

# Determinação da Temperatura de Zero Absoluto



Tamborilo, Ana Ligia<sup>1</sup>; Dias, Flavia A.<sup>2</sup>  
Instituto de Física da Universidade de São Paulo

## Resumo

Este experimento teve por objetivo determinar a temperatura de zero absoluto através de métodos experimentais simples, extrapolando a reta ajustada para o gráfico obtido a partir de medidas de pressão por temperatura de um gás a volume constante. Para tanto, foi feito uso de um termômetro a gás a volume constante.

## 1. Introdução Teórica

Gases são fluidos homogêneos rarefeitos. Um gás real pode ser idealizado no limite de rarefação extrema. Isso implicaria a nula interação entre as moléculas, exceto por colisões aleatórias. Na prática, na maioria dos casos, há uma excelente aproximação de gás ideal, quanto mais distante a temperatura do gás em relação ao seu ponto de liquefação e quanto menor a pressão.

Os gases são caracterizados pelas seguintes características: volume, massa (número de moléculas), pressão e temperatura. Podemos relacioná-las pela Equação de Estado de Clausius-Clayperon:

$$PV = nRT \quad (1)$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases ( $0,082 \text{ L.atm.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). Essa é a equação física que tem maior faixa de validade em relação à temperatura, e também é conhecida como Equação de Estado do Gás Ideal.

A Teoria Cinética dos Gases estabelece uma relação direta entre propriedades macroscópicas com o comportamento microscópico médio das moléculas do gás. Algumas hipóteses sobre esse comportamento são admitidas: todas as moléculas estão em movimento rápido e aleatório em todas as direções; entre colisões as moléculas se movem em linha reta; as colisões que podem ocorrer entre as moléculas e com o recipiente são perfeitamente elásticas; não há forças intermoleculares apreciáveis; o diâmetro das moléculas é inteiramente desprezível em comparação com as distâncias médias que elas viajam entre as colisões; o tempo gasto durante as colisões é muito menor do que o tempo entre as diferentes colisões.

A temperatura do Zero Absoluto corresponde àquela temperatura na qual a energia cinética média das moléculas de gás é nula. Pelo Princípio da Incerteza da Mecânica Quântica, é impossível determinar com precisão absoluta a velocidade e posição de uma partícula simultaneamente. Se o zero absoluto fosse atingido, o princípio da incerteza estaria sendo violado, pois se estaria determinando a posição ( $0m$ ) e a velocidade ( $0m/s$ ) simultaneamente.

## 2. Descrição Experimental

O termômetro a gás a volume constante consiste em um bulbo de vidro contendo gás, que é ligado a um barômetro do tipo Torricelli através de um capilar. Um esquema é apresentado na Figura 1.

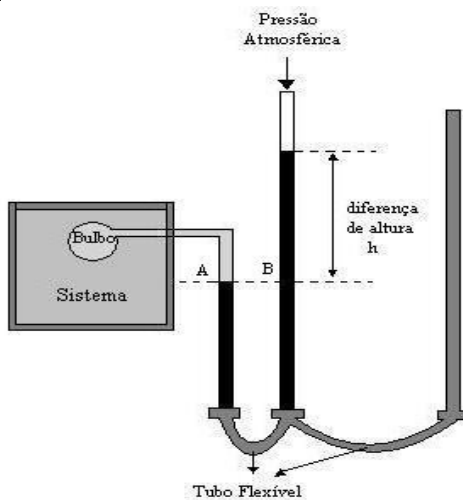


Figura 1: Esquema de um termômetro a gás a volume constante. O tubo flexível é utilizado para acertar o nível do tubo em A igual em todas as medidas, para que o volume do gás se mantenha constante. Deve-se anotar a diferença de altura  $h$ , e não esquecer de considerar a pressão atmosférica nos cálculos.

O gás utilizado no termômetro a gás a volume constante foi ar rarefeito. A pressão do gás foi medida para 44 temperaturas, que variaram de  $0,1$  a  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para aquecer o gás, o bulbo foi imerso em um recipiente de isopor com água. O isopor foi adaptado e isolado de maneira a perder pouco calor para o ambiente. Mediu-se a temperatura da água com um termômetro digital, e as alturas correspondentes no termômetro a gás a volume constante. A água foi colocada em temperatura de equilíbrio com o gelo, e aquecida com uma resistência até a temperatura de  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ . O intervalo de medições foi de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Os dados foram analisados, assim como suas respectivas incertezas estatísticas e instrumentais, em tabelas e gráficos ajustados por MMQ. Para obtenção de uma incerteza mais coerente do termômetro digital, foram colocados todas as unidades do laboratório didático em equilíbrio com o mesmo ponto, e calculado o desvio padrão das medidas.

