

Relatório 6 - Fenômenos térmicos e gases

Felipe Magina (15451791); Luan Leal (15470820);
Matheus Justino (14598021); Matheus Queiroz (15479562);
Micael Baruch (15578823)

2 de junho de 2025

1 Introdução

Fenômenos térmicos, sua manipulação e entendimento constituem uma parte fundamental do conhecimento humano, em particular dentro da área da termodinâmica. Seu estudo permite compreensão de diversos fenômenos, como mudanças de estado físico, expansão de materiais sob aquecimento e causas de variação de temperatura. Tendo isso em vista, este relatório discute a realização de cinco experimentos que englobam medição de temperatura, evaporação e dilatação de sólidos, líquidos e gases, além do uso utensílios que dependem desses fenômenos para seu funcionamento.

A primeira experimentação envolveu um Termoscópio de Galileu, instrumento inventado pelo cientista florentino que permite uma medição qualitativa da temperatura, fora de escala, sendo um precursor dos termômetros. O fenômeno ocorre graças ao aquecimento do ar em um bulbo que causa deslocamento de uma coluna de água, graças à propriedade geral de que o aumento de temperatura de um gás induz incremento em sua pressão e volume, como descrito pela Lei dos Gases Perfeitos, sendo ela uma boa aproximação para a maioria dos gases [3]:

$$PV = nRT$$

em que P é a pressão, V o volume, n o número de moles, R a Constante Universal dos Gases e T a temperatura. Com isso, no experimento é esperado observar uma expansão do gás ao aquecê-lo.

Segue-se então ao Termômetro de Galileu, que utiliza globos de vidro de diferentes densidades imersos em um tubo com um líquido, que flutuam ou afundam em função da variação de temperatura do fluido. O instrumento foi produzido a partir da descoberta de que a densidade de um líquido varia com a temperatura, uma vez que a densidade pode ser calculada por:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

onde ρ corresponde à densidade, m à massa e V ao volume. Sendo que no experimento a massa é mantida constante, enquanto o volume segue a fórmula geral para líquidos [3]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T$$

em que ΔV é a variação de volume percebida, V é o volume inicial, β é o coeficiente de dilatação volumétrica e ΔT é a variação de temperatura. Por fim, temos que a densidade está relacionada ao empuxo, pelo Princípio de Arquimedes:

$$E = \rho g V$$

no qual E refere-se ao empuxo, ρ à densidade, g à aceleração gravitacional e V ao volume de fluido deslocado. Com isso, obtém-se um utensílio que possibilita medição de algumas faixas de temperatura dentro de um intervalo a partir da observação da flutuação ou afundamento dos globos.

Em seguida, analisou-se um psicrômetro. Nele utilizam-se de dois termômetros, um deles umedecido, e obtêm-se medições de temperaturas diferentes, por conta da evaporação da água. Isso permite calcular a umidade relativa do ar, uma vez que quanto mais seco o ar, maior a taxa de evaporação [1]. Essa é uma forma relativamente simples de poder obter-se valores de umidade. Por fim, é esperado que o valor obtido no instrumento seja próximo à umidade real.

Quanto à próxima experimentação, essa envolveu um Anel de Gravesande, descrito pelo matemático holandês Willem Jacob 's Gravesande em 1747 sob o título “Of the Dilatation arising from Heat” [2]. Muito utilizado no ensino de dilatação térmica, o instrumento tem um anel e uma esfera metálica que passa por ele, mas que ao ser aquecida não deve ser capaz de atravessá-lo.

Continuando o tema de dilatação metálica tem-se o último experimento: o par bimetálico. São utilizadas duas lâminas de ligas metálicas com coeficientes de dilatação diferentes, esperando-se observar uma deformação quando aquecidas. A dilatação linear pode ser descrita por [3]:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

Sendo Δl a dilatação medida, α o coeficiente de dilatação linear, l_0 o comprimento original e ΔT a variação de temperatura. Além do conhecimento desse fenômeno ser importante para a criação de estruturas evitando-se que se deformem por variações térmicas, também pode ser aproveitado em sistemas como disjuntores.

