



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
CAMPUS SOUSA  
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO  
DEPARTAMENTO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR  
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

**JOSÉ TEUVINO FERNANDES CARDOSO**

**EXPERIMENTOS EM FÍSICO-QUÍMICA UTILIZANDO MATERIAIS  
ALTERNATIVOS: EQUIVALÊNCIA CALOR-TRABALHO E PROCESSOS  
REVERSÍVEIS**

SOUSA/PB

2022

JOSÉ TEUVINO FERNANDES CARDOSO

**EXPERIMENTOS EM FÍSICO-QUÍMICA UTILIZANDO MATERIAIS  
ALTERNATIVOS: EQUIVALÊNCIA CALOR-TRABALHO E PROCESSOS  
REVERSÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Coordenação do Curso Superior de Licenciatura em Química do Instituto Federal da Paraíba – Campus Sousa, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. Higo de Lima Bezerra Cavalcanti

SOUSA/PB

2022

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Milena Beatriz Lira Dias da Silva – Bibliotecária CRB 15 - 964/T

C268e Cardoso, José Teuvino Fernandes  
Experimentos em Físico-Química utilizando materiais  
alternativos: equivalência calor-trabalho e processos  
reversíveis / José Teuvino Fernandes Cardoso, 2022.  
37 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Higo de Lima Bezerra Cavalcanti.  
TCC (Licenciatura em Química) - IFPB, 2022.

1. Ensino de química. 2. Experimentação Joule - didática.  
3. Termodinâmica química. I. Cavalcanti, Higo de Lima  
Bezerra. II. Título.

IFPB Sousa / BS

CDU 54:37



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
INSTITUTO COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA EM  
QUÍMICA-CAMPUS FEDERAL  
SOUSA



Paraíba

**ATA 58/2022 - CCSLQ/DES/DDE/DG/SS/REITORIA/IFPB**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Experimentos em Físico-Química utilizando materiais alternativos: equivalência calor-trabalho e processos reversíveis .

Autor(a): José Teuvino Fernandes Cardoso.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Sousa, como parte das exigências para a obtenção do título de Licenciado em Química.

Aprovado pela Comissão Examinadora em: 30/09/2022.

Dr. Higo de Lima Bezerra Cavalcanti

IFPB — Campus Sousa / Professor Orientador

Dr. Anderson Sávio de Medeiros Simões

IFPB — Campus João Pessoa/ Examinador 1

Me. José Aurino Arruda Campos Filho

IFPB — Campus Sousa / Examinador 2

Documento assinado eletronicamente por:

- Higo de Lima Bezerra Cavalcanti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 12:02:15.
- Jose Aurino Arruda Campos Filho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 12:32:23.
- Anderson Savio de Medeiros Simoes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 15:02:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/09/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 341050  
Verificador: 764551583e  
Código de Autenticação:



Dedico este trabalho aos meus professores, amigos e familiares, e em especial, a minha mãe. Meus sinceros agradecimentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Nesse momento de grande alegria em que encerro esse tão sonhado ciclo de minha vida, agradeço primeiro à Deus por me conceder forças para alcançar esse feito. Agradeço ainda a Deus por permitir realizar esse sonho que é tão meu quanto de minha amada mãe.

Agradeço à minha mãe que sempre que pode fez quase o impossível para que eu chegasse até aqui. Obrigado mãe! Agradeço ainda a meus amigos que ganhei no IFPB e que pretendo levar para vida. Agradeço a eles pois sempre estiveram comigo e sei que posso contar com eles.

Agradeço ao IFPB Campus Sousa por possibilitar conhecer tanta gente maravilha e onde aprendi muito.

Agradeço a todos os professores que tive o privilégio de conhecer durante esse longo curso. Em especial, ao professor Dr. Higo Cavalcanti que me orientou neste trabalho importante.

“Você nunca sabe a força que tem até que sua única alternativa é ser forte”.

- Jhony Depp

## RESUMO

A Química é uma ciência de caráter experimental e a dificuldade em realizar experimentos nas salas de aula de diversos níveis de ensino é comumente citada por discentes e pesquisadores do ensino em ciências. Outra dificuldade persistente relacionada ao ensino de Química é o próprio uso da linguagem, uma vez que muitos termos que são de uso cotidiano na língua portuguesa possuem significados distintos ou apenas aproximados quando inseridos no contexto científico. No presente trabalho propõe-se a elaboração de dois experimentos didáticos de caráter demonstrativo utilizando materiais alternativos em sua produção. No primeiro, que visa adaptar o famoso experimento de Joule da equivalência calor e trabalho, um motor de corrente contínua reutilizado foi aplicado para girar uma hélice plástica no interior de um recipiente contendo água, fazendo-a elevar sua temperatura em 1°C no período de 15 minutos. O segundo experimento foi desenvolvido para simular um processo reversível aproximado no contexto da termodinâmica. A água no interior de um recipiente foi aquecida por um aquecedor elétrico, ligado em intervalos de tempo regulares de poucos segundos; a energia então foi transferida para a água em um recipiente de alumínio de maneira extremamente lenta e, a cada passo, o equilíbrio térmico foi atingido. Embora os experimentos realizados apresentem um forte caráter qualitativo, eles podem ser utilizados para demonstrar a diferenciação entre processos irreversíveis e reversíveis no contexto e na linguagem científica própria da Termodinâmica Química, bem como aprofundar-se no entendimento da energia e as maneiras de transferi-la.

**Palavras-chave:** Experimentação, Calor, Joule, Processo Reversível.



## ABSTRACT

Chemistry is an experimental science, and the difficulties in performing experiments in the class of different teaching levels is constantly reported by students and researchers in the field of science teaching as a major issue. Another long lasting difficulty related to the teaching of Chemistry is the very language, considering that many terms that are used in our daily lives assume different or only approximate meanings when they are brought in the scientific context. In the present work two didactic experiments made with alternative materials with demonstrative purposes are proposed. The first one, that aims to adapt the famous Joule experiment on the heat-work equivalence, a reused direct current motor was applied to make a plastic helix spin in the interior of a recipiente filled with water, elevating its temperature 1°C in the period of 15 minutes. The second experiment focused in simulating an approximate reversible process in the context of Thermodynamics. Water in the interior of a container was heated up by a water boiler, turned on in regular and short time intervals; energy then flows to the water in a aluminium cup in an extremely slow fashion and, at each step, thermal equilibrium was achieved. Although the described experiments embed a strong qualitative character, They might be used to demonstrate the difference between irreversible and reversible processes in the context and scientific language inherent to Chemical Thermodynamics and also deepen the understanding of energy and the ways it can be transferred.