Através dos dados obtidos, do gráfico de pressão por temperatura a volume constante, e dos coeficientes linear e angular da reta ajustada por MMQ, obteve-se a equação que relaciona  $P$  e  $T$ , para efetuar a extrapolação para pressão nula.



Figura 2: Fotografia do arranjo experimental exato utilizado no experimento. O termômetro a gás a volume constante, que se apóia numa base de madeira; o termômetro digital; o isopor adaptado com o mexedor e a resistência, para dissipar pouca energia; a fonte, na qual se liga a resistência.

Assim, a temperatura de zero absoluto ( $T_z$ ) e sua incerteza ( $ST_z$ ) são dadas pelas expressões:

$$T_z = \frac{-b}{a} \quad (2)$$

$$ST_z = \sqrt{\left(\frac{-1}{a} \cdot Sb\right)^2 + \left(\frac{b}{a^2} \cdot Sa\right)^2} \quad (3)$$

## 3. Resultados

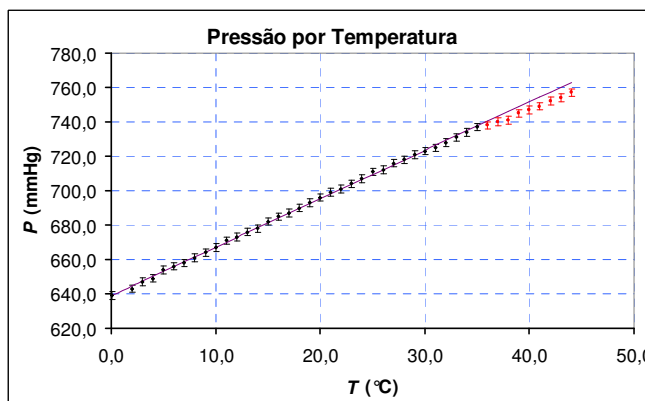
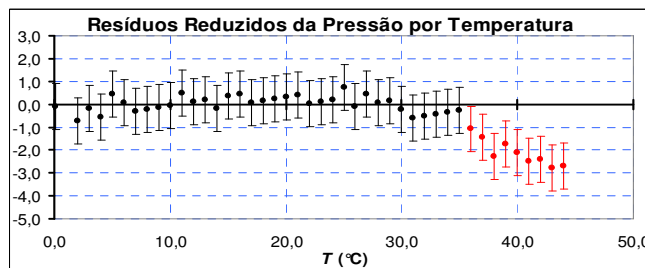


Figura 3: Pressão por Temperatura de um gás (ar) rarefeito, de um termômetro a gás a volume constante. A pressão foi medida em mmHg e a temperatura, em  $^\circ\text{C}$ .

Figura 4: Resíduos reduzidos do ajuste da Pressão (mmHg) por Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) de um gás (ar) rarefeito a volume constante.



A equação do comportamento do gás a um volume constante, retirada da reta ajustada de pressão por temperatura, é a seguinte:

$$P = 2,82(4).T + 639,0(8) \quad (4)$$

Considerando o ar rarefeito dentro do modelo de gás ideal, pode-se extrapolar a reta para o ponto em que a pressão é nula, ou seja, para onde a temperatura será, conforme teoria, o zero absoluto ( $T_z$ ):

$$T_z = \frac{-639,0}{2,82} = -226,8(3,0)^\circ\text{C}$$

A compatibilidade entre a temperatura encontrada ( $T_z$ ) e a fonte teórica ( $-273,15^\circ\text{C}$ ), dada pela equação 6 da introdução, é de:

$$Z = 15,61$$

ou seja, a temperatura encontrada pelo experimento é incompatível com a fonte teórica. Essa incompatibilidade é devida a alguns erros experimentais e, principalmente, problemas com os instrumentos utilizados.

O  $\chi^2$  encontrado é pequeno (4), visto que o número de graus de liberdade do ajuste foi de 33. Isso indica que a incerteza utilizada seria superestimada. A incerteza que faz com que o  $\chi^2$  fique pequeno é aquela ligada à temperatura. No entanto, essa incerteza não pode ser diminuída, porque a qualidade dos dados obtidos com o termômetro digital é pequena, e essa incerteza também já foi reavaliada, com o cálculo do desvio padrão da medida de uma mesma temperatura por vários termômetros digitais diferentes.