2 Metodologia

2.1 Termoscópio de Galileu

O experimento foi realizado com um frasco de vidro conectado a um tubo capilar inserido em um recipiente contendo líquido corante. O frasco foi parcialmente submerso no líquido e após um dos participantes envolver o recipiente com a mão foi possível a observação do deslocamento da coluna líquida no tubo. A montagem está ilustrada na Figura 1.

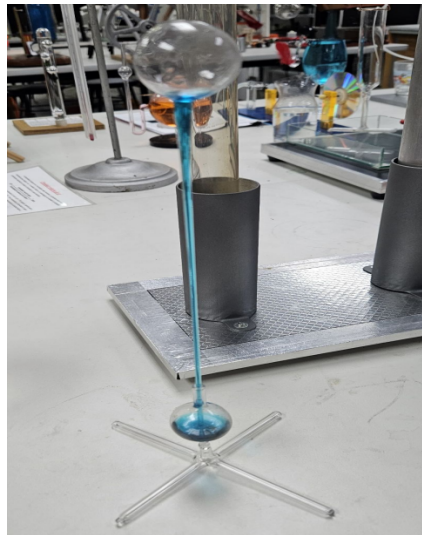


Figura 1. Montagem experimental do termoscópio de Galileu realizada em laboratório. A imagem mostra o frasco de vidro conectado a um tubo capilar parcialmente submerso em um recipiente com líquido corante. Fonte: fotografia tirada pelo monitor Pedro.

2.2 Termômetro de Galileu

O aparato experimental consistiu em um cilindro de vidro preenchido com líquido transparente, contendo cápsulas esféricas calibradas de densidade próxima. As cápsulas foram observadas em repouso, e sua posição vertical dentro do tubo foi registrada. A Figura 2 apresenta a montagem.

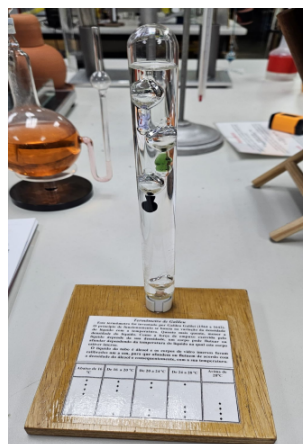


Figura 2. Termômetro de Galileu utilizado durante a aula. O dispositivo contém cápsulas esféricas calibradas, submersas em um líquido transparente dentro de um cilindro de vidro. Fonte: registro fotográfico feito pelo monitor Pedro.

2.3 Higrômetro (Psicrômetro)

Foram utilizados dois termômetros idênticos, sendo um mantido com o bulbo seco e o outro com o bulbo envolto em gaze úmida. Ambos foram posicionados lado a lado em suporte comum. Após exposição ao ar ambiente por tempo determinado, foram anotadas as temperaturas dos dois termômetros e os dados foram correlacionados por meio de uma tabela presente na estrutura entre os termômetros. A montagem pode ser visualizada na Figura 3.



Figura 3. Psicrômetro montado sobre suporte metálico, com os dois termômetros fixados lado a lado. O bulbo de um dos termômetros está envolvido por gaze umedecida. Fonte: fotografia registrada pelo monitor da disciplina, Pedro.

2.4 Anel de Gravesande

Foi utilizada uma esfera metálica acoplada a uma haste, e um anel metálico com diâmetro interno ligeiramente maior que o da esfera em temperatura ambiente. A esfera foi inicialmente posicionada sobre o anel. Em seguida, foi aquecida com uma fonte térmica até não mais atravessar o anel. Após resfriamento natural, o teste de passagem foi repetido. A montagem é mostrada na Figura 4.

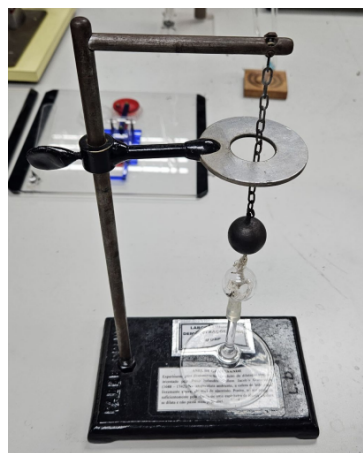


Figura 4. Montagem do experimento do Anel de Gravesande. A imagem mostra a esfera metálica acoplada a uma haste após passar pelo anel metálico e o dispositivo que foi utilizado como fonte de calor durante o experimento. Fonte: fotografia capturada pelo monitor Pedro.