**Keywords:** Experimentation, Heat, Joule, Reversible Process.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação esquemático do experimento de Joule .....	16
<b>Figura 2.</b> (a) Materiais utilizados na produção do experimento de Joule adaptado; (b) hélice giratória.....	24
<b>Figura 3.</b> (a) Apresentação dos níveis distintos que os termômetros foram imersos no sistema. (b) Esquema de um sistema desenvolvido para retratar um aquecimento irreversível. ....	26
<b>Figura 4.</b> Materiais utilizados na produção do experimento que simula um aquecimento reversível .....	27
<b>Figura 5.</b> Representação do aparato desenvolvido para a realização de aquecimento reversível .....	27
<b>Figura 6.</b> Aparato para a realização do experimento de Joule adaptado .....	29
<b>Figura 7.</b> Aparato desenvolvido para demonstração de um aquecimento reversível aproximado .....	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Temperatura e tempo decorrido após início do experimento de equivalência calor-trabalho. ....	30
<b>Tabela 2.</b> Temperatura de equilíbrio, variação na temperatura e tempo decorrido para o equilíbrio térmico ser observado acionando o aquecedor por 5 s.....	33
<b>Tabela 3.</b> Temperatura de equilíbrio, variação na temperatura e tempo decorrido para o equilíbrio térmico ser observado acionando o aquecedor por 3 s.....	33

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 A Energia e a Equivalência Calor e Trabalho.....	14
2.2 Processos Irreversíveis e Reversíveis .....	17
2.2.1 Processos Reversíveis e Irreversíveis em Livros Didáticos de Físico-Química .....	18
<b>3 OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 Objetivo Geral.....	23
3.2 Objetivos Específicos .....	23
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
4.1 A Equivalência Calor e Trabalho.....	24
4.2 Processos Reversíveis e Irreversíveis .....	25
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
5.1 A Equivalência Calor e Trabalho.....	29
5.2 Processos Reversíveis e Irreversíveis .....	31
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>35</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ensino de Química costuma ser desafiador seja para a educação básica, em que espera-se despertar e instigar o interesse pela ciência mesmo na ausência de ferramentas educacionais e instrumentos de laboratório (LINDEMANN, 2010), ou mesmo o ensino superior, em que se faz necessário o uso de linguagem técnica apropriada a um ambiente formal. Na educação superior (nível de graduação e pós-graduação), a existência de laboratórios especializados, em especial nas instituições públicas de ensino, é mais comum; sendo assim, a experimentação e as atividades práticas costumam estar inseridas de maneira regular nos currículos e projetos pedagógicos.

Independente da modalidade de ensino, a experimentação pode atuar como facilitadora da aprendizagem de conceitos fundamentais, através de atividades demonstrativas e investigativas (SANTOS; MENEZES, 2020; GONÇALVES; GOI, 2020; LEITE, 2018). Quando se fala de conceitos fundamentais tratam-se as noções mais básicas para o entendimento de determinado tópico em ciências. Uma revista como a conhecida “Química Nova na Escola” dedica a seção “Conceitos Científicos em Destaque” para apresentar maneiras inovadoras de discutir e auxiliar o ensino de conceitos fundamentais (QUÍMICA NOVA NA ESCOLA, 1995).

No processo de ensino-aprendizagem é fundamental, por parte dos educadores, a utilização adequada da linguagem científica. Não definir adequadamente o significado de termos e conceitos conforme aplicados no contexto científico e suas diferenças em relação à forma como aquele mesmo termo ou expressão é utilizado na linguagem cotidiana pode gerar um obstáculo importante para uma aprendizagem efetiva (LOPES, 1992).

Um exemplo desta diferenciação entre linguagem cotidiana e linguagem científica é o uso do termo calor. Não é incomum ouvir em nosso dia a dia a expressão “estou com muito calor”, entretanto, tal noção de “possuir calor” não se sustenta na linguagem da Termodinâmica<sup>1</sup>, que associa o calor apenas à nomenclatura do processo através do qual a energia é transferida de um corpo para outro como consequência de uma diferença de temperatura (ATKINS; PAULA, 2010; LEVINE, 2009).

---

<sup>1</sup> houve um tempo em que este termo esteve mais próximo da realidade, quando acreditava-se na existência do calórico, que seria efetivamente um fluido material, algo que poderia ser possuído por um corpo.

A linguagem científica apresenta características próprias que a diferenciam da linguagem cotidiana e que exigem uma ponderação mais detalhada por parte do ouvinte/leitor. Cabe aos educadores, utilizando diferentes metodologias, realizar a adequação e contextualização entre as linguagens, no sentido de expandir o conhecimento e a linguagem do dia a dia do alunado para aquele da linguagem científica formal (MACHADO; MORTIMER, 2012). É importante ressaltar que é um equívoco atribuir indiscriminadamente ao conhecimento originado da linguagem cotidiana a pecha de errado (MOSCOVICI, 2003), uma vez que tal linguagem costuma ser adequada para atender nossa demanda de comunicação na vida diária.

A área da Físico-química, em especial a Termodinâmica Química, traz diversos exemplos de termos e conceitos que fazem parte do dia a dia dos estudantes, mas que podem ter significados diversos daqueles atribuídos ao senso comum. Alguns exemplos são: atividade, entropia, equilíbrio etc. O conceito de energia é absolutamente central para o entendimento da termodinâmica e, ao mesmo tempo, um dos mais abstratos. Do ponto de vista experimental, a energia estará sempre relacionada a uma medida indireta, ou seja, a partir da mensuração de outras propriedades que se relacionam à energia. Outro conceito relevante e que sofre com dificuldades de interpretações, especialmente relacionado ou uso cotidiano da palavra, é o conceito de processo reversível que, adianta-se, na área da Físico-química não está relacionado a processos que podem fazer um sistema retornar a seu estágio inicial.

O presente trabalho propõe-se a abordar dois conceitos: a energia, no sentido da equivalência entre calor e trabalho, que reconhece a existência da energia térmica e os conceitos de processos reversíveis e irreversíveis no contexto da Termodinâmica Química. A abordagem escolhida para a discussão foi a experimentação de cunho demonstrativo, a partir do desenvolvimento de experimentos utilizando materiais alternativos. Foi reproduzido o famoso experimento de Joule, que demonstrou que o trabalho poderia ser aplicado com o resultado de gerar uma elevação na temperatura e propõe-se um experimento que simula um aquecimento reversível hipotético.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A Energia e a Equivalência Calor e Trabalho

A Termodinâmica é frequentemente definida como a ciência da energia. O conceito de energia, por sua vez, aparece em livros de ciência básica e às vezes ensino superior como a capacidade de realizar trabalho (HEWITT, 2002; NUSSENVZEIG, 2002). Percebe-se que existe a necessidade de um conhecimento prévio sobre o termo trabalho (cujo significado também pode diferir do uso cotidiano da palavra). O trabalho ( $W$ ), na Física, é uma grandeza escalar dada pela integral definida, da posição inicial ( $r_i$ ) a posição final ( $r_f$ ) do produto escalar entre dois vetores: força ( $\vec{F}$ ) e deslocamento ( $d\vec{r}$ ):

$$W = \int_{r_i}^{r_f} \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Observando a equação, verifica-se que para que exista trabalho, deve haver uma força sobre o sistema e este deve passar por uma mudança de posição, um deslocamento. A energia então, pode ser pensada como a capacidade de fazer um sistema mudar de posição, ou seja, se mexer. Tal capacidade pode ser diretamente observada, quando temos a chamada energia cinética ( $E_c$ ), a energia relacionada a velocidade, com o sistema de fato se movendo, e também como uma capacidade latente, que a depender da posição do sistema, a aplicação de uma força (como a da gravidade) pode iniciar um movimento, caso em que temos a chamada energia potencial ( $E_p$ ).

Um dos triunfos da mecânica clássica (mecânica Newtoniana) foi perceber que, para todos os sistemas físicos, as condições iniciais e finais de uma dada transformação mantêm uma característica ou uma quantidade, que jamais muda. Tal quantidade é a soma das energias cinética e potencial (NUSSENVZEIG, 2002). Este fato é a chamada lei da conservação da energia mecânica ( $E_m$ ). Tem-se que:

$$E_m^i = E_m^f$$

$$E_c^i + E_p^i = E_c^f + E_p^f$$

em que os sobrescritos  $i$  e  $f$  indicam as condições inicial e final, respectivamente.