Os 9 últimos pontos experimentais foram retirados do ajuste, porque apresentavam uma tendência clara à ficarem abaixo da reta, conforme observado nos resíduos: enquanto que probabilisticamente mais de 99% dos dados devem estar a, no máximo, 3 incertezas de distância do eixo, os dados excluídos chegam a ficar a 5,9 incertezas do eixo. Os pontos correspondem a aqueles cujas temperaturas são altas. Possivelmente, a dissipação de energia pode ter influenciado na temperatura de equilíbrio entre o gás e a água, o que provocou a tendência fora da reta.

O termômetro a gás a volume constante utilizado apresenta algumas peculiaridades que influíram nos resultados obtidos e, principalmente, na incompatibilidade do valor calculado de  $T_z$  com o valor de referência:

- O gás utilizado foi o ar, que é uma mistura de gases, principalmente nitrogênio, oxigênio, e também outros em menos de 1%, como o hélio, e outros gases nobres. Como há uma mistura, e os dois gases predominantes são moléculas duplas ( $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$ ), é possível que o modelo de gás ideal tenha alguma distorção significativa nos resultados.

- A menor temperatura medida no experimento foi de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Seria interessante poder utilizar um aparato que resistisse a temperaturas mais baixas, como o nitrogênio líquido ( $-196^\circ\text{C}$ ), para que a reta pudesse ser ajustada também com um valor mais próximo de  $-273,15$ .

- O termômetro a gás a volume constante utilizado apresenta um detalhe em seu arranjo que prejudicou a obtenção dos dados: o bulbo de vidro contendo o gás é ligado até o tubo de vidro que contém o mercúrio através de uma pequena borracha, que veda a saída de ar para o meio. No entanto, essa borracha, ao ser aquecida e resfriada junto ao bulbo de vidro, sofre alterações que influenciam na pressão medida do gás. O técnico responsável pelo aparelho realizou alguns testes que comprovam essa influência nos resultados do experimento. Primeiramente, repetiu alguns pontos do experimento descrito aqui com a borracha disposta da maneira com que as medidas foram tomadas e tomou nota; em seguida, repetiu o experimento, mas colocando a borracha de maneira que os tubos de vidro se encostam, e não há espaço para a dilatação do volume na mangueira. Os resultados obtidos assim foram de pressões significativamente maiores, o que comprova que a incompatibilidade dos dados obtidos com o valor de referência para a temperatura de zero absoluto teve como motivo principal a ligação que a mangueira faz entre os capilares de vidro, conforme a foto abaixo:



Figura 5: Fotografia da ligação entre o bulbo de vidro e o capilar com o mercúrio, feita com uma mangueira plástica deformável. A deformação da mangueira causou diferenças nos resultados esperados para a pressão do gás a volume constante.

## 4. Conclusão

Conclui-se que o experimento teve resultados problemáticos devido ao equipamento utilizado. Os principais motivos são erros sistemáticos que provêm de falhas no equipamento utilizado. A precisão do termômetro utilizado não é satisfatória, gerando má qualidade dos dados, como mostrou o teste posterior, feito para avaliar a precisão dos termômetros utilizados pelo laboratório didático. O desvio padrão encontrado para os termômetros é igual a  $0,8^\circ\text{C}$ .

O responsável pela incompatibilidade do resultado é a mangueira que liga o bulbo de vidro contendo gás, ao capilar contendo mercúrio. A mesma é de borracha e funciona como uma emenda de aproximadamente  $1,5 \text{ cm}$ . Sólidos tendem a variar de volume com a variação de temperatura, e proporcionalmente ao coeficiente de dilatação, que no caso da borracha é relativamente alto. Assim, com o aquecimento, houve aumento do volume e, por consequência, interferência na pressão. Além disso, essa emenda permaneceu, durante todo o experimento, dentro do recipiente de isopor, que estava isolado, contribuindo para que a borracha ficasse ainda mais suscetível a variações de temperatura.

Portanto, os dados têm má qualidade devido à falhas de adaptação dos instrumentos de medida, o que não exclui sua validade para o fim da determinação experimental da temperatura de zero absoluto, porém, tomando maiores cuidados na realização do experimento.