

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO LABORATORIAL PARA TERMODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Camila Siquinelli Garcia¹

Carlos Eduardo Farias²

RESUMO

Uma das matérias mais complexas estudadas na engenharia é a física, pois é a partir do estudo e compreensão dela que se entende como o mundo funciona. Outrossim, a termodinâmica é o ramo da física que explica a dinâmica do calor, trocas de energia, trabalho, dentre outras situações que podem ser vistas no cotidiano, por exemplo, ao cozinhar. Ademais, muito se discute a importância das aulas práticas em conjunto com o material teórico, a convergência do comum com a observação traz ao aluno mais clareza e simplicidade, auxiliando de forma notável o aprendizado. Nesse viés, a FAE Centro Universitário, disponibilizou um laboratório para a disciplina, entretanto não se fez possível utilizá-lo devido à necessidade de elaboração de experimentos práticos que exprimam as relações termodinâmicas e de transferência de calor. Seguindo essa lógica, desenvolveu-se este projeto, com objetivo principal de facilitar o domínio da disciplina através da adição de experimentos práticos aos estudos teóricos. Mais especificamente, estudando o comportamento da água em um experimento que evidencia a relação entre potência e calor. Por conseguinte, ao analisar-se a fórmula de potência, é possível afirmar que quanto maior a potência mais rápido a água deveria ser aquecida, entretanto ao realizar este experimento ficou claro que o tipo de contato entre a fonte e a substância é um fator de grande impacto para essa afirmação, uma vez que, a partir dos dados recolhidos a resistência elétrica, com 500 Watts a menos de potência que o fogão elétrico, esquentou a água de forma mais rápida.

Palavras-chave: Aquecimento. Resfriamento. Experimento. Calor. Potência

¹ Aluna do 3º período do curso de Engenharia Mecânica da FAE Centro Universitário. Voluntária do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2021-2022). *E-mail*: camila.siquinelli@mail.fae.edu

² Orientador da Pesquisa. Doutor em Engenharia Mecânica e de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFPR). Professor da FAE Centro Universitário. *E-mail*: carlos.farias@fae.edu

INTRODUÇÃO

Conforme os livros dos autores Kross e Potter (2016) e Moran (2014) a termodinâmica pode ser descrita como a dinâmica do calor. É uma ciência experimental que busca compreender como a energia cria movimento, em propriedades de macroscópica a grande escala. Começou a ser avaliada quando se notou a capacidade de objetos aquecidos de produzir trabalho.

A partir desse viés, essa ciência tem sido estudada atualmente em diversos campos, como na engenharia. É aplicada em motores automobilísticos, turbinas, bombas e compressores, usinas nucleares, combustíveis fósseis, biomassa, combustíveis renováveis e em sistemas de propulsão e combustão. Mostrando-se de extrema relevância para a sociedade.

Em âmbito universitário, é considerada uma das matérias mais complexas estudadas na engenharia, assim, explorou-se a necessidade de adicionar aulas práticas ao material teórico. Visto que, a prática auxilia no melhor entendimento da teoria, na compreensão do funcionamento e inspira interesse nos alunos, de forma a tornar as aulas mais claras e produtivas. Por esse motivo, a FAE-Centro universitário, campus Curitiba, disponibilizou um espaço para tornar-se o laboratório de termodinâmica, todavia, o mesmo, ainda não foi utilizado pela falta de equipamentos e experimentos preparados.

Assim, este projeto tem por objetivo principal a criação de experimentos que consigam demonstrar a teoria de forma elucidativa. Outrossim, mais especificamente, a relação entre a potência de uma fonte e a transferência de calor à substância. A partir dos dados obtidos pelo experimento, gerou-se gráficos das curvas de aquecimento e resfriamento da água, evidenciando o comportamento da substância ao receber calor, derivado de duas fontes diferentes.

