Eu quase sempre uso a boca para tirar minha temperatura; para pacientes eu sempre uso a axila.

O termômetro clínico é um termômetro de máxima. O tubo termométrico apresenta nas proximidades do reservatório um estrangulamento (Fig. 12). Quando a temperatura sobe, o mercúrio se eleva na haste, mas, ao descer, por conta do estrangulamento, não retrocede imediatamente, ficando assim a coluna suspensa no tubo, o que permite determinar a maior temperatura atingida pelo corpo do paciente. Para fazer descer a coluna mercurial sacode-se o aparelho. Em geral, sua graduação vai apenas de 35 °C a 42 °C, e a divisão é feita em décimos do grau.

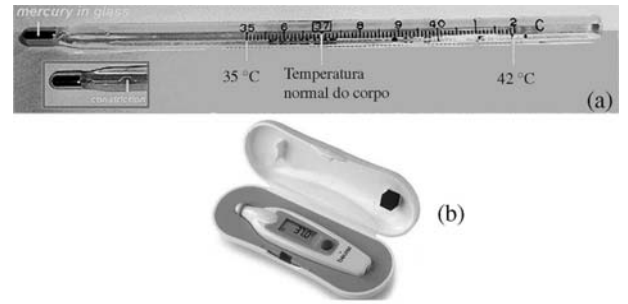


Figura 12 - Termômetro clínico clássico proposto por Allbutt (a), comparado a um moderno termômetro clínico digital (b), em formato de caneta, apropriado para uso sob a axila.

6.4. Pirômetros e termopares

A Fig. 13 mostra que a principal evolução do pirômetro é a digitalização dos modelos, acompanhado de sua redução de tamanho, facilitando o seu manejo.

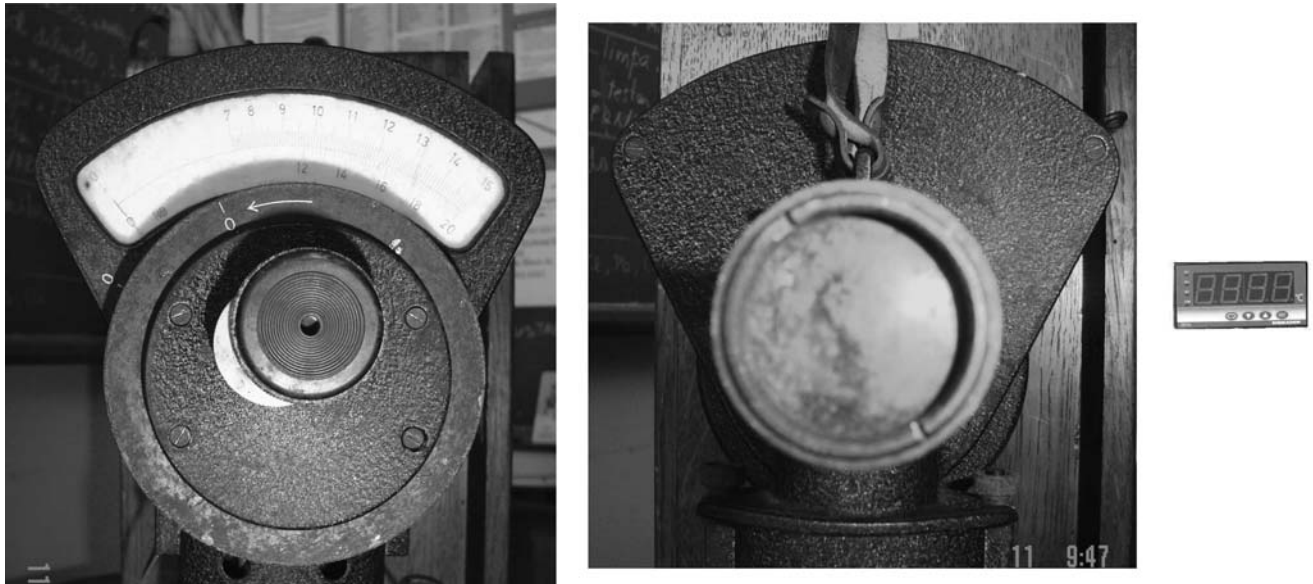


Figura 13 - Pirômetro ótico (1955) proveniente do Laboratório de Produção Mineral do Ministério da Agricultura (LPM) (à esquerda e ao centro). Faixa de temperatura: 700-2000 °C. Moderno pirômetro digital de radiação (à direita), observando-se a redução do tamanho do aparelho em relação à versão analógica da década de 50. A versão apresentada é bastante usada no controle da temperatura de fornos, muflas, autoclaves e similares (faixa de temperatura 500-1800 °C).