2.5 Par Bimetálico

A montagem experimental consistiu em uma lâmina bimetálica fixa em uma extremidade e livre na outra. A lâmina foi aquecida com uma chama direta e observou-se a mudança da sua posição durante todo o processo. A Figura 5 apresenta o aparato utilizado.

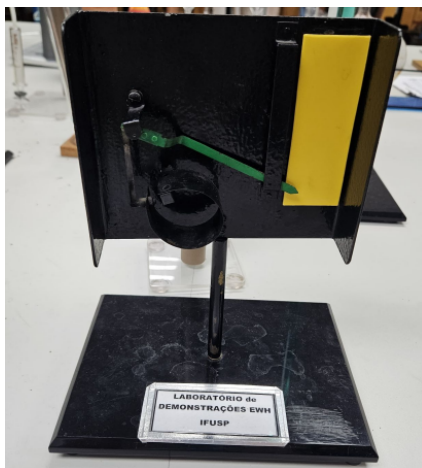


Figura 5. Lâmina bimetálica fixada em suporte metálico. A fonte de calor utilizada no experimento não consta na imagem. Fonte: imagem feita pelo monitor da disciplina, Pedro.

3 Resultados e discussões

3.1 Anel de Gravesande

Ao realizar o experimento do Anel de Gravesande, observou-se que, à temperatura ambiente, a esfera metálica passava justamente através do anel. Após o aquecimento da esfera utilizando um pequeno balão cheio de álcool e com um pavio, notou-se que a esfera não conseguia mais atravessar o anel. Ao deixar a esfera esfriar por alguns instantes, ela voltava a passar pelo anel.

O funcionamento do Anel de Gravesande é uma demonstração clássica do fenômeno da dilatação térmica volumétrica dos sólidos. Em que quando um material é aquecido, a energia térmica fornecida aumenta a energia inética média de seus átomos e moléculas. Isso faz com que eles vibrem com maior amplitude, resultado em um aumento médio nas distancias interatômicas e, consequentemente, na expansão do volume do material.

Tal dilatação volumétrica (ΔV) pode ser aproximada pela seguinte relação:

$$\Delta V = V_0 * \gamma * \Delta T$$

sendo, V_0 o volume inicial do objeto, γ é o coeficiente de dilatação volumétrica do material e ΔT é a variação de temperatura.

No caso do experimento realizado, a esfera era pequena, em uma ordem de, no máximo, uma dezena de centímetros, e o aquecimento da esfera, por ter sido realizado por pouco tempo e com uma pequena fonte de calor, a alteração de volume na esfera, foi de menos que um centímetro ao quadrado o que já foi o suficiente para impedir a passagem da esfera pelo anel.

Por fim, essa dinâmica física da dilatação térmica volumétrica, é **vastamente** utilizada em diversas áreas da sociedade atual. Alguns exemplos mais práticos, é a utilização dessa dinâmica para a área industrial, para melhor encaixe de peças, e para a de resistência de alguns materiais, outro exemplo bem palpável é a utilização de termômetros de mercúrio, em que seu funcionamento se baseia na dilatação

térmica do mercúrio em uma ampola graduada.

3.2 Par Bimetálico

No experimento do par bimetálico, foi observado que, ao aquecer a lâmina bimetálica torcida, observou-se que a lâmina se esticava rapidamente, fazendo com que fosse puxado o ponteiro que estava na extremidade livre, assim fazendo-o movimentar e encostar na outra fase. Ao deixar a lâmina bimetálica esfriar por alguns instantes, observou-se que ela voltou à torção original, com o ponteiro para baixo, na fase inicial.

O funcionamento físico desse experimento do par bimetálico baseia-se na diferença do coeficiente de dilatação linear de dois metais distintos, que compõem a lâmina. Dessa forma, quando a lâmina é aquecida, ambos os metais tentam se expandir. No entanto, o metal com maior coeficiente de dilatação (α_1) tenderá a se expandir mais do que o metal com menor coeficiente de dilatação (α_2) para a mesma variação de temperatura (ΔT).

