

Calor

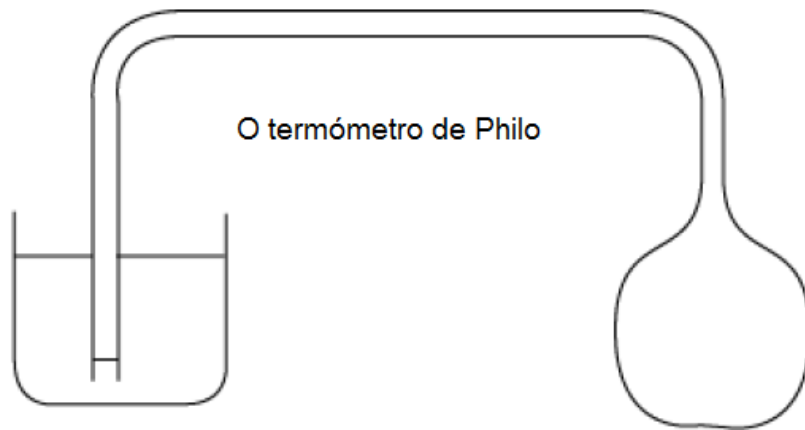
Michael Fowler

Ver e sentir diferenças de temperatura

Numa gama razoável de temperaturas, podemos ter uma ideia de quão quente uma coisa está simplesmente tocando-lhe. Mas isto pode não ser muito confiável – se puser uma mão em água fria, a outra em água quente, e depois mergulhar as duas ao mesmo tempo em água tépida, uma das mãos sentirá calor e a outra sentirá frio. Para algo que esteja demasiado quente para que se possa tocar-lhe, podemos ficar uma ideia da sua temperatura se nos aproximarmos e sentirmos o calor radiante. Se a temperatura aumentar ainda mais, o objecto começa a brilhar e então podemos *ver* que está quente!

O problema destas percepções subjectivas do calor é que podem não ser iguais para toda a gente. Se as nossas duas mãos não estão de acordo relativamente à temperatura da água, como é que um grupo de pessoas pode chegar a um consenso? Temos de construir um dispositivo qualquer, que responda à temperatura de uma forma simples e mensurável – precisamos de um termómetro.

O primeiro passo nesta estrada rumo a um termómetro foi dado por [Philo de Bizâncio](#), um engenheiro do segundo século AC. Ele pegou numa esfera oca de chumbo ligada e bem selada à extremidade de um tubo, cuja outra extremidade estava mergulhada em água num outro recipiente.



Citando Philo: “...se expuseres a esfera ao Sol, parte do ar aprisionado no tubo passará para fora quando a esfera ficar quente. Isso ver-se-á claramente porque o ar descerá ao longo do tubo até à água, agitando-a e produzindo uma sucessão de bolhas.

Agora se a esfera for novamente colocada à sombra, isto é, onde os raios do Sol não a possam alcançar, a água subirá e passará através do tubo...”

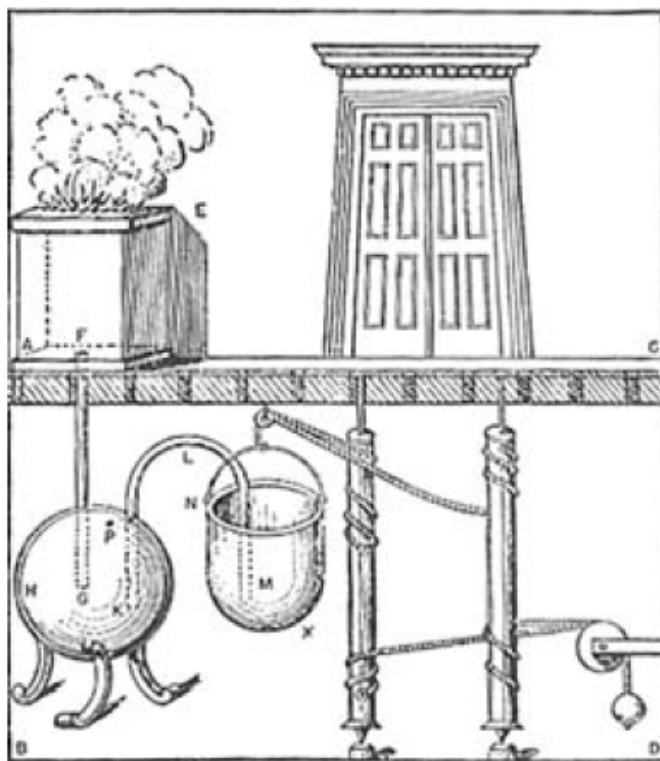
“Não importa o número de vezes que repitas a operação, acontecerá sempre a mesma coisa.