Pode-se afirmar que quanto maior a potência mais rápida deve acontecer a variação de temperatura, entretanto, ao analisar os dados observou-se que alguns fatores têm impacto significativo nessa relação, como o tipo de contato entre a fonte e o sistema.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 CONCEITOS DE TERMODINÂMICA

De acordo com o livro de autoria do Halliday (2016b), a pressão em um fluido é a grandeza física que relaciona uma força à área onde ela se distribui. Compara-se

ao momento em que uma pessoa entra em uma banheira, ao colocar os pés, todo o volume de água é afetado pela pressão exercida em um ponto específico. Já em um sólido, como, por exemplo, uma massa de pão, quando se pressiona um devido pedaço ele impacta apenas aquele espaço. Pode-se expressar a pressão através da Equação 1.

$$P = F \div A \quad \text{Equação 1}$$

Onde, P é a pressão em Pascal, F expressa a força em Newton e A, a área em metros quadrados. Ademais, a pressão atmosférica, por sua vez, é a força exercida pelo ar na superfície terrestre, devido a isso, se altera em conformidade com a altitude, umidade e temperatura do lugar em que o experimento é executado.

Considerando que o experimento foi realizado em Curitiba-Paraná, através da utilização do *site* Geração Labens (2022), a pressão atmosférica pôde ser estimada como 0,9 atm.

Outros conceitos importantes são os pontos de fusão e ebulição da água, que, segundo os autores Kross e Potter (2016), são respectivamente a temperatura em que a substância muda do estado sólido para líquido e do estado líquido para o gasoso. Para este projeto, a temperatura de ebulição da água se fez valiosa, uma vez que para a grande maioria dos cálculos é necessário conhecer a temperatura de transição da fase líquida da água para a fase gasosa.

Normalmente é calculada a temperatura de ebulição da água em 100°C, todavia, ao ponderar a diferença de altitude em relação ao nível do mar foi adotado o valor de aproximadamente 96,71°C, baseando-se na tabela de autoria do Caetano (2012).

A potência é a grandeza física escalar que, em sintonia com o pensamento de Halliday et al. (2016a), expressa a quantidade de energia cedida por uma fonte a cada unidade de tempo, podendo também ser descrita como a taxa de trabalho realizado a cada unidade de tempo. Pode ser calculada de algumas maneiras, dentre elas pela Equação 2.

$$P = Q \div \Delta t \quad \text{Equação 2}$$

Sendo, P a potência em Watts, Δt o intervalo de tempo em segundos em que foi executado e Q a quantidade de calor recebida ou cedida em J/K.

1.2 CALOR ESPECÍFICO

Seguindo a linha de raciocínio dos autores Kross e Potter (2016), a calorimetria é um método experimental que determina o valor calorífico de algo e estuda a transferência de calor entre dois corpos. Em possível analogia pode-se citar a ação

de colocar um cubo de gelo em bebida de temperatura ambiente, o calor da bebida é transferido para o gelo fazendo com que ele derreta e a bebida diminua sua temperatura. Explica-se que há dois tipos de calor existentes, o calor latente e o calor sensível. O primeiro é a energia necessária para uma unidade de massa mudar seu estado físico, o segundo é a quantidade de calor que um corpo pode receber sem alterar seu estado físico.

Outro dado que se faz importante é o calor específico, que em consoante ao livro do autor Halliday (2016b), pode-se definir como a variação térmica de determinada substância a partir do momento em que ela recebe determinada quantidade de calor. Cada substância tem seu próprio calor específico, o da água é considerado 4186,8 J/kg.K. O que significa que são necessários 4186,8 Joules para que haja variação de 1 Kelvin em 1 quilograma de água.

Por ser uma função da temperatura, o calor específico não é constante, entretanto, para esse trabalho ele pode ser considerado constante uma vez que a variação de temperatura é pequena.

Uma das fórmulas mais usadas na calorimetria é a Equação 3, da quantidade de calor:

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad \text{Equação 3}$$

Na qual, o Q expressa a quantidade de calor recebida ou cedida em Joules por Kelvin, m a massa em quilogramas, c o calor específico em J/kg.K e ΔT a variação de temperatura em Kelvin.

1.3 PRESSÃO DE VAPOR

A partir do conhecimento exposto no livro do autor Moran (2014), a pressão de vapor indica a tendência de uma substância a passar pela mudança de estado físico para o estado gasoso em função da temperatura, é a medida da volatilidade da substância em determinada temperatura. Quanto maior a pressão de vapor, em uma mesma temperatura, mais volátil será a substância. A título de exemplo, menciona-se a pressão de vapor de uma gasolina, substância muito presente no cotidiano, que é uma característica de extrema relevância posto que é um parâmetro de especificação que define a quantidade que será perdida no armazenamento, manuseio e transporte do combustível.