A conservação da energia é um resultado importantíssimo e mantêm-se como um dos pilares do conhecimento científico, tendo resistido às revoluções científicas da mecânica quântica e da teoria da relatividade. No entanto, a energia mecânica não representa todos os aspectos da energia. Tomemos como exemplo um pêndulo que se eleva a uma dada altura. O

pêndulo possui inicialmente apenas energia potencial e, ao ser liberado, converte essa energia potencial em energia cinética, de sorte que, ao alcançar o outro lado, jamais pode atingir uma altura superior à qual ele foi lançado inicialmente. A lei da conservação da energia mecânica, no entanto, prevê que o movimento do pêndulo deveria ser eterno, com a energia sendo convertida sem parar, entre cinética e potencial. A experiência nos mostra que isso não acontece e o pêndulo, eventualmente, para de se mover. Devemos nos perguntar então: o que aconteceu com a energia? Ou mais precisamente, para onde ela foi?

No exemplo do pêndulo, o movimento do objeto encontra uma oposição, no caso, a atmosfera. O ar resiste ao movimento, gerando um tipo de fricção, atrito e, se tivéssemos instrumentos sensíveis o bastante, poderíamos registrar um aumento na temperatura do pêndulo e do gás na atmosfera. A relação entre a energia e a temperatura não veio imediatamente com a conservação da energia mecânica e foi necessário a revolução industrial e a busca por máquinas a vapor cada vez mais eficientes para iniciar uma investigação sistemática da energia em todas as suas formas.

Nas máquinas a vapor ficava muito claro que um gás aquecido a uma temperatura alta era capaz de erguer um pistão (perceba: fazer algo se mover) mas não havia ainda uma “padronização”, ou um reconhecimento daquele aspecto da energia. Pesquisadores como o francês Sadi Carnot e outros em sua época vislumbravam a existência de um fluído chamado de calórico que existia em abundância em objetos em temperaturas altas (LEVINE, 2009) e este fluído poderia ser transferido para outros objetos mediante contato, o que seria uma versão rudimentar da conservação da energia. O entendimento do calórico como uma substância, como um elemento (o Tratado Elementar da Química, de Antoine Lavoisier lista o calórico como um elemento de fato) pressupõe que “dentro” de cada corpo haja uma quantidade limitada deste calórico. Esse aspecto da teoria do calórico é o que viria a ser inicialmente contestado no final do século XVIII e início do século XIX.

Em meados de 1798, o Conde Rumford, trabalhando no exército bávaro, observou com atenção o processo de produção dos tubos de canhões da artilharia (LEVINE, 2009; PASSOS, 2009). No processo, uma espécie de broca é movida por cavalos, perfurando um bloco de metal. Aquele procedimento aquecia bastante o metal e persistia por todo o tempo em que o processo era realizado. O Conde Rumford foi capaz, inclusive, de fazer uma quantidade de água entrar em ebulição à partir do aquecimento resultante da produção dos canhões (realizando o procedimento em um tanque com água). De acordo com a teoria do calórico, o mesmo poderia apenas ser transferido de um corpo para outro e jamais garantir um “aquecimento ilimitado”.

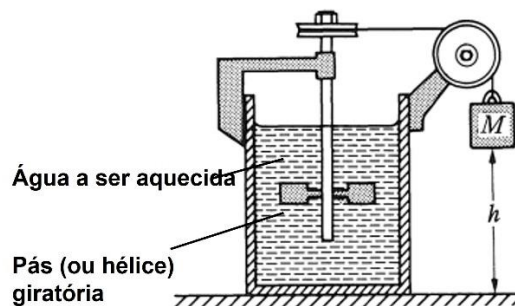


Quase 50 anos depois, em 1842, o médico Julius Mayer afirmou que o processo de digestão envolvia a conversão do alimento em movimento dos músculos do corpo (trabalho mecânico) e na manutenção da temperatura corporal (PASSOS, 2009). De maneira especulativa, ele igualou calor e trabalho como formas de energia e que esta, era conservada.

Data-se de 1840 o famoso experimento de Joule, realizado pelo cientista e filho de fabricantes de cerveja James Prescott Joule, que constatou de forma experimental a equivalência entre trabalho mecânico e calor (PASSOS, 2009; LEVINE, 2009). Joule foi capaz de demonstrar que a mesma transformação – elevar a temperatura de uma amostra de água – poderia ser realizada de maneiras diferentes, o aquecimento convencional, a partir da queima de carvão, por exemplo, mas também a partir da realização de trabalho mecânico, de movimento.

O experimento de Joule consistia em movimentar um eixo contendo algo como hélices que permaneciam mergulhadas na amostra de água. O movimento desse eixo era ocasionado por pesos sustentados por uma corda em um sistema de polias. Ao posicionar, manualmente, os pesos a uma altura  $h$ , o sistema continha apenas energia potencial; com a liberação dos pesos, parte da energia potencial era convertida em energia cinética, tanto dos pesos quanto da hélice submersa (PASSOS, 2009; SOUZA; SILVA; ARAÚJO, 2014). A rotação da hélice, por fim, resultou na elevação da temperatura da água, conforme observado pelo termômetro incluído no aparato (os detalhes podem ser observados na Figura 01).

**Figura 1.** Representação esquemática do experimento de Joule



**Fonte:** adaptado de Castellan (1983)

O recipiente contendo a amostra de água era feito de metal e James Joule realizou a tarefa de determinar o calor específico daquele material à partir de seu aquecimento ocasionado pela passagem de uma corrente elétrica (efeito este nomeado, inclusive, de efeito Joule) (PASSOS, 2009). Utilizando este aparato, um calorímetro, Joule estabeleceu uma relação entre

o trabalho e a quantidade de energia transferida na forma de calor (o equivalente mecânico do calor). Dessa forma, determinou, pela variação de altura das massas o trabalho realizado pela força de gravidade, a variação de energia sofrida pela água. A variação de temperatura, sem dúvida representava uma variação de energia, demonstrando-se assim que a energia também se manifesta na forma de energia térmica<sup>2</sup>. A unidade do Sistema Internacional (SI) para energia é o Joule,  $J$ , em homenagem a James Prescott Joule e seu trabalho definitivo. Estabeleceu-se que 4180  $J$  de energia correspondiam a 1000 cal (caloria, outra unidade para energia), ou seja, 1 cal equivale a 4,18  $J$  (LEVINE, 2009).

## 2.2 Processos Irreversíveis e Reversíveis

Em algum momento nos cursos de graduação em Química, os estudantes são apresentados à diferenciação entre processos irreversíveis e processos reversíveis. Este tópico pode representar um obstáculo de experiência primeira, segundo argumentos de Stadler e colaboradores (2012), tendo em vista a associação entre o termo *reversível* como algo que pode ser modificado e voltar ao estado inicial e o termo *irreversível* como seu antônimo, ou seja, algo que não pode ser revertido, não pode retornar ao estado inicial e está, para sempre, alterado.

Uma busca em alguns dicionários *online* da língua portuguesa traz as seguintes definições:

- Michaelis *Online* (2018): *Reversível* – “1. Que pode reverter(-se); revertível; 2. Que pode retornar ao estado primitivo; reversivo; 3. Diz-se do fenômeno em que se pode inverter o efeito e a causa.” *Irreversível* – “Que não é reversível; que age apenas em um sentido e que não é possível fazer retornar ao estágio anterior.”
- Dicionário *Online* de Português (2018): *Reversível* – “Que pode ser revertido; que pode sofrer reversão; que volta atrás: decisão reversível.” *Irreversível* – “Que não é reversível.”