De facto, se aqueceres a esfera com fogo, ou mesmo se despejares água quente sobre ela, o resultado será o mesmo.”

Repare que Philo fez aquilo que um verdadeiro investigador científico deve fazer – verificar que a experiência era *reproduzível*, e estabeleceu que a expansão do ar era uma resposta à aplicação de *calor* à esfera, sendo *independente da fonte desse calor*.

Usos clássicos dramáticos de efeitos dependentes da temperatura

A expansão do ar pelo aquecimento tornou-se amplamente conhecida na era clássica, e era usada em vários dispositivos dramáticos. Por exemplo, Hero de Alexandria descreve um pequeno templo onde o fogo no altar faz abrir as portas.

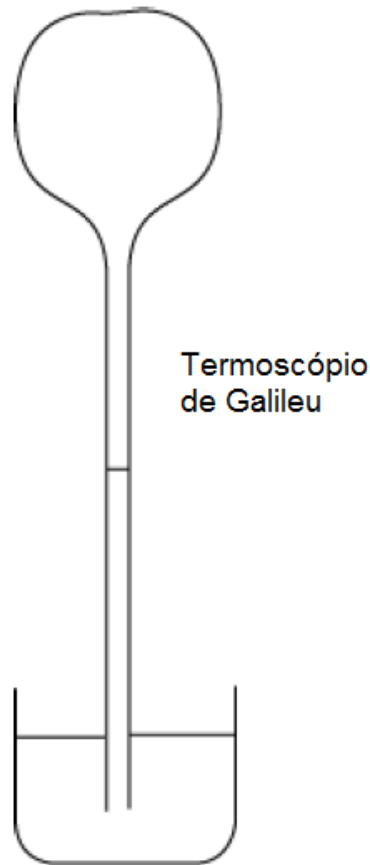


O altar é um grande caixa de ar, ligada por um tubo a um outro recipiente fechado com água. Quando se acende o fogo no topo do altar, o ar dentro da caixa aquece e expande-se para um segundo contentor com água. Esta água é forçada a sair através de um outro tubo para um balde suspenso por uma corda ligada às roldanas das portas, de modo que quando o balde se enche de água, desce e acciona as roldana que abrem as portas. O tubo deste balde vai quase até ao fundo, de modo que quando o fogo se apaga, a água é sugada de volta e as portas fecham-se. (Presumivelmente, assim que o fogo está aceso, o deus por trás das portas está pronto a trabalhar e as portas abrem-se...)

No entanto, nenhuma destas engenhocas era um *termómetro*. Não houve nenhuma tentativa (pelo menos da qual hajam registos) da parte de Philo ou dos seus seguidores para tentar medir *quantitativamente* quão quente ou fria estava a esfera. E o “metro” em termómetro significa medição.

O primeiro termómetro

Galileu reclamou a invenção do primeiro termómetro. Bom, na realidade, ele chamou-lhe [termoscópio](#), mas ele *tentou* medir “graus de quente e frio” de acordo com um [colega](#), e isso qualifica-o como um termómetro. (T tecnicamente, um *termoscópio* é um dispositivo que permite *ver* variações da temperatura, enquanto que um *termómetro* pedir *medir* essas variações.) Galileu usou um balão invertido com pescoço tubular, como um ovo de galinha com um longo tubo de vidro no topo.