Como os dois metais estão unidos, eles não podem se expandir livremente de forma independente. Para acomodar essa diferença de expansão, a lâmina se curva para o lado que compõe o metal que possui o menor coeficiente de dilatação linear. Dessa forma, como a lâmina estava enrolada, e ao aquecê-la, observou-se uma diminuição na torção, é possível dizer que a composição da lâmina bimetálica tinha o metal com maior coeficiente de dilatação para fora, mostrado com a cor azul na Figura 6

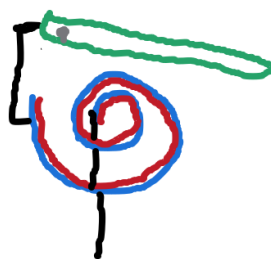


Figura 6. Lâmina bimetálica fixa composta por dois metais, representados pelas cores azul e vermelho, e ponteiro representado com verde. Fonte: Autoria própria.

A capacidade do par bimetálico de se curvar de forma previsível com as mudanças de temperatura o torna muito útil em diversas aplicações práticas. Seu uso mais conhecido é em termostatos, onde funciona para controlar a temperatura em sistemas de ar condicionado, aquecedores e refrigeradores. Além disso, essa deformação causada pelo calor é o princípio de funcionamento de termômetros analógicos e de disjuntores térmicos, que são essenciais para proteger circuitos elétricos contra o superaquecimento resultante de correntes excessivas.

3.3 Termoscópio

Ao segurar o bulbo inferior de termoscópio, foi possível observar o nível da água subir pelo tubo. Similarmemente, ao expor o termoscópio ao vento do ar condicionado da sala, foi possível observar o nível da água descer. Segurar o bulbo superior não causou modificação observável no termoscópio. A variação de temperatura observada é de aproximadamente 10°C , visto que a temperatura ambiente do dia era de aproximadamente 25°C e a temperatura da mão é de aproximadamente 36°C .

A experiência é explicada pela variação de temperatura. Como o bulbo é de um vidro extremamente fino, ao segurar, a temperatura da mão e a temperatura do ar e da água no bulbo começam a entrar em equilíbrio. A mão, estando mais quente, transfere energia cinética para as moléculas de gás no bulbo na forma de calor. As moléculas de gás com maior energia cinética aumentam a intensidade média da força aplicada sobre a superfície de água. Isto é, há aumento de pressão sobre a superfície da água. Portanto,

passa a existir uma diferença entre a pressão sobre a água fora do tubo e a pressão sobre a água dentro do tubo. Esta diferença de pressão resulta em uma força que gera o movimento da água para dentro do tubo.

O contrário acontece quando expomos o tubo ao vento frio do ar condicionado. A cada instante de tempo, o ar mais frio remove energia cinética das moléculas de gás dentro do bulbo. Desta forma, a intensidade média da força com que as moléculas de gás atingem a superfícies da água diminui. Isto gera diferença de pressão entre a água dentro do tubo e a água fora do tubo. Esta diferença de pressão tem como resultado a força que move a água para fora do tubo de volta para o bulbo.

É importante ressaltar que, enquanto a temperatura da água varia durante o experimento, um líquido não pode se expandir livremente. Ou seja, a “dilatação” do líquido não é suficiente para explicar o fenômeno, portanto o que é observado é de fato a variação da pressão do gás sobre o líquido resultante da variação da temperatura.

O termoscópio permite observar variações de temperatura em um alcance que depende das proporções dos bulbos e do tubo. Esta limitação faz com que seja dificultoso tomar medidas de grandes variações de temperatura sem ter um equipamento de tamanho desconfortável. Além disso, a sensibilidade de um equipamento maior seria menor em relação ao tempo. Isto é, para um equipamento das proporções utilizadas neste experimento foi possível contemplar a variação da temperatura de forma relativamente rápida, porém, quanto maior o equipamento, mais tempo levaria para que a transmissão de calor fosse suficiente para observar mudanças notáveis.