Por sua vez, as versões impressas de alguns dicionários trazem as definições a seguir:

- Mini Aurélio: o dicionário da língua portuguesa (FERREIRA, 2010): *Reversível* – “1. Que se pode, ou que pode reverter; 2. Que se pode usar pelo direito ou pelo avesso.” *Irreversível* – “Não reversível.”
- Dicionário Houaiss da língua portuguesa (HOUAISS; VILLAR, 2009): *Reversível* – “1. Que se pode reverter, reversível; 2 Que pode mudar de função.” *Irreversível* – “não

---

<sup>2</sup> Sem contar a energia elétrica, energia sonora, energia nuclear...

reversível. 1. De que não é possível inverter o sentido ou a direção; que se efetua numa única direção, sem a possibilidade de retornar à etapa anterior 2. Que não é possível efetuar em sentido inverso, ainda que se utilizem as mesmas quantidades de calor e de trabalho (diz-se de processo) 3. Que se prossegue até o final sem ser limitada pela reação inversa (diz-se de reação).”

Deve-se destacar que a definição 2 do verbete “irreversível” fornecida pelo Dicionário Houaiss é indicada explicitamente como uma definição relacionada à Física Térmica, porém, conforme será discutido a seguir, tal significado apresenta-se incompleto. Algo semelhante pode ser dito sobre a definição 3, indicada como o significado de irreversível em Química. Pode-se perceber que os significados presentes em dicionários da língua portuguesa corroboram com os significados que supõem o conhecimento proveniente da linguagem do dia a dia.

Ao introduzirmos o contexto da Termodinâmica Química, faz-se necessário uma diferenciação. Em primeiro lugar, define-se o estado de um sistema termodinâmico, que é determinado pelo conjunto de suas propriedades (temperatura, pressão, entre outras).

Os sistemas termodinâmicos podem sofrer mudanças de estado, ou seja, modificar suas propriedades através de certos processos, por exemplo: a temperatura pode ser alterada através de um aquecimento e o volume pode ser alterado por uma expansão.

No contexto da Termodinâmica, os processos citados podem ser realizados de maneiras diferentes, por exemplo: um aquecimento e uma expansão tanto podem ocorrer de maneira reversível quanto irreversível. Um gás pode ser comprimido de um volume inicial  $2,0 \text{ m}^3$  a um volume final  $1,0 \text{ m}^3$  reversivelmente ou irreversivelmente, bem como expandir-se, em seguida, do volume  $1,0 \text{ m}^3$  a  $2,0 \text{ m}^3$  através de um processo reversível ou irreversível. Em Termodinâmica é um equívoco supor que um processo irreversível implica num processo que não pode ser “invertido” e ter o sistema de volta às condições iniciais de pressão, temperatura ou volume. O simples ato de aquecer uma amostra de  $25^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$  pode ser realizado de maneira irreversível, sem implicar na necessidade ou possibilidade de, posteriormente, resfriar a mesma amostra.

### 2.2.1 Processos Reversíveis e Irreversíveis em Livros Didáticos de Físico-Química

Nesta seção são discutidas algumas das definições e explicações acerca dos processos reversíveis e irreversíveis conforme apresentadas em alguns livros textos populares na área de Físico-Química. Em geral, considerou-se as edições em língua inglesa da bibliografia citada; as passagens transcritas neste texto são traduções livres produzidas pelos autores do presente

trabalho (a exceção é o livro-texto Físico-Química Vol. 1, por David W. Ball (BALL, 2005), em que foi utilizada a versão traduzida para o português).

Na 9ª edição do livro *Physical Chemistry* (ATKINS; PAULA, 2010), os autores Peter Atkins e Julio de Paula afirmam:

“Uma transformação reversível em termodinâmica é uma transformação que pode ser revertida pela modificação infinitesimal de uma variável. A palavra-chave “infinitesimal” aguça o significado convencional da palavra “reversível” como sendo algo que pode mudar a direção. Um exemplo de reversibilidade que já encontramos é o equilíbrio térmico de dois sistemas à mesma temperatura. A transferência de energia como calor entre os dois é reversível porque, se a temperatura de qualquer sistema for reduzida infinitesimalmente, então energia flui para o sistema de menor temperatura. Se a temperatura de qualquer sistema em equilíbrio é elevada infinitesimalmente, então a energia flui saindo do sistema de temperatura mais alta. Há obviamente uma relação muito próxima entre reversibilidade e equilíbrio: sistemas em equilíbrio estão inclinados a sofrer mudanças reversíveis.” (ATKINS; PAULA, 2010, p.51)

Na definição seguida de exemplo apresentada em P. Atkins e J. de Paula (ATKINS; PAULA, 2010), o sentido da transformação é importante. Chamando os dois sistemas em contato, e em equilíbrio térmico, de A e B, caso haja uma redução infinitesimal na temperatura do sistema A, um  $-dT$ , a energia fluirá do corpo B para o corpo A, entretanto, se houver um aumento da temperatura de A,  $+dT$ , a energia fluirá no sentido de A para B. A modificação infinitesimal  $dT$  altera o sentido do fluxo de energia, portanto, o equilíbrio térmico representa uma situação de reversibilidade.

Ainda no livro texto de P. Atkins e J. De Paula (ATKINS; PAULA, 2010) o autor conclui que o equilíbrio mecânico – igualdade de pressão entre dois sistemas separados por uma parede móvel – também representa reversibilidade, utilizando como exemplo um gás contido por um pistão móvel. No exemplo citado a pressão  $P$  do gás é igual à pressão externa  $P_{ext}$ , de sorte que um aumento infinitesimal  $+dP_{ext}$  faz com que o volume do gás seja reduzido, enquanto uma redução de ordem  $-dP_{ext}$  causará a expansão do gás.

O processo irreversível, por sua vez, não é definido de maneira destacada no livro texto de Atkins e Paula, mas trazido como uma extensão do exemplo anterior, a expansão de um gás. Supondo uma  $P_{ext}$  de 1 atm, e uma pressão  $P$  de um gás comprimido à 2,5 atm (ou seja,  $P_{ext}$  e  $P$  são diferentes por uma quantidade mensurável, ou ainda, não infinitesimal), a expansão do gás comprimido não será revertida por uma variação  $+dP_{ext}$ , uma vez que esta mudança não fará com que a pressão externa supere aquela do gás. Conclui-se, portanto, que esta expansão é

um processo irreversível, uma vez que uma modificação infinitesimal numa variável – neste caso  $P_{ext}$  – não é capaz de mudar o sentido da transformação.

Utilizando também a abordagem que considera as transformações infinitesimais David W. Ball (BALL, 2005) em seu livro texto Físico-Química afirma:

“Se fosse possível, poderíamos variar o volume do gás dentro da câmara do pistão em pequenas etapas infinitesimais, permitindo que o sistema reagisse a cada variação infinitesimal, antes de ocorrer a próxima variação. Em cada etapa, o sistema entraria em equilíbrio com sua vizinhança, de modo que todo o processo estaria em um estado de equilíbrio contínuo. (Na realidade, isso iria requerer um número infinito de etapas para qualquer variação finita no volume. Variações suficientemente lentas são uma boa aproximação.) Tal processo é chamado de reversível. Processos que não são realizados desse modo (ou não são aproximados desse modo) são chamados de irreversíveis” (BALL, 2005, p. 28).

De maneira semelhante, R. Mortimer em *Physical Chemistry* (MORTIMER, 2000) traz:

“Um processo reversível é aquele que pode, a qualquer momento, ser revertido em direção por uma mudança infinitesimal na vizinhança. [...] um processo reversível deve ocorrer de maneira infinitamente lenta, e o sistema deve ter tempo para atingir o equilíbrio em cada estágio do processo. Durante um processo reversível, o sistema passa por uma sequência de estados de equilíbrio. Não é requerido ao sistema permanecer em estados de equilíbrio durante um processo irreversível, e o processo pode ocorrer num tempo finito.” (MORTIMER, 2000, p. 18).