Tal como no caso dos pirômetros, os termopares apresentam duas importantes evoluções ao longo do século XX (Fig. 14): a substituição do modelo analógico pelo digital e a redução do tamanho do instrumento, fato esse também verificado no desenvolvimento de termopares de pequeno tamanho, capazes de serem inseridos em pequenos aparelhos.

7. O termômetro digital

As primeiras versões surgiram na década de 1970 [39], acompanhando a tendência notada em outros instrumentos de medida. Os termômetros digitais são sérios

candidatos a substituir os termômetros de mercúrio. Apesar da ampla utilização destes nos últimos 300 anos, os problemas ambientais ligados a este elemento químico fazem com que tendam a desaparecer dos laboratórios com a evolução do instrumental eletrônico de medição da temperatura, a qual busca substituir o metal no que for possível.

Não é objetivo detalhar o funcionamento destes instrumentos, mas é importante mencionar que um termômetro digital tem seu princípio de funcionamento baseado em sensores elétricos como termopares, termômetros de resistência e termístores (resistores que apresentam grande variação da resistência em função da variação da temperatura), além da radiação infra-

vermelha, versão que não exige contato físico entre o termômetro e o objeto cuja temperatura se deseja medir. A resposta desses sensores à temperatura é uma função não linear. Para converter a resposta do sensor em um sinal elétrico linearmente relacionado à temperatura é necessária alguma forma de linearização

[16,20] (segmentada, analógica e microprocessada, a mais precisa). Tendo em vista a sua finalidade, estes termômetros podem ser simples, de baixo custo, ou de grande complexidade e onerosos como, por exemplo, os modelos utilizados nas pesquisas a temperaturas abaixo de 0,01 K.

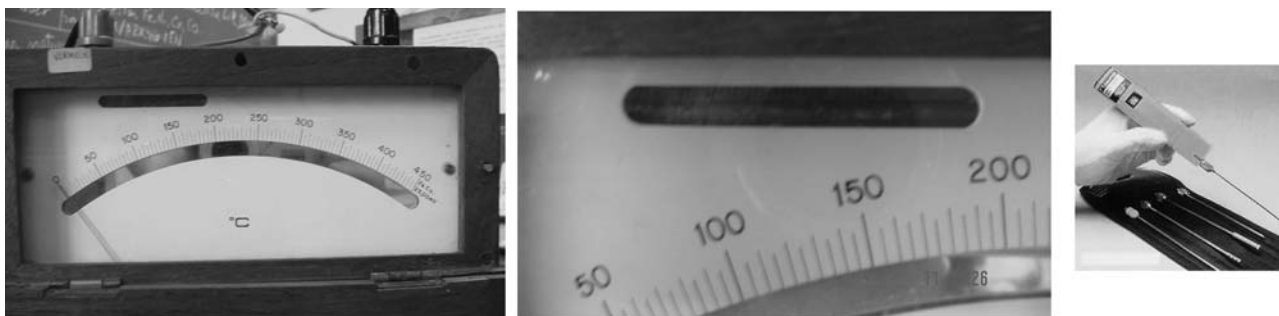


Figura 14 - Termopar analógico Fe-Constantan (1975) provido de regulador de zero, termômetro à álcool para correção de temperatura de referência, e espelho para redução do erro de paralaxe (esquerda e centro). Faixa de temperatura, 0-450 °C. Moderno termopar digital Fe-Constantan, usado no controle de processos químicos em escala de bancada e piloto. Cobre a faixa de temperatura -100 a 260 °C. A ponta pode ter vários formatos, para adaptar-se ao formato de instrumento onde será medida a temperatura (direita).