Ele primeiro aqueceu o tubo com as suas mãos e depois mergulhou-o imediatamente em água. Registou que a água subiu no balão até uma altura de cerca de “um palmo”. Mais tarde, ou Galileu ou o seu colega Santorio Santorio pôs uma escala de papel junto ao tubo para ler as variações da altura da água. Isto definitivamente tornou-o um termómetro, mas não é claro quem foi o primeiro a ter essa ideia (eles discutiram sobre isso). E, de facto, este termómetro tinha problemas.

Questão: quais problemas? Se ocasionalmente encher o balão com água, porque é que este termómetro não se adequa ao regista das variações diárias de temperatura?

Resposta: porque também é um barómetro! Mas Galileu não conhecia a pressão atmosférica.

Torricelli, um dos pupilos de Galileu, foi o primeiro a compreender, pouco após a morte de Galileu, que a verdadeira força responsável pela sucção era a pressão atmosférica; esta era uma explicação mecânica satisfatória, em contraste com a explicação filosófica “a natureza odeia o vácuo”. No ano 1640, Pascal

chamou a atenção para o facto de que a *variabilidade* da pressão atmosférica retirar toda a confiança a esse termómetro de ar.

Termómetros de líquidos em vidro foram usados desde o ano 1630, e eram obviamente insensíveis à pressão barométrica. Foram mantidos registos meteorológicos desta época, mas não houve uniformidade nas medições da temperatura até Fahrenheit, quase cem anos mais tarde.

A tabela de temperaturas anónima de Newton

A primeira sistematização de uma gama de diferentes temperaturas, “Graus de Calor”, foi escrita por Newton, mas publicada anonimamente em 1701. Presumivelmente ele sentiu que este projecto não tinha o significado intemporal de alguns dos seus outros feitos.

Tomando o ponto de fusão da água como zero, Newton descobriu que o ponto de ebulição era cerca de três vezes a temperatura do corpo humano, o ponto de fusão do chumbo oito vezes maior (na realidade é 327 °C, e como $8 \times 37 = 296$, está bastante perto!) mas para temperaturas mais altas, como as da madeira a arder, ele subestimou consideravelmente. Ele usou um líquido de óleo de sementes de linho num termómetro de água até ao ponto de fusão do estanho (232 °C). (O óleo de sementes de linho só ferve aos 343 °C, mas essa é também a sua temperatura de auto-ignição!)

Newton tentou estimar indirectamente as temperaturas mais altas. Aqueceu uma peça de ferro em fogo, deixando-a depois arrefecer por uma brisa constante. Descobriu que, pelo menos às baixas temperaturas que ele conseguiu comparar com o termómetro, a temperatura diminuiu em progressão geométrica, isto é, se demorava cinco minutos a descer dos 80 °C acima da temperatura do ar até aos 40 °C acima da temperatura do ar, então demoraria outros cinco minutos a descer até aos 20 °C, outros cinco para os 10 °C, e assim sucessivamente. Assumiu então que o mesmo padrão se mantinha mesmo nas altas temperaturas que ele não conseguia medir com o seu termómetro, e assim estimou a temperatura do fogo e do ferro em brasa. Não foi lá muito rigoroso – subestimou a temperatura do fogo como sendo cerca de 600 °C.