O livro texto de Ira N. Levine, *Physical Chemistry* (LEVINE, 2009) aponta, já na página 3, uma relação entre o equilíbrio e a (ir)reversibilidade dos processos: “Estudaremos a termodinâmica de equilíbrio, que lida com sistemas em equilíbrio (a termodinâmica irreversível lida com sistemas de não-equilíbrio [...])” (LEVINE, 2009, p. 3). O autor estabelece assim uma relação entre a irreversibilidade e uma condição que não atende os critérios de definição do equilíbrio (térmico, mecânico, químico, etc). Mais adiante, na página 43 é apresentada a seguinte definição:

“Um processo reversível é um no qual o sistema está sempre infinitesimalmente próximo do equilíbrio, e uma mudança infinitesimal nas condições pode reverter o processo e restaurar tanto o sistema quanto suas vizinhanças a seus estados iniciais. Um processo reversível é, obviamente, uma idealização” (LEVINE, 2009, p. 43)

O autor (utilizando também o exemplo de um gás em expansão) argumenta ainda que uma mudança finita e mensurável de pressão pode ser realizada através de um número infinito de passos infinitesimais, o que levaria um tempo infinito (caracterizando a idealização

mencionada). Realizando o processo dessa maneira, em cada passo o sistema estaria infinitesimalmente próximo ao equilíbrio, e qualquer variação infinitesimal reverteria o sentido da transformação.

Ira N. Levine (2009) aprofunda-se um pouco mais sobre os processos irreversíveis, que podem sair do alcance da termodinâmica. Para tal, utiliza mais uma vez o exemplo do gás confinado num pistão, porém submetido a uma redução finita na pressão externa  $P_{ext}$ . Após esta redução, com a pressão no interior do sistema maior que  $P_{ext}$ , o êmbolo do pistão será acelerado “de dentro para fora”. Esta aceleração fará com que a pressão seja menor próximo à extremidade móvel do pistão, além de criar uma turbulência no gás. Em outras palavras, não será possível associar uma única pressão ao sistema, pois diferentes porções apresentarão pressões diferentes, impossibilitando a determinação de estado termodinâmico do sistema e retirando-o das condições de equilíbrio. Tal processo é então entendido como irreversível.

A transferência de energia na forma de calor também pode ser realizada de maneira reversível ou irreversível. Na primeira forma faz-se necessário uma diferença infinitesimal na temperatura dos sistemas em contato, enquanto no processo irreversível tem-se uma diferença finita de temperatura. Um aquecimento reversível envolve infinitos passos em que a temperatura aumenta por um  $dT$ , seguido do estabelecimento do equilíbrio térmico em cada passo. No processo irreversível em que dois sistemas são postos em contato, a superfície do sistema em menor temperatura será aquecida mais rapidamente que as demais porções do material, gerando um gradiente de temperatura. Dessa forma não é possível assinalar um valor bem definido para  $T$  e, novamente, chega-se à situação de não-equilíbrio (LEVINE, 2009).

O livro texto de G. Castellan, *Physical Chemistry* (CASTELLAN, 1983) inclui o papel da vizinhança na classificação dos processos em reversíveis e irreversíveis na seguinte passagem:

“Suponha que um sistema sofre uma mudança de estado através de uma sequência determinada de estados intermediários e é então restaurado a seu estado original através da mesma sequência de estados em ordem inversa. Caso as vizinhanças sejam também restauradas ao seu estado original, a transformação em ambas as direções é reversível. O processo correspondente é um processo reversível. Se as vizinhanças não retornam ao estado original após o ciclo, a transformação e o processo são irreversíveis” (CASTELLAN, 1983, p. 112)

Para exemplificar o papel da vizinhança o autor propõe uma transformação cíclica, composta da expansão de um gás (de um volume inicial  $V_1$  até um volume final  $V_2$ ) e de sua posterior compressão (retorno a  $V_1$ ), executada de duas maneiras diferentes: a primeira envolve

a expansão frente à uma pressão externa constante  $P_2$  seguida da compressão frente à pressão constante  $P_1$ . O trabalho total  $W$  produzido neste procedimento é dado por:

$$W = W_{exp} + W_{comp}$$

em que  $W_{exp}$  refere-se ao trabalho de expansão e  $W_{comp}$  ao trabalho de compressão. O trabalho de expansão é por  $W_{exp} = P_2(V_2 - V_1)$  em que  $V_2$  e  $V_1$  são os volumes final e inicial da amostra de gás, respectivamente. Por sua vez, o trabalho de compressão é dado por  $W_{comp} = P_1(V_1 - V_2)$ . Tem-se que:

$$W = W_{exp} + W_{comp}$$

$$W = P_2(V_2 - V_1) + P_1(V_1 - V_2)$$

$$W = (P_2 - P_1)(V_2 - V_1)$$

A parcela  $(V_2 - V_1)$  é positiva, enquanto  $(P_2 - P_1)$  é negativa, resultando num trabalho total negativo, ou seja, embora o sistema tenha voltado às suas condições iniciais, houve algum trabalho exercido pela vizinhança. Nesta situação a vizinhança não retorna a seu estado original, e o processo é classificado como irreversível.

Neste exemplo observa-se claramente a diferenciação do uso do termo irreversível em seu significado relacionado ao senso comum e aquele da linguagem científica, pois mesmo o processo sendo irreversível, o sistema retorna às suas condições iniciais.

A segunda maneira de realizar este ciclo expansão-compressão é realizar cada um dos processos através de infinitos passos infinitesimais, para os quais observa-se o equilíbrio mecânico, ou seja, a igualdade entre a pressão do gás e a pressão externa. Neste caso, o trabalho é calculado da seguinte maneira:

$$W = W_{exp} + W_{comp}$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV + \int_{V_2}^{V_1} P dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV - \int_{V_1}^{V_2} P dV = 0$$

Neste caso não há trabalho líquido realizado, ou seja, tanto o sistema quanto a vizinhança retornam a seus estados iniciais e o processo é classificado como reversível.

A partir das análises desta seção e das anteriores pode-se verificar a discrepância entre a definição formal dos termos reversível e irreversível no contexto da Termodinâmica Química e a noção pré-concebida baseada na linguagem cotidiana e reforçada por alguns dicionários bastante utilizados para consultas escolares.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo Geral

Desenvolver experimentos didáticos utilizando materiais alternativos a fim de ilustrar a equivalência entre calor e trabalho e a diferenciação entre processos reversíveis e irreversíveis no contexto da Termodinâmica Química.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Demonstrar a equivalência entre calor e trabalho reproduzindo o experimento de Joule, porém adaptando-o com a aplicação de materiais alternativos;
- Realizar um aquecimento irreversível convencional a fim de comparar os processos de aquecimento;
- Realizar um aquecimento reversível aproximado utilizando materiais alternativos bem como avaliar a praticabilidade da execução do experimento;
- Discutir as diferenças entre os tipos de processos termodinâmicos e destacar a definição científica formal dos termos reversível e irreversível.