Não é uma propriedade que pode ser controlada, apenas explica a relação entre a temperatura de ebulição e a pressão externa. Pode ser descrita pela equação de Antoine, Equação 4:

$$\text{Log } P = A - [B \div (C+T)] \quad \text{Equação 4}$$

Onde $\log P$ é o logaritmo da pressão em Pascal, A, B e C são constantes da substância que variam de acordo com a temperatura, e T é a temperatura em Kelvin.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAL E ESTRUTURA UTILIZADA

O material utilizado para executar-se os experimentos foi a água de torneira, que, devido ao tipo de experimento realizado, pode-se considerar suas propriedades aproximadas as da água pura devido à baixa concentração de eletrólitos.

Os equipamentos utilizados foram:

- 1 (uma) panela de pressão de alumínio de 4,5 litros;
- 1 (um) fogão elétrico de 1500 Watts de potência;
- 1 (uma) resistência elétrica do tipo rabo quente de 1000 Watts de potência;
- 2 (dois) termômetros culinários com medidas em graus Celsius;
- 1 (um) cronômetro;
- 1 (uma) garrafa pet de 2,0 litros;
- 1 (um) béquer de 500 mililitros.

2.2 METODOLOGIA E ANÁLISE

Inicialmente realizou-se a análise teórica do comportamento do sistema usando as equações estudadas para determinar o tempo teórico do aquecimento de 2 litros de água líquida, com hipótese de temperatura inicial a 20°C até o ponto de ebulição estimado em $96,71^{\circ}\text{C}$. Ademais, considerou-se que toda a potência derivada do fogão elétrico e da resistência elétrica seriam destinadas ao aquecimento do sistema, sem perda de calor para o ambiente.

TABELA 1 – Dados referentes ao sistema teorizado

Dados	Água (H ₂ O)	
Massa (m):	998 g	
Calor Específico (c):	1 cal/g.°C	
Variação de Temperatura (ΔT):	96,93 °C	
Potência Elétrica (P):	Fogão Elétrico	Resistência Elétrica
	1500 W	1000 W

FONTE: Os autores (2022)

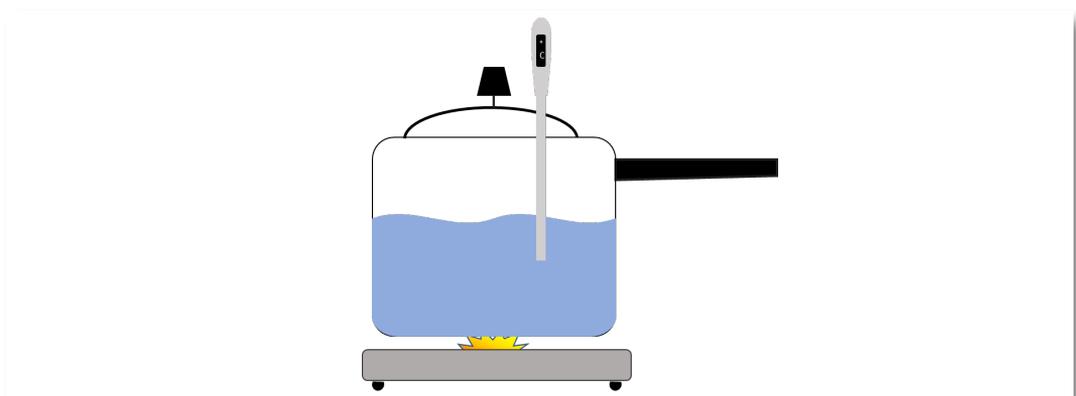
Por conseguinte, foram desenvolvidas duas versões de um experimento. Cada versão sendo executada 4 vezes para que seja possível comparar e comprovar os dados obtidos.

Para a primeira versão do experimento furou-se a tampa da panela de pressão, introduziu-se um termômetro culinário e para imobilizá-lo usou-se durepoxi. Utilizando a garrafa pet e o bécquer mediu-se 2 litros de água que foram colocados na panela, marcando-se a garrafa pet para que durante as repetições do experimento seja possível utilizar a mesma medida.