O excelente termómetro de Fahrenheit

O primeiro termómetro realmente bom, que usava a expansão do mercúrio num tubo capilar, foi fabricado por Fahrenheit no início do ano 1720. Ele teve a ideia de usar o mercúrio graças a um comentário de um colega, que disse que os barómetros de mercúrio necessitavam de correcções devido à expansibilidade do mercúrio com a temperatura. O ponto que era preciso ter em mente na construção de termómetros, e na definição de escalas de temperatura, era que nem todos os líquidos expandem uniformemente quando aquecidos – a água, por exemplo, inicialmente contrai-se a partir do ponto de fusão, e a partir dos quarenta graus Fahrenheit começa a expandir, portanto um termómetro de água não seria muito útil num dia frio. Também não é fácil fabricar um tubo capilar com *secção recta uniforme*, mas Fahrenheit conseguiu fazê-lo, e demonstrou o seu sucesso mostrando que os seus termómetros estavam todos em acordo numa grande gama de temperaturas. Felizmente, acontece que o mercúrio é bem comportado, no sentido em que a escala definida considerando que a sua expansão é uniforme coincide quase na totalidade com a verdadeira escala de temperatura, como veremos mais tarde.

O termómetro de ar de Amontons: a pressão aumenta linearmente com a temperatura

Um pouco antes (1702) Amontons introduziu um *termómetro de pressão de ar*. Ele estabeleceu que se o ar à pressão atmosférica (que ele diz ser 30 polegada de mercúrio) e à temperatura de fusão da água estiver aprisionado e for aquecido até ao ponto de ebulição da água, mas mantido a volume constante pelo aumento da pressão, então a pressão aumenta cerca de 10 polegada de mercúrio. Ele também descobriu que se o ar for comprimido inicialmente, até estar a uma pressão de sessenta polegadas de mercúrio à temperatura do gelo a derreter, então se aquecesse até à temperatura da água a ferver, e ao mesmo tempo adicionasse mercúrio à coluna para manter o volume de ar constante, a pressão aumentava vinte polegadas de mercúrio. Por outras palavras, ele descobriu que para uma quantidade fixa de ar mantido a volume constante num recipiente, a pressão aumentava cerca de 33% desde o ponto de fusão ao ponto de ebulição da água, e que essa percentagem era *independente da pressão inicial*.

Equilíbrio Térmico e a Lei Zero da Termodinâmica

Assim que o uso do termómetro se generalizou, tornaram-se possíveis observações mais precisas da temperatura e (como veremos) do *fluxo de calor*. Joseph Black, um professor da Universidade de Edimburgo nos anos 1700, reparou que um conjunto de objectos a diferentes temperaturas, se postos em contacto, ficariam eventualmente todos à mesma temperatura.

Ele escreveu, “*Pelo uso destes instrumentos [termómetros] aprendemos que se tomarmos 1000, ou mais, objectos de materiais diferentes, como metais, pedras, sais, madeiras, cortiça, penas, água e uma variedade de outros fluidos, apesar de estarem inicialmente com diferentes calores, e os deixarmos juntos numa sala sem fogo, e na qual o Sol não brilha, o calor será comunicado dos corpos quentes aos frios, durante algumas horas, talvez, ou durante um dia, ao fim do qual, se aplicarmos um termómetro a cada um deles em sucessão, ele mostrará exactamente o mesmo grau.*”

Dizemos hoje em dia que corpos em “contacto térmico” eventualmente atingem “equilíbrio térmico” – o que significa que eles atingem finalmente a mesma temperatura, a partir da qual deixa de existir fluxo de calor. Isto é equivalente a:

Lei Zero da Termodinâmica:

Se dois objectos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, então estão em equilíbrio térmico entre si.

O “terceiro corpo” numa situação prática é apenas o **termómetro**.

Talvez valha a pena notar que esta afirmação aparentemente trivial não era certamente óbvia antes da invenção do termómetro. Com apenas a sensação tátil, poucas pessoas acordariam que um pedaço de algodão e uma barra de metal, ambos a 0°C, estavam à mesma temperatura.

Medição do fluxo de Calor: unidades de Calor

A próxima pergunta óbvia é, podemos tornar mais *quantitativo* este “fluxo de calor” que ocorre entre dois corpos à medida que estes estabelecem equilíbrio térmico? Por exemplo, suponha que eu reproduzo uma das experiências de Fahrenheit, tomando 100 cc de água a 100°F, e 100 cc a 150°F, e os misturo dentro de

um recipiente isolado para que não haja fugas de calor. Qual é a temperatura final da mistura?