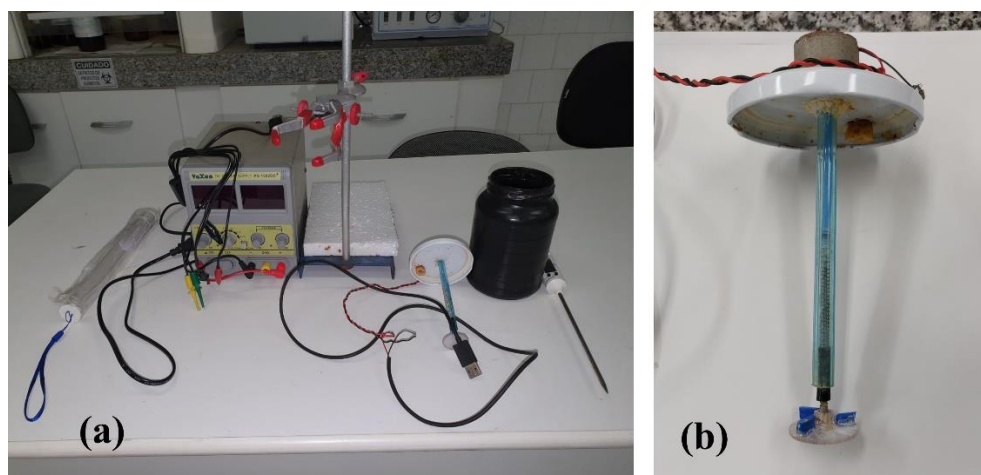
## 4 METODOLOGIA

No presente trabalho expõe-se a ideia do uso da experimentação utilizando de materiais alternativos para demonstrar conceitos fundamentais da Termodinâmica Química. Foram abordados os experimentos: processos de transferência de energia através do movimento, ou seja, a equivalência entre trabalho e calor; e os processos reversíveis e irreversíveis. Discute-se separadamente a metodologia empregada no desenvolvimento de cada experimento.

### 4.1 A Equivalência Calor e Trabalho

O famoso experimento de Joule, que demonstrou a equivalência entre trabalho e energia na forma de calor, pode ser demonstrado utilizando um sistema de manivelas e água em um recipiente apropriado. Para reproduzir este experimento foi construído um equipamento capaz de elevar a temperatura da água a uma determinada temperatura em um dado tempo.

**Figura 2.** (a) Materiais utilizados na produção do experimento de Joule adaptado; (b) hélice giratória.



**Fonte:** autoria própria, 2022.

Em relação aos materiais utilizados para adaptar o experimento destaca-se a substituição do sistema de massas, cordas e polias por um motor elétrico reutilizado, originalmente pertencente a um aparelho leitor de CD/DVD (obtido em lojas de assistência técnica de aparelhos eletrônicos). Trata-se de um motor elétrico de corrente contínua com diferença de potencial (ddp) de entrada de 12V. Para fornecer a energia elétrica necessária foi utilizada uma fonte de ddp 15 V (marca YaXva, modelo PS-1502DD<sup>+</sup>). A água a ser aquecida foi mantida

em um pote de vidro com tampa metálica, de medida de 700 mL. A tampa foi perfurada em dois pontos, um deles para a inserção de 1 termômetro digital do tipo espeto, com faixa de trabalho de  $-45^{\circ}\text{C}$  a  $230^{\circ}\text{C}$ , e na outra perfuração foi inserido o sistema móvel, a hélice giratória que permanece em contato com a água. A hélice foi construída utilizando uma caneta com tubo de vidro, em que passa um tubo capilar (tubo de plástico de um borrifador) anexado ao eixo do motor. Na outra ponta do tubo, partes plásticas da tampa da caneta foram utilizadas para dar forma à hélice giratória juntamente com uma engrenagem de plástico retirada do mesmo aparelho leitor de CD/DVD. Os materiais listados podem ser observados na Figura 2(a) acima e, com destaque para a hélice giratória na Figura 2(b).

O pote de vidro aparece na Figura 2(a) totalmente coberto com fita isolante preta. Na tampa do pote foram feitos dois furos, um para adaptar o motor de DVD no centro e o outro na borda da tampa, para o termômetro. Utilizando a cola, o motor foi fixado no furo central da tampa do pote, mantendo uma certa distância da tampa, uma vez que o próprio motor experimenta um aquecimento devido à passagem de corrente elétrica, o que poderia interferir na observação realizada aqui.

No furo na extremidade da tampa do pote foi adicionado ainda um pedaço pequeno de mangueira de borracha, de forma que o termômetro possa passar por dentro sem que entre em contato direto com a tampa do pote.

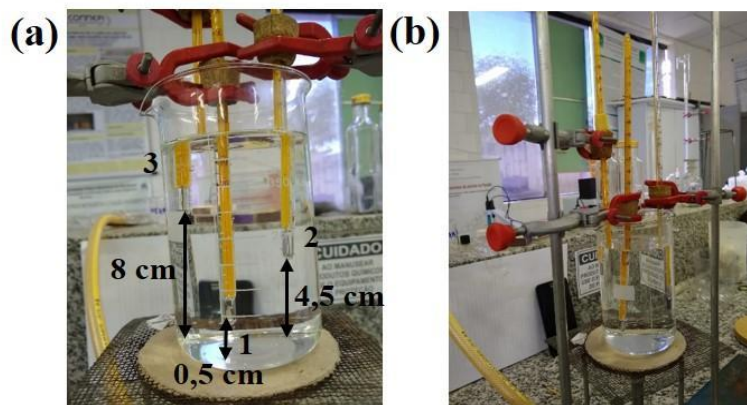
A parte final da construção do equipamento foi conectar os fios de alimentação do motor, ligando devidamente os fios positivos e negativos de um cabo USB (referenciados pela cor, vermelho positivo e preto negativo). Inicialmente tentou-se utilizar um carregador de bateria de celular como fonte de alimentação, porém foi observado um aquecimento excessivo do motor, comprometendo sua integridade. Sendo assim, a fonte digital que permite o ajuste da diferença de potencial mostrou-se mais adequada. Os resultados descritos na seção a seguir compreendem a aplicação de uma diferença de potencial de 8,5 V.

#### 4.2 Processos Reversíveis e Irreversíveis

Com o intuito de apresentar um aquecimento irreversível construiu-se um sistema em que variações finitas de temperaturas fossem evidentes e, desta forma, mostrar que a amostra sendo aquecida não atinge o equilíbrio térmico no decorrer do processo. Para tal, três termômetros laboratoriais (faixa de trabalho de  $-10,0^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ ) foram posicionados em alturas distintas (com o auxílio de suportes universais e garras) no interior de um béquer contendo 400 mL de água destilada. Em relação ao fundo do béquer, os bulbos dos termômetros numerados

de 1 a 3 foram posicionados com alturas 0,5 cm; 4,5 cm e 8 cm respectivamente, conforme apresentado na Figura 3(a).

**Figura 3.** (a) Apresentação dos níveis distintos que os termômetros foram imersos no sistema. (b) Esquema de um sistema desenvolvido para retratar um aquecimento irreversível.



**Fonte:** autoria própria, 2022

O aquecimento, neste caso, foi realizado com o sistema bico de Bunsen, tela de amianto e tripé de ferro (Figura 3(b)). Nessa configuração, o aquecimento inicia-se na região inferior do béquer. Convém relembrar que o estado de equilíbrio térmico implica em uma temperatura unicamente definida para toda a extensão da amostra, além da manutenção daquela propriedade com o tempo.

Para a realização de um experimento que simulasse um aquecimento reversível, em oposição ao experimento anterior, e agora utilizando materiais alternativos, foi idealizado um sistema capaz de aquecer uma amostra de água destilada de maneira lenta e em etapas, intercaladas por períodos de tempo sem aquecimento, de modo que o equilíbrio térmico pudesse ser alcançado após cada incremento na energia fornecida à amostra.