Em seguida, o fogão elétrico foi colocado em cima de um balcão e a panela de pressão, com a tampa semiaberta, foi colocada sobre o fogão. Ligou-se então o termômetro, marcando a temperatura inicial da água. Em sequência, ligou-se o fogão elétrico na tomada em potência máxima ao mesmo tempo em que se iniciou o cronômetro. A partir disso, anotou-se a cada 1 minuto a temperatura marcada até que o sistema atingisse aproximadamente $96,71^{\circ}\text{C}$.

Após sustentar a temperatura de ebulição por aproximadamente 3 minutos, desligou-se o fogão elétrico, e continuou-se a medir a temperatura até que o termômetro marcasse por volta de 40°C , sem retirar a panela de cima do fogão. Finalizou-se medindo com o bécquer e a garrafa pet a quantidade de massa de água restante no sistema. Como representado na Figura 1:

FIGURA 1 – Desenho esquemático representativo da primeira versão do experimento, com o fogão elétrico.

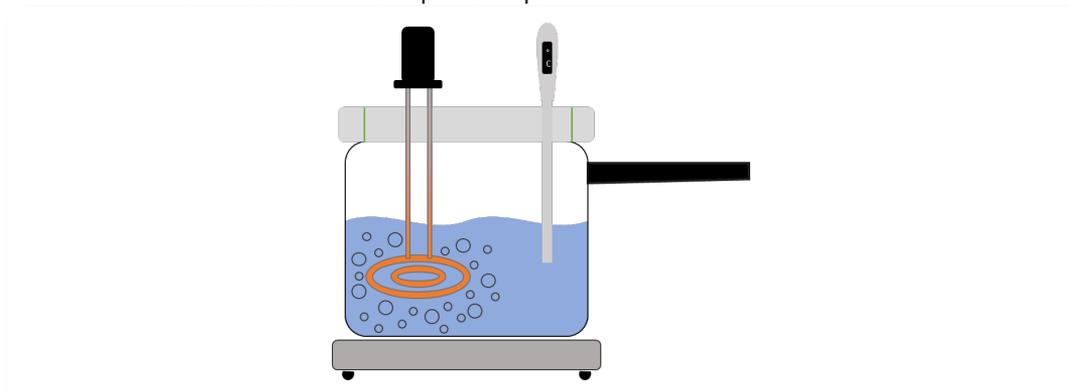


FONTE: Os autores (2022)

Para a segunda versão do experimento foi colocado o mesmo volume de água na panela. Contudo, posicionou-se a panela com água e sem tampa em cima do fogão elétrico desligado, de forma a isolar o sistema da bancada. Em seguida o rabo quente foi posicionado dentro da panela ainda desligado, recorreu-se a um pedaço retangular de isopor para fixação do termômetro, que por sua vez foi colocado na panela de forma a não encostar na resistência elétrica e estar sempre na mesma distância da fonte.

Ligou-se então o termômetro, marcando a temperatura inicial da água. Em sequência ligou-se o rabo quente ao mesmo tempo em que se acionou o cronômetro, anotando, assim, a temperatura a cada 30 segundos até que o sistema atinja aproximadamente 96,71°C. Após isso, desligou-se o rabo quente sem tirá-lo da panela e continuou-se a marcação da temperatura até o sistema atingir por volta de 40°C. Finalizou-se medindo com o béquer e a garrafa pet a quantidade de massa de água restante no sistema. Como representado na Figura 2:

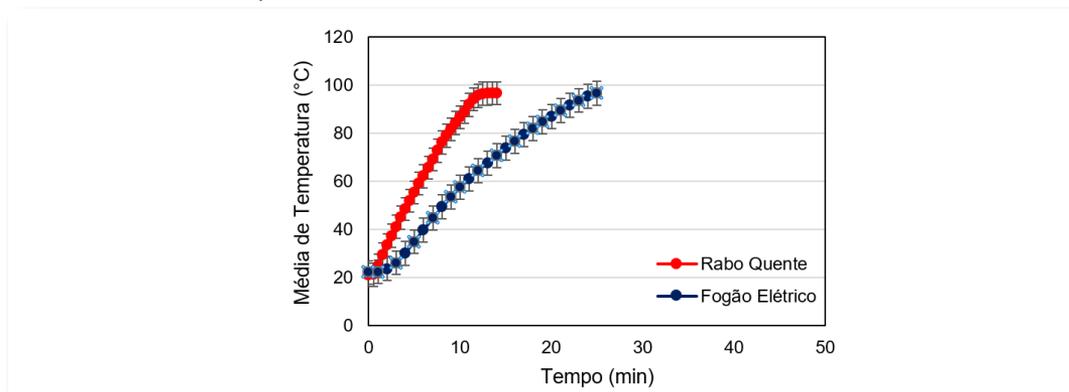
FIGURA 2 – Desenho esquemático representativo da segunda versão do experimento, com a resistência elétrica do tipo rabo quente



FONTE: Os autores (2022)

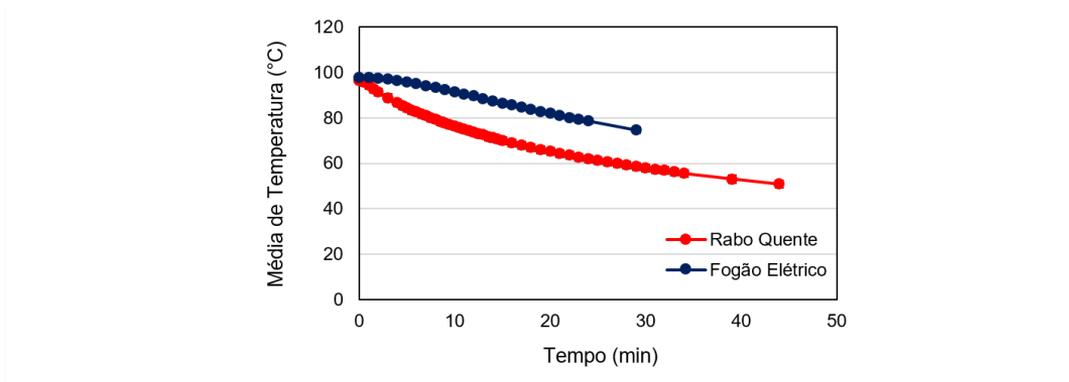
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise dos dados obtidos devido aos experimentos foram gerados dois gráficos das médias de temperatura que examinam se o comportamento dos sistemas foi parecido e pode ser considerado um padrão ou se houve algum erro durante a realização do experimento. Os gráficos citados estão representados nas Figuras 3 e 4. FIGURA 3 – Gráfico da curva de aquecimento com barras de erro com tamanho de 2 desvios padrões



FONTE: Os autores (2022)

FIGURA 4 – Gráfico da curva de resfriamento com barras de erro com tamanho de dois desvios padrões



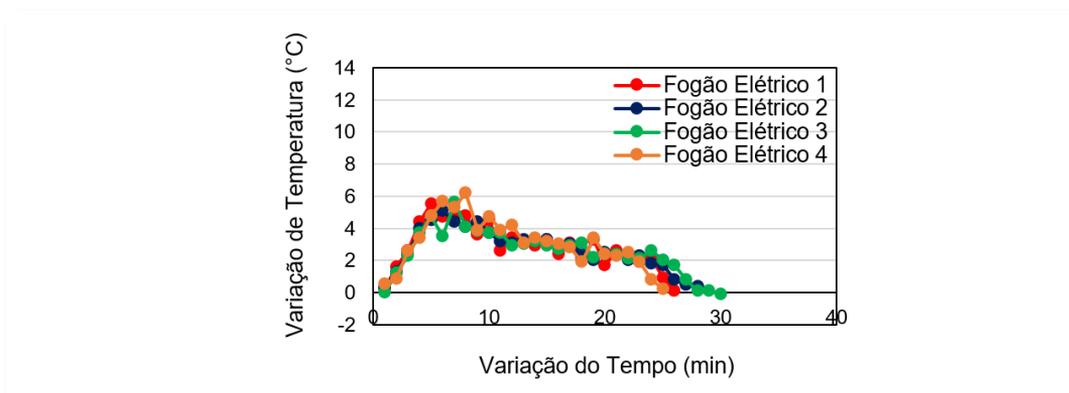
FONTE: Os autores (2022)

Os gráficos foram formulados baseando-se no cálculo das médias das temperaturas anotadas em cada medida de tempo. Somado a isso, as barras de erro foram estimadas através de dois desvios padrões referentes a cada média de temperatura em determinado tempo.