Tanto a faixa de operação quanto os limites de erro dependem bastante das propriedades do sensor utilizado. Uma das aplicações mais relevantes desses termômetros é como padrão secundário de temperatura (calibração).

Os modelos mais simples de termômetro digital apresentam a vantagem do baixo peso e de eliminar o erro inerente ao ser humano quando do emprego de um termômetro convencional (erro de paralaxe, regressão da coluna de mercúrio, tempo de leitura lento) [20]. Na medicina, este instrumento apresenta precisão da ordem de um décimo de grau e requer apenas cerca de um décimo do tempo necessário para tomar a temperatura do paciente em relação ao termômetro clínico clássico. Além desses empregos, deve-se destacar o uso crescente em objetos de decoração e funcionais, como materiais de escritório em geral, quadros, relógios e letreiros luminosos em locais públicos. Isso se deve à possibilidade de fabricar sensores de tamanhos variados, o que permite a inserção em toda uma variedade de objetos.

Além dos recursos eletrônicos, ainda podem ser encontrados os seguintes itens: presença de comando liga-desliga; ajuste de zero (calibração contra outro termômetro) e um circuito conversor nas escalas Celsius e Fahrenheit (mostrador multifuncional).

8. Conclusões

O termômetro, apesar de amplamente difundido e ser hoje um instrumento de excepcional versatilidade na indústria, na ciência e no cotidiano, mostrou uma evolução histórica bastante lenta, por conta do empirismo que envolvia o calor e os fenômenos a ele relacionados, além do individualismo de cada um tratar a temperatura a seu modo. Somente quando se conseguiu

fabricar instrumentos reproduzíveis e confiáveis, e estabelecer escalas termométricas de uso prático, é que o termômetro se impôs como um item essencial em laboratórios científicos. Em particular, o estabelecimento de um conceito de temperatura baseada em considerações termodinâmicas (levando à definição do zero absoluto) no século XIX foi um avanço extraordinário frente ao estabelecimento de escalas termométricas baseadas em pontos arbitrários.

A evolução da Física e da Ciência em geral fez com que o termômetro fosse essencial para a caracterização e a determinação de um número crescente de parâmetros físicos, químicos, biológicos, etc, valorizando este instrumento nas mais diversas áreas do conhecimento humano e transformando-o até hoje num item básico indispensável para a área de ensino e para o segmento industrial.

A evolução técnica do instrumento passou: (a) pela redução de seu peso, correspondendo ao emprego de modelos menores, (b) pela diversificação dos tipos de termômetro para aplicações específicas; (c) pela associação com outros instrumentos cujos parâmetros avaliados são dependentes da temperatura (como no caso da densidade); (d) pela redução das escalas termométricas hoje em uso; (e) pela substituição dos modelos baseados na dilatação de um fluido termométrico pelos termômetros digitais. O termômetro é apenas um dentre tantos exemplos onde a digitalização revolucionou o formato e a aplicabilidade dos instrumentos.

Além dos aspectos evolutivos em si sobre a medida de temperatura, é importante salientar que a introdução de novas fontes de energia térmica revolucionou a atividade industrial e o cotidiano das pessoas, inaugurando novas eras no progresso da humanidade, tal como atestado no advento da descoberta do fogo,

da I Revolução Industrial (carvão) e da II Revolução Industrial (eletricidade e petróleo). Para tal, o papel da termometria é vital para um emprego bem sucedido dessas fontes energéticas, desde a utilização do sentido do tato por nossos antepassados até o uso da instrumentação digital hoje em dia.