Para construir tal sistema, foram utilizados materiais reciclados/de fácil acesso e outros materiais e equipamentos, a saber: 1 caixa retangular de isopor de 2 L, com tampa; 1 copo de alumínio, 1 aquecedor elétrico de 500 W de potência (também conhecido como aquecedor mergulhão, ebulidor, entre outros), 2 termômetros digitais do tipo espeto, espeto de churrasco para melhor fixação de alguns componentes, fios de cobre para as conexões elétricas, 1 interruptor e tomada de 2 pinos (macho). Os componentes descritos podem ser observados na Figura 4 a seguir:

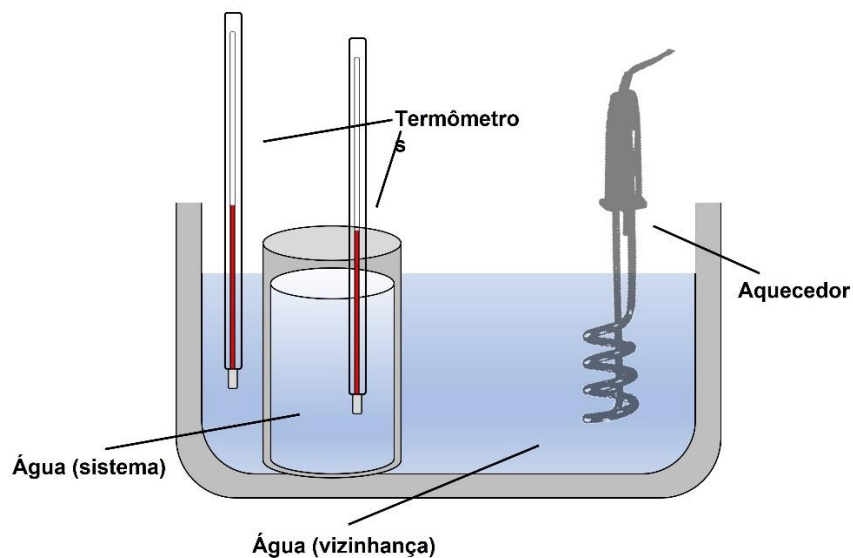
**Figura 4.** Materiais utilizados na produção do experimento que simula um aquecimento reversível



**Fonte:** autoria própria, 2022

Na tampa da caixa de isopor foram feitos 3 furos, onde o distanciamento e a posição de cada um formam um triângulo, 1 furo em dois cantos da caixa e o terceiro furo no meio da tampa. Nos furos feitos nas duas extremidades da tampa foram adaptados o aquecedor em um e um dos termômetros no outro; no furo do meio foi adaptado o segundo termômetro, todos a um distanciamento médio das paredes e do fundo da caixa. O espeto de bambu passa pelo mesmo furo do aquecedor para garantir que o fio da mesma não se mova quando for ligada. Uma representação esquemática do sistema desejado está ilustrada na Figura 5.

**Figura 5.** Representação do aparato desenvolvido para a realização de aquecimento reversível



**Fonte:** autoria própria, 2022.

Para realizar um aquecimento reversível, é necessário que energia entre no sistema através da vizinhança de maneira extremamente lenta e, a cada momento seja atingido um equilíbrio térmico (igualdade de temperaturas) entre a vizinhança e o sistema. Do ponto de vista experimental, este procedimento deveria ocorrer da seguinte forma: uma quantidade de energia na forma de calor  $dq$  (quantidade infinitesimal, 0,000...0001 Joule) entraria no sistema, e esse teria todo o tempo necessário para entrar em equilíbrio térmico com a vizinhança (que acaba de ceder a quantidade de energia  $-dq$ ). Observa-se que o processo reversível é conduzido de maneira absolutamente impraticável, pois demandaria infinitos passos infinitesimais e, conseqüentemente, um tempo infinito.

Deixando claro para os possíveis estudantes as limitações indicadas, o experimento sugerido aqui trata-se de uma aproximação, uma visão qualitativa de como se dá o processo reversível. No aparato desenvolvido pretende-se realizar o aquecimento gradual da vizinhança (água) utilizando o aquecedor elétrico; esta vizinhança em temperatura mais alta transferirá energia na forma de calor para o sistema que é realmente o objeto do aquecimento, a água no interior do copo de alumínio. De certo modo, pretende-se apresentar um banho-maria extremamente lento.

Dada a potência do aquecedor, utilizá-lo de maneira contínua faz com que a água circundante ao copo entre em ebulição rapidamente (aproximadamente 2 min). Sendo assim, fez-se necessário regular a transferência de energia de modo a torná-la alternada. Para tanto, foi construído um circuito elétrico simples no qual existe um interruptor, e o usuário realiza o controle da passagem de corrente elétrica ligando e desligando o circuito no intervalo de tempo desejado (para um aquecimento reversível “autêntico” o circuito deveria ser ligado por  $dt$  segundos).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 A Equivalência Calor e Trabalho

O aparato construído para a recriação alternativa do experimento de Joule pode ser observado na Figura 6 abaixo:

**Figura 6.** Aparato para a realização do experimento de Joule adaptado



**Fonte:** autoria própria, 2022

No primeiro experimento de teste foi adicionado ao pote 200 ml de água de torneira. Em seguida o pote foi fechado com sua tampa, já com o motor e o termômetro devidamente instalados. Com o pote já fechado foi observada a temperatura inicial da água, 22,9°C. Foi possível notar a variação de temperatura em menos de 1 minuto. O teste durou 10 minutos, durante esse tempo foi observada a variação de 22,9°C para 24,2°C, uma variação que comprova a possibilidade de demonstrar de forma prática a equivalência entre calor e trabalho, assim como o experimento de Joule.

Na sequência, o experimento foi repetido nas condições testadas inicialmente. A temperatura inicial da amostra de água foi de 22,9°C. Com o auxílio de um cronômetro o tempo de realização do experimento foi registrado. Foi observada a variação de temperatura por 16 minutos e anotado o tempo que foi necessário para observar cada variação de 0,1°C. Os resultados são apresentados na Tabela 1 a seguir:

**Tabela 1.** Temperatura e tempo decorrido após início do experimento de equivalência calor-trabalho.

<b>Tempo (min:s)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>Tempo Inicial 00:00</b>	<b>Temperatura Inicial 22,9</b>
01:05	23,0
01:50	23,1
02:40	23,2
04:30	23,3
05:35	23,4
06:50	23,5
09:30	23,6
10:26	23,7
13:56	23,8
15:06	23,9

**Fonte:** autoria própria, 2022.

Pode-se observar da Tabela 1 que ocorreu uma variação de temperatura de 1°C na amostra de água em aproximadamente 15 minutos de funcionamento do sistema. A elevação de temperatura observada ocorre devido ao movimento da hélice em contato com a amostra de água, o que faz com que as moléculas de água se movam e transladam entre si, aumentando a agitação molecular e, conseqüentemente, a temperatura. É possível ainda estimar a quantidade de energia utilizada para o aquecimento da amostra de água, adotando algumas aproximações, como assumir que o calor específico da água ( $c$ ) é constante e igual a 1,00 cal/g°C e a densidade da água ( $d = m/V$ , em que  $m$  é a massa e  $V$  é o volume) é constante e igual a 1,00 g/mL (na realidade, ambas propriedades dependem da temperatura bem como são afetadas pela presença de sais dissolvidos). Considerando estas aproximações:

$$q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$q = d \cdot V \cdot c \cdot \Delta T$$

$$q = 1,00 \text{ g mL}^{-1} \cdot 200 \text{ mL} \cdot 1,00 \text{ cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = 200,0 \text{ cal} = 836,8 \text{ J}$$

Por sua vez, podemos calcular a quantidade de energia elétrica que foi transferida para o sistema a partir de:

$$P = U \cdot I$$

em que  $P$  é a potência,  $U$  é a diferença de potencial e  $I$  é a corrente elétrica (os dois últimos são registrados na fonte de alimentação). Multiplicando pelo tempo  $t$  em ambos os lados da equação tem-se:

$$P \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

$$Energia = 8,5 V \cdot 0,33 A \cdot 906 s$$

$$Energia = 2.541,33 J$$

Nota-se então que de 2.541,3 J “disponíveis” de energia, apenas 836,8 J são utilizados para o aquecimento da amostra de água. O restante da energia é dispersa na forma de calor através dos demais componentes eletrônicos (razão pela qual o motor aquece).