É claro que é perto de 125°F – nada de surpreendente, mas *diz-nos qualquer coisa!* Diz-nos que a quantidade de calor necessária para aquecer 100 cc de água dos 100°F aos 125°F é *exatamente* a mesma que a necessária para aquecer dos 125°F aos 150°F. Uma série destas experiências (realizadas por Fahrenheit, Black e outros) estabeleceram que a quantidade de calor necessária para aquecer 1 cc de água por um grau era *sempre* a mesma.

Isto permite definir uma **unidade de calor**. Talvez injustamente para Fahrenheit,

1 caloria é o calor necessário para aumentar 1 grau Celsius a temperatura de 1 grama de água.

(Celsius também viveu nos anos 1700. A sua escala tem o ponto de fusão da água em 0°C, e o ponto de ebulição nos 100 °C. A escala de Fahrenheit já não é utilizada em Ciência, mas mantém-se viva na engenharia nos EUA, e na Unidade Térmica Britânica (BTU), que é o calor necessário para aumentar 1°F a temperatura de uma libra de água.)

Calores Específicos e Calorimetria

Primeiro vamos definir **calor específico**:

O calor específico de uma substância é o calor necessário, em calorias, para aumentar 1 grau Celsius a temperatura de 1 grama dessa substância.

À medida que Fahrenheit continua as suas medições do fluxo de calor, rapidamente se tornou evidente que para diferentes materiais, a quantidade de calor necessária para aumentar um grau a temperatura de um grama era bastante diferente. Por exemplo, antes dessas experiências pensava-se que um cc de mercúrio, sendo muito mais pesado que um cc de água, necessitaria de mais calor para aumentar a temperatura. Mas acontece que este não é o caso – o próprio Fahrenheit fez a medição. Num recipiente isolador, chamado um “calorímetro” ele adicionou 100 cc de água a 100°F a 100 cc de mercúrio a 150°F, e misturou para que rapidamente atingissem o equilíbrio térmico.

Questão: qual pensa ter sido a temperatura final, aproximadamente?

Resposta: A temperatura final foi, surpreendentemente, cerca de 120°F. 100 cc de água evidentemente “contêm mais calor” que 100 cc de mercúrio, apesar da enorme diferença de peso!

Esta técnica, chamada **calorimetria**, foi amplamente usada para medir os calores específicos de muitas substâncias diferentes, e inicialmente parecia não haver nenhum padrão claro. Como é que o calor específico do mercúrio podia ser tão baixo comparativamente ao da água? Assim que se fizeram mais experiências em substâncias diferentes, tornou-se gradualmente evidente que substâncias *mais pesadas*, paradoxalmente, tinham calores específicos *mais baixos*.

Conexão com a Teoria Atômica

Entretanto, esta abordagem quantitativa da observação científica espalhou-se à química. Nos finais dos

anos 1700, Lavoisier pesou os reagentes e produtos de reacções químicas. Isso envolveu a pesagem dos gases envolvidos, e portanto tinha que ter lugar em recipientes fechados para que, por exemplo, o peso do oxigénio utilizado e do dióxido de carbono consumido, etc, pudessem ser tidos em conta no estudo da combustão. *A grande descoberta foi que a massa não era criada nem destruída.* Ninguém se apercebera disto anteriormente porque nunca ninguém pesara os gases envolvidos. Esta descoberta tornou, repentinamente, a teoria atómica mais plausível, com a ideia de que talvez as reacções químicas fossem apenas rearranjos dos átomos em diferentes combinações.