Ao observar-se o tamanho das barras de erro e os marcadores foi possível concluir que o comportamento observado nas quatro repetições do experimento, de ambas as versões, tem desempenhos parecidos, assim, criando-se um padrão de reação para o comportamento da água aquecida e resfriada através do rabo quente e outro através do fogão elétrico.

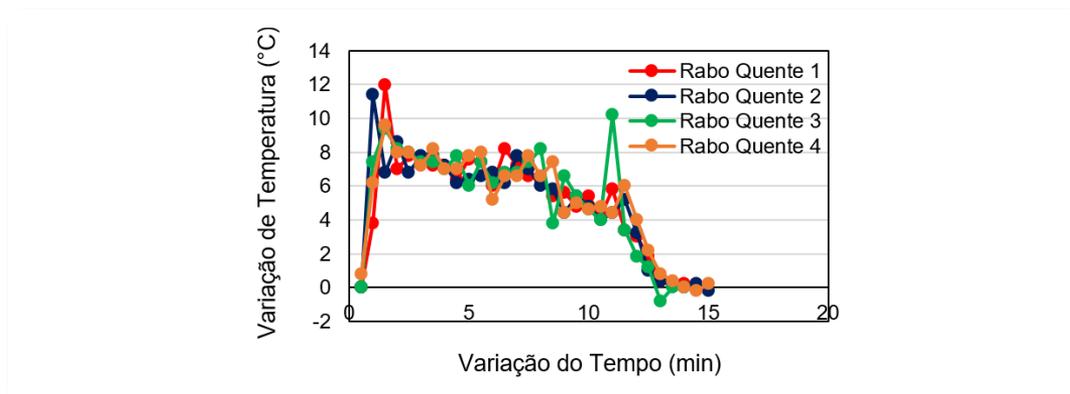
Após essa comprovação, é possível dar continuidade a análise de dados derivados dos experimentos. Os gráficos referentes a variação de temperatura pela variação de tempo, descritos pelas Figuras 5, 6, 7 e 8, se fizeram de grande relevância também para explicar a desconformidade perante o estudo da fórmula de potência.

FIGURA 5 – Gráfico da curva de aquecimento da variação de temperatura através do fogão elétrico



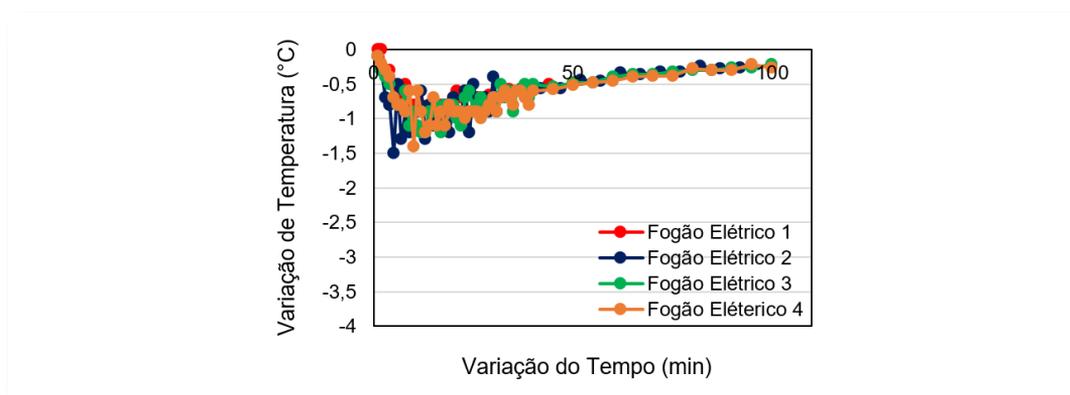
FONTE: Os autores (2022)

FIGURA 6 – Gráfico da curva de aquecimento da variação de temperatura através da resistência elétrica