Referências

- [1] W.R. Fuchs, *Física Moderna* (Polígono, São Paulo, 1972).
- [2] E. Hoppe, *Histoire de la Physique* (Payot, Paris, 1928).
- [3] H. Volkringer, *Les Etapes de la Physique* (Gauthier-Villards, Paris, 1929).
- [4] H.C.M. Macedo, *Físico-Química I* (Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981).
- [5] <http://www.help-temperatura.com.br/html/interesse/files/HistoriaMedicaoTemperatura.pdf>, acessado em janeiro 2004.
- [6] J. Tillreux, *Traité Élémentaire de Physique* (Cr. Berenger, Paris, 1925).
- [7] O. Murani, *Trattato Elementare de Fisica* (U. Hoelpi, Milão, 1925).
- [8] C.F. Malta, *Compêndio de Physica Elementar e de Chimica Geral* (Jornal do Commercio, Rio de Janeiro, 1928).
- [9] O.B. Lourenço, *Física - Iniciação ao Estudo da Física Experimental* (Cia Editora Nacional, São Paulo, 1936).
- [10] A. Freitas, *Curso de Física* (Cia Melhoramentos, São Paulo, 1941).
- [11] <http://www.termometro.com.br>, acessado em abril de 2004.
- [12] <http://www.sobiografias.hpg.ig.com.br>, acessado em março de 2004.
- [13] B. Davis, *New Practical Physics* (The Macmillan Co, Nova Iorque, 1929).
- [14] O.K. Rice, *Critical Phenomena of Thermodynamics and Physics of Matter* (Univ. Press, Princeton, 1955).
- [15] R.C. Reid, J.M. Prausnitz and T.K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids* (Mc Graw-Hill, Nova Iorque, 1977), 3^a ed.
- [16] L. Michalski, K. Eckersdorf and J. McGee, *Temperature Measurement* (John Wiley & Sons, Nova Iorque, 2001), 2^a ed.
- [17] C.B. Boyer, *Amer. J. Phys.* **10**, 176 (1942).
- [18] S.F. Taylor, *Annals of Science* **5**, 129 (1942).
- [19] R. Vollmann, *Discovery* **20**, 378 (1959).
- [20] T.D. McGee, *Principles and Methods of Temperature Measurement* (John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1988).
- [21] C.G. Fraser, *The Story of Physics* (Reinhold Publishing Co., Nova Iorque, 1948).
- [22] A. Leanhardt, T.A. Pasquini, M. Saba, A. Schirotzek, Y. Shin, D. Kielpinski, D.E. Pritchard and W. Ketterle, *Science* **301**, 1513 (2003).
- [23] A.B. Fialho, *Instrumentação Industrial* (Érica, São Paulo, 2002), 2^a ed.
- [24] H. Preston-Thomas, *Metrologia* **27**, 1 (1990).
- [25] R.N. Goldberg and R.D. Weir, *Pure and Applied Chemistry* **64**, 10 (1992).
- [26] B.W. Mangum and G.T. Furukawa, *NIST Technical Note 1265* (1990).
- [27] D.D. Pollock, *Thermocouples: Theory and Properties* (CRS Press, Palo Alto, 1991).
- [28] <http://www.npl.co.uk/npl/publications/temperature>, acessado em março 2004.
- [29] F.A. Lira, *Metrologia na Indústria* (Érica, São Paulo, 2003), 3^a ed.
- [30] C. Guillaume, *Traité Pratique de la Thermométrie de Précision* (Gauthiard et Fils, Paris, 1889).
- [31] S.P. Oliver, *Dictionary of National Biography* (Oxford University Press, Londres, 1937), v. XIV, p. 473-475.
- [32] H.C. Bolton, *Evolution of the Thermometer, 1592-1743* (The Chemical Publishing Co, Easton, 1900).
- [33] www.classicautomation.com/Automation/Taylor_Heritage.htm, acessado em março 2005.
- [34] M.K. Barnett, *J. Chem. Educ.* **18**, 358 (1941).
- [35] A. Joannis, *Encyclopédie Industrielle - Traité de Chimie Organique Appliquée* (Gauthier-Villards et Fils, Paris, 1896), v. 2.
- [36] L. Vigreux, *Traité Théorique et Pratique de Physique Industrielle* (E. Bernard et Cie, Paris, 1893), v. 1.
- [37] <http://www.acponline.org/cgi-bin/medquotes.pl?subject=Thermometry>, acessada em março 2004.
- [38] A.T. Clifford, *Br Foreign Med-Chir Rev.* **45**, 429 (1870).
- [39] www.texto.de/Es/es/site/company/testory/17.jsp, acessado em maio 2004.