3.4 Termômetro de Galileu

Em teoria, os bonecos deveriam flutuar de acordo com a temperatura do líquido. No entanto, durante a experiência, todos os bonecos permaneceram no fundo do tubo. Cada boneco teve sua densidade calibrada para permanecer em um nível à depender da temperatura do líquido. A hipótese óbvia de que a temperatura era tal que os bonecos permaneceriam afundados é facilmente descartada por duas razões. A primeira é que a calibração nominal acusa que este cenário só deveria ocorrer para temperatura ambiente igual ou superior a 28 °C, o dia em questão estava frio e esta temperatura não parece razoável. A segunda razão é que ao resfriar o tubo expondo-o ao ar do ar condicionado os bonecos permaneceram no fundo do tubo. Desta forma, torna-se mais provável que tenham sido descalibrados. É possível que exista algum dano físico nos bonecos que tenha feito com que trocassem matéria com o líquido ou ainda que não tenham sido calibrados para as temperaturas nominais indicadas na Figura 7.

De toda forma, o princípio por trás deste experimento é a variação da densidade do líquido com a variação da temperatura. Ao aquecer, as moléculas que compõe o líquido têm maior energia cinética, aumentando, em média, a distância entre as moléculas do líquido. Desta forma, um objeto submerso no líquido está sujeito à força de empuxo deste, por sua vez, a força de empuxo varia com a densidade do líquido. Ao aumentar a temperatura a densidade do líquido diminui. Por consequência, aumento na temperatura resulta em diminuição da força de empuxo. Como os bonecos também estão sujeitos à força gravitacional, atuando sobre eles sem variação, na mesma direção e em sentido oposto ao da força de empuxo, ao diminuir a força de empuxo a força resultante se torna não nula e faz com que o boneco afunde um pouco mais. O contrário acontece ao resfriar o líquido.

O termômetro de Galileu é um precursor engenhoso dos termômetros de mercúrio. Uma vantagem interessante deste em relação ao anterior é que não depende do uso de metais pesados. Porém, a resolução do termômetro de galileu depende de ajustar densidades muito próximas entre os objetos de medida, os bonecos no nosso caso. Além disso, o alcance de temperaturas mensuráveis com um termômetro de Galileu é limitado a variações de temperatura na escala da temperatura ambiente (10 °C–36 °C), não pode medir temperaturas próximas à temperatura de ebulição ou fusão do líquido utilizado.

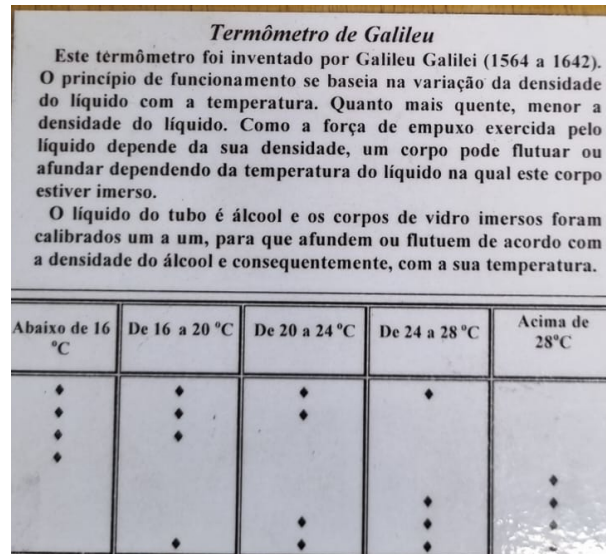


Figura 7. Temperaturas nominais e posições esperadas dos bonecos para cada uma

3.5 Psicrômetro

Foi constatado que o termômetro seco media 25 °C e o termômetro molhado media aproximadamente 22 °C. Ao consultar a tabela, temos que a diferença de temperatura é 3 °C, portanto, umidade de 76 % a 77 % na sala. Durante este dia, a temperatura indicada pela previsão do tempo registrada no dia era de 25 °C enquanto a umidade média no Butantã era de 66 %. A diferença entre a umidade medida e a umidade média da região é provavelmente decorrente da arborização. Enquanto o campus da USP é bem arborizado e próximo ao rio Pinheiros e à raia, é de se esperar que seja uma região com pico de umidade do ar.