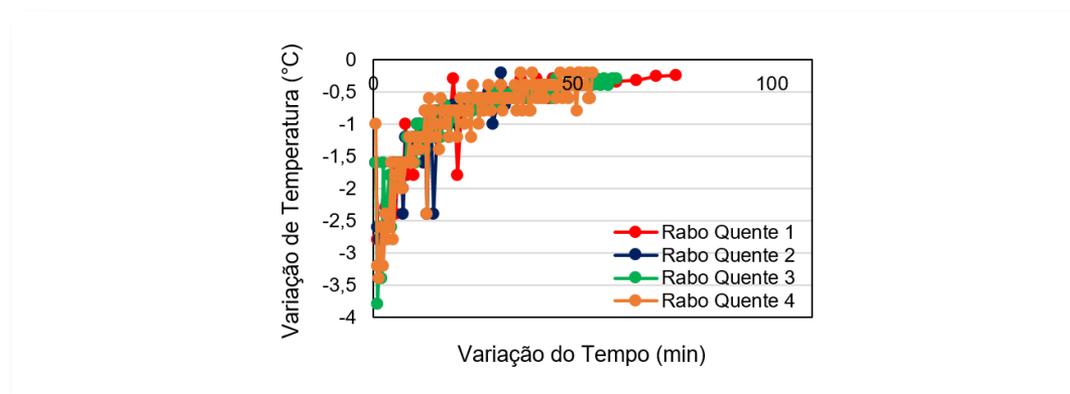
FONTE: Os autores (2022)

FIGURA 7 – Gráfico da curva de resfriamento da variação de temperatura através do fogão elétrico



FONTE: Os autores (2022)

FIGURA 8 – Gráfico da curva de resfriamento da variação de temperatura através da resistência elétrica



FONTE: Os autores (2022)

Ao observar-se os gráficos notou-se que, apesar da diferença de escala das curvas de aquecimento, o rabo quente gera maior variação de temperatura em relação ao fogão elétrico, que, por sua vez demora mais para aquecer e resfriar a água.

Ao se estudar a Equação 5, que é a união das equações de potência (Equação 2) e da quantidade de calor (Equação 3), torna-se possível afirmar que quanto maior a potência maior deve ser a variação de temperatura, entretanto, os experimentos mostram o contrário, considerando que a fonte de maior variação de temperatura é a resistência elétrica de 1000 Watts de potência, enquanto o fogão elétrico, com 1500 Watts, tem menor variação térmica.

$$\uparrow P = (m \times c \times \Delta T) \uparrow \div \Delta t \downarrow \quad \text{Equação 5}$$

Tal fato pode ser explicado por alguns fatores, dentre eles o de maior relevância é o tipo de contato apresentado entre as fontes de calor e a água. O fogão elétrico tem contato indireto, uma vez que, se faz necessário esquentar primeiro a chapa do fogão que, por sua vez, esquenta a panela que, por fim, aquece a água. Necessitando, assim, de um tempo maior para aumentar a velocidade da variação de temperatura para o aquecimento, demorando mais tempo para atingir seu objetivo. Na curva de resfriamento, ao desligar o fogão elétrico sua chapa continua quente uma vez que há muita energia interna armazenada, tornando-se, assim, mais um objeto afim de ceder calor. No entanto, o rabo quente tem contato direto com a água, logo, obtendo maior velocidade de variação da temperatura em um menor intervalo de tempo.

Ademais, essas disparidades também podem ser explicadas não somente pelo fato de a água não ser destilada. Mas, também, pelo fato de a panela ser de alumínio, que apesar de ser considerado um bom condutor de calor, ainda não é o material mais eficiente. Somado a isso, a panela é revestida de material antiaderente, impactando na condutividade térmica. Logo, diminuindo a velocidade das curvas reais de aquecimento e resfriamento.

A partir do uso da TAB. 1 e da Equação 5, descobrem-se dois resultados importantes.

O primeiro resultado expõe que deveriam ser necessários aproximadamente 7,12 minutos ou 427,38 segundos para que a água atinja seu ponto de ebulição quando aquecida através do fogão elétrico. Entretanto, ao realizar-se o experimento na prática observou-se que, para o fogão elétrico, a água só atinge sua temperatura de ebulição de 25 a 30 minutos depois de iniciado o processo de aquecimento.