Lavoisier também clarificou o conceito de elemento, uma ideia que foi retomada em 1800 por John Dalton, que argumentou que um dado composto consistia em moléculas idênticas, feitas de átomos elementares na mesma proporção, tais como H_2O (apesar de inicialmente se pensar ser HO). Isto explicava porque é que, quando as substância reagem quimicamente, como a combustão do hidrogénio para formar água, eram necessários exactamente oito gramas de oxigénio para cada grama de hidrogénio. (Bom, também podia produzir H_2O_2 sob certas condições, com exactamente dezasseis grama de oxigénio para uma de hidrogénio, mas estas simples razões de oxigénio necessário para as duas reacções eram explicadas por diferentes estruturas moleculares, e tornavam a hipótese atómica ainda mais plausível.)

Muito esforço foi dispendido na pesagem cuidadosa dos constituintes em muitas reacções químicas, construindo-se diagramas das moléculas. O resultado importante de todo este trabalho foi que se tornou possível listar os pesos relativos dos átomos envolvidos. Por exemplo, os dados sobre H_2O e H_2O_2 levaram à conclusão de que um átomo de oxigénio é dezasseis vezes mais pesado que um átomo de hidrogénio.

Deve-se enfatizar, contudo, que estes resultados não davam nenhuma pista relativamente ao actual peso dos átomos! Tudo o que se sabia era que os átomos eram tão pequenos que não podiam ser vistos mesmo com os melhores microscópios. Mesmo assim, o conhecimento dos pesos relativos de alguns átomos em 1820 conduziu a uma descoberta importante. Dois professores em França, Dulong e Petit, descobriram que para uma série inteira de elementos *o produto do peso atómica pelo calor específico era o mesmo!*

Elemento	Calor específico	Peso relativo dos átomos	Produto do calor específico pelo peso relativos
Chumbo	0.0293	12.95	0.3794
Estanho	0.0514	7.35	0.3779
Zinco	0.0927	4.03	0.3736
Enxofre	0.1880	2.001	0.3780

O significado disto, tal como eles fizeram notar, era que o “calor específico”, ou capacidade térmica, de cada *átomo* era o mesmo – um pedaço de chumbo ou um pedaço de zinco com o mesmo número de átomos teria a mesma capacidade térmica. Portanto átomos mais “pesados” não absorviam mais calor que os átomos mais leves para uma dada subida da temperatura. Isto explicava parcialmente porque é que o mercúrio tinha uma capacidade térmica surpreendentemente tão baixa. Claro que, não tendo nenhuma ideia do tamanho real dos átomos, era impossível fazer mais. E, de facto, muitos dos seus colegas não acreditavam em átomos sequer, portanto foi muito difícil convencê-los da importância desta descoberta.

Calor Latente

Uma das experiências de Black consistia em colocar uma panela com água ao lume, e observar a temperatura em função do tempo. Ele descobriu que aumentava linearmente, reflectindo o fornecimento de calor do fogo, até que a água começava a ferver, em que a temperatura se mantinha constante por um longo período de tempo. O vapor libertado estava à mesma temperatura (de ebulição) que a água. Portanto o que é que estava a acontecer ao calor fornecido? Black concluiu correctamente que era necessário calor para a água passar do estado líquido ao gasoso, isto é, vapor. De facto, era necessário fornecer muito calor: 540 calorias por grama, por oposição às 100 calorias por grama necessárias para ir da temperatura de fusão à temperatura de ebulição. Ele também descobriu que eram necessárias 80 calorias por grama para derreter o gelo, sem qualquer subida de temperatura. Esse calor é libertado quando a água congela novamente, portanto está de algum modo “escondido” na água. Ele chamou-lhe calor *latente*, significando calor escondido.

Livros utilizados na preparação desta aula:

A Source Book in Greek Science, M. R. Cohen e I. E. Drabkin, Harvard University Press, 1966.

A History of the Thermometer and its Uses in Meteorology, W. E. Knowles Middleton, Johns Hopkins Press, 1966.

A Source Book in Physics, W. F. Magie, McGraw-Hill, New York, 1935.



Tradução/Adaptação **Casa das Ciências 2009**