O princípio por trás do psicrômetro é a termodinâmica. Em particular o equilíbrio de fases. Em todos os momentos, a água está sob pressão do vapor de água e sob agitação em decorrência da temperatura, portanto, o ponto de equilíbrio ocorre quando a pressão de vapor é tal que a quantidade de cada fase fique em equilíbrio dinâmico, o sistema tende à este ponto de equilíbrio. Pensando molecularmente, embora a temperatura seja uma medida da energia cinética média das moléculas de água a real distribuição da energia cinética é caótica e em determinados momentos há moléculas com mais energia cinética que as demais. Se a energia cinética de uma molécula é tal que supere a energia potencial que a atrai às outras moléculas de água, fazendo-a compor a fração líquida, então esta molécula pode se desprender e passar a compor a fração gasosa.

Se a pressão de vapor for menor do que a pressão de equilíbrio para aquela temperatura, será recorrente que as moléculas se desprendam e evaporem sem condensar novamente. Durante o processo de evaporação, a água toma calor do termômetro, fazendo o medir temperatura mais fria do que o termômetro exposto ao ar. Como justificado, a variação da temperatura deve depender da umidade relativa do ar. Similarmente, se a concentração de moléculas de água no ar for tal que a pressão de vapor exercida sobre a gaze seja igual a pressão de vapor de equilíbrio, então não haverá evaporação e a diferença de temperatura será nula, indicando umidade relativa do ar de 100 %. Ou seja, qualquer acréscimo de moléculas de água na fase gasosa resulta em condensação. Este é o mesmo fenômeno observado quando há formação de orvalho.

O psicrômetro de dois bulbos é prático por não depender de energia elétrica e ser fácil de carregar. Pode medir a umidade relativa de forma tão sensível quanto for a escala dos termômetros e da tabela. Visto que a pressão de vapor de equilíbrio pode ser determinada para cada temperatura. Como desvantagem, idealmente o psicrômetro é construído com água destilada para evitar variações no equilíbrio por composição química da água. Além disso, o alcance das medidas é limitado para temperaturas em que

a água se mantenha líquida, dificultando utilizá-lo para medir umidade do ar em dias com temperaturas abaixo de zero. Por fim, é preciso manter a gaze sempre em contato com uma fonte de água destilada.

4 Conclusão

O Termoscópio de Galileu demonstrou eficazmente a expansão de gases mediante aquecimento e a consequente variação de pressão, evidenciada pelo deslocamento da coluna de água. Este experimento ilustrou um método qualitativo primordial para a detecção de variações de temperatura.

No estudo do Termômetro de Galileu, observou-se que os bulbos permaneceram submersos, contrariando a expectativa de flutuação diferencial conforme a temperatura. Tal resultado sugere uma possível descalibração do instrumento ou danos aos componentes, impedindo a demonstração prática do princípio da variação da densidade do líquido com a temperatura e seu efeito no empuxo.

O psicrômetro possibilitou a determinação da umidade relativa do ar por meio da diferença de temperatura entre um termômetro seco e um úmido, resultado da evaporação da água no bulbo deste último. A medição obtida foi contextualizada com dados meteorológicos regionais, destacando a influência de fatores locais como a vegetação.

O experimento com o Anel de Gravesande evidenciou o fenômeno da dilatação térmica em sólidos: a esfera metálica, que atravessava o anel à temperatura ambiente, não o fez após ser aquecida, voltando a passar após o resfriamento. Esta prática demonstrou como o aumento da temperatura leva à expansão volumétrica dos materiais.

Finalmente, o par bimetalico ilustrou a dilatação linear diferencial entre dois metais distintos. Ao ser aquecida, a lâmina bimetalica curvou-se devido à diferença nos coeficientes de dilatação dos seus componentes, um princípio fundamental em dispositivos como termostatos e disjuntores.

Referências

- [1] Integrate modules and courses. <https://serc.carleton.edu/196548>, Jan 2018. Last accessed 31 May 2025.
- [2] Willem Jacob 's Gravesande, J. T. Desaguliers, and John Adams. *Mathematical elements of natural philosophy, confirm'd by experiments: Or, an introduction to sir Isaac Newton's philosophy*, volume 2, page 67. Printed for W. Innys, T. Longman and T. Shewell, C. Hitch ..., and M. Senex .., 1747.
- [3] H. Moysés Nussenzveig. *Curso De Física Básica Fluidos, Oscilações E Ondas, Calor (Volume 2)*, chapter 7, 9. Editora Edgard Blücher Ltda, 5 edition, 2014.