O segundo resultado explica que em teoria seriam necessários 2,55 minutos ou 153,11 segundos para que a água atinja seu ponto de ebulição quando aquecida pela resistência elétrica. Porém, ao realizar o experimento foi possível notar que, para valores reais, são necessários aproximadamente 14,5 minutos para atingir a temperatura de ebulição.

Esses resultados podem ser explicados, principalmente, devido a hipótese feita na teorização ao se considerar que o calor advindo da fonte de potência se direciona inteiramente ao sistema, o que não acontece, já que os sistemas são considerados

abertos, podendo não somente perder calor, mas, também, massa para o ambiente. Assim, elucidando-se a diferença observada no tempo necessário para que a água atinja seu ponto de ebulição através das duas fontes de calor.

Ademais, essas disparidades também podem ser explicadas não somente pelo fato de a água não ser destilada. Mas, também, pelo fato de a panela ser de alumínio, que apesar de ser considerado um bom condutor de calor, ainda não é o material mais eficiente. Somado a isso, a panela é revestida de material antiaderente, impactando na condutividade térmica. Logo, diminuindo a velocidade das curvas reais de aquecimento e resfriamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a Equação 5, a maior variação de temperatura em um menor intervalo de tempo deveria ser maior na fonte que exibisse a fonte de calor de maior potência, porém, esse comportamento foi observado nos experimentos e gráficos relacionados a resistência elétrica, que tem 500 Watts a menos de potência.

Essa contrariedade à fórmula da potência pode ser esclarecida ao notar que devido ao contato ser indireto no experimento do fogão elétrico e direto no experimento do rabo quente explica-se o maior intervalo de tempo em ambas as curvas do fogão elétrico, visto que, esse, tem que esquentar e resfriar mais materiais até chegar à substância final, a água.

Outra discrepância possível de notar foi a diferença do tempo esperado para aquecimento da água, que advém do cálculo teórico, e o tempo real do experimento com ambas as fontes de potência. Tal fato pode ser explicado por três diferentes fatores.

O fator de maior impacto para essa desconformidade é que em ambas as versões do experimento a tampa estava fora do sistema ou semiaberta, possibilitando assim o calor a ser dissipado no ambiente, fazendo com que na teoria o sistema considerado fechado, na prática se comporte como um sistema aberto que perde calor e massa para o meio externo.

Outro fator que se faz relevante é a interferência de condutividade térmica na versão do experimento utilizando o fogão elétrico, dado que apesar do alumínio ser um bom condutor de calor ainda não é o mais eficaz. Soma-se a isso o fato de que a panela é revestida de material antiaderente, assim interferindo de forma mais grave na transferência do calor.

Ademais, pode-se adicionar o fator de que a água utilizada para o experimento prático não era destilada. Apesar das propriedades da água de torneira se aproximarem das propriedades da água pura, num padrão prático podem tornar-se diferenças significativas.

É possível concluir que este experimento, com suas duas versões, se faria de grande aprendizado para os alunos, uma vez que é de simples realização e traz diferentes análises de conceitos termodinâmicos acerca de algo do cotidiano.

REFERÊNCIAS

CAETANO, Mário. Tabela de Vapor Saturado Seco. **Ciência e Tecnologia da Borracha**, jul. 2012. Disponível em: http://ctborracha.com/wp-content/uploads/2012/07/Tabela-de-vapor-saturado-seco_site-ctborracha-MC.pdf . Acesso em: 25 jul. 2022.

GERAÇÃO LABENS. **Estação de Pesquisa em Energia Solar Epesol Curitiba**. Disponível em: <https://geracao.labens.ct.utfpr.edu.br/painelCampus/ct/>. Acesso em: 25 jul. 2022.

HALLIDAY, David et al. **Fundamentos de Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016a. v. 1: Mecânica.

HALLIDAY, David et al. **Fundamentos de Física**. 10. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016b. v. 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica.

KROSS, Kenneth A.; POTTER, Merle C. **Termodinâmica para engenheiros**. Tradução da 1. ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016.

MORAN, Michael J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 8. ed. Cidade: Wiley, 2014. Acesso em: 02 jul. 2022.