## 5.2 Processos Reversíveis e Irreversíveis

Iniciou-se a discussão tratando do aquecimento “convencional”, que é do tipo irreversível, mediante aplicação da chama de um bico de Bunsen (ver Figura 3). Inicialmente, observou-se a temperatura constante e igual à temperatura ambiente nos 3 termômetros como sendo 30°C. O bécquer foi então submetido a aquecimento utilizando o bico de Bunsen. O aquecimento foi realizado durante 10 minutos, em que foram observadas as temperaturas aferidas em cada termômetro. Ao observar este experimento tão simplificado foi possível evidenciar a dificuldade em assinalar uma única temperatura ao sistema em aquecimento (água destilada), uma vez que durante todo o processo há uma variação contínua em T (energia segue sendo transferida continuamente para o sistema a partir do bico de Bunsen).

Com relação às variações de temperatura registradas em cada termômetro observou-se que estas são sutis, dada a eficiência na transferência de energia na forma de calor através das correntes de convecção no líquido. Assim sendo, as diferenças visualmente detectáveis considerando os termômetros utilizados jamais superou 1°C. Curiosamente, examinou-se que, após o aquecimento, os termômetros 2 e 3 apresentaram temperaturas de 59°C enquanto o termômetro 1, temperatura de 58°C, mesmo estando mais próximo da fonte de energia.

Novamente é importante ressaltar que a irreversibilidade deste aquecimento reside no fato de que não é possível assinalar uma temperatura unicamente definida para o sistema, além de que uma redução infinitesimal na temperatura da vizinhança (a chama do bico de Bunsen) de forma alguma causaria uma redução da temperatura da água.

Para a sugestão de experimento didático simulando um aquecimento reversível aproximado foi utilizado um copo de alumínio de 500 mL contendo água em seu interior. O copo permaneceu posicionado no interior de uma caixa retangular de isopor (material isolante térmico) que também foi preenchida com água. O nível de água ficou o mesmo para o copo e para a caixa de isopor. Essa montagem justifica-se dada a necessidade de um aquecimento lento, do tipo banho-Maria, que deve ser realizado na água que compõe a vizinhança do copo, e a caixa de isopor atua como uma parede adiabática aproximada, a fim de que energia não entre



ou deixe o sistema na forma de calor, promovendo o equilíbrio térmico necessário à reversibilidade. O aparato finalizado, com a caixa de isopor fechada, os termômetros posicionados na porção de água no interior do copo de alumínio e na água que compõe a vizinhança, além do aquecedor podem ser observados na Figura 7 a seguir.

**Figura 7.** Aparato desenvolvido para demonstração de um aquecimento reversível aproximado



**Fonte:** autoria própria, 2022.

O sistema foi conectado na tomada, e o circuito com interruptor foi utilizado para controlar o processo de aquecimento realizado pelo aquecedor. O aquecedor, ao ser ligado, eleva a temperatura da água na vizinhança do copo de alumínio. Devido à diferença de temperatura, a energia fluirá para o copo de alumínio e conseqüentemente para a amostra de água a ser aquecida reversivelmente. Com o circuito preparado foi possível manter o aquecedor em funcionamento por intervalos de tempo regulares. A contagem do tempo foi realizada com o auxílio de um cronômetro e, neste ponto, vale destacar uma importante fonte de erro na medição que é o tempo de resposta do operador do equipamento.

O primeiro experimento realizado consistiu em ligar a resistência por 5 segundos e observar a temperatura em que o sistema entraria em equilíbrio térmico (igualdade das temperaturas entre a vizinhança e interior do copo de alumínio), levando em consideração o tempo necessário para atingir o equilíbrio em cada estágio. Antes de ligar o sistema a temperatura inicial da água no copo de alumínio era de 25,4°C. Os resultados do experimento podem ser conferidos na Tabela 2 abaixo:

**Tabela 2.** Temperatura de equilíbrio, variação na temperatura e tempo decorrido para o equilíbrio térmico ser observado acionando o aquecedor por 5 s.

Intervalos de 5 s	Temperatura de equilíbrio (°C)	Aumento da temperatura (°C)	Tempo para o equilíbrio (min)
	25,4 (temp. inicial)	--	--
I	26,2	0,8	38,5
II	26,8	0,6	11,0
III	27,6	0,8	18,1
IV	27,8	0,2	20,0
V	28,5	0,7	11,1
VI	29,2	0,7	20,5

Fonte: autoria própria, 2022

Pode-se observar, a partir dos dados da tabela anterior, que o aquecimento ocorre de maneira bastante lenta, pois um aumento de 3,8°C na temperatura foi obtido após aproximadamente 2 horas do início do ensaio. Uma das dificuldades apresentadas durante a realização do experimento foi a homogeneização da água aquecida pelo aquecedor, pois com o sistema fechado torna-se difícil garantir uma mistura homogênea da água em pouco tempo, o que poderia justificar algumas discrepâncias observadas nos tempos para o equilíbrio ser alcançado.

Na sequência, realizou-se o ensaio reduzindo o tempo em que o aquecedor era mantido em funcionamento, agora por 3 segundos e, mais uma vez, registrou-se a temperatura de equilíbrio e o tempo decorrido para o alcance do equilíbrio térmico em cada intervalo. Nesse ensaio, a temperatura inicial da água era de 23,6°C. Os dados estão apresentados na Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3.** Temperatura de equilíbrio, variação na temperatura e tempo decorrido para o equilíbrio térmico ser observado acionando o aquecedor por 3 s.

Intervalos de 3 s	Temperatura de equilíbrio (°C)	Aumento da temperatura (°C)	Tempo para o equilíbrio (min)
	23,6 (temp. inicial)	--	--
I	24,2	0,6	10,5
II	24,8	0,6	13,5
III	25,3	0,5	14,0
IV	25,7	0,4	14,0
V	26,3	0,6	14,0
VI	26,9	0,6	7,5

Fonte: autoria própria, 2022

O segundo ensaio mostrou-se mais coeso considerando os dados apresentados na Tabela 3, e foi registrado um aumento de  $3,3^{\circ}\text{C}$  na temperatura em aproximadamente 1 hora de realização do experimento. Fica claro ao observar os dois ensaios que o maior entrave na aplicação deste experimento é o tempo que deve ser dedicado apenas à espera do equilíbrio térmico que deve estar caracterizado em cada etapa.

O processo de aquecimento reversível utilizando como base o aparato construído aqui envolveria manter o aquecedor ligado um tempo cada vez menor, 2 s, 1 s e no limite, um intervalo de tempo  $dt$ . Contudo, para fins de uma demonstração quantitativa, o experimento idealizado neste trabalho pode auxiliar no entendimento da diferenciação entre processos irreversíveis e reversíveis tanto no contexto da termodinâmica em si quanto na comparação com o significado dos termos na linguagem cotidiana.

## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram propostos dois experimentos didáticos visando a possibilidade de ilustrar e aprofundar a discussão de tópicos centrais na Termodinâmica Química: a energia (por meio da equivalência entre calor e trabalho) e os processos reversíveis e irreversíveis.

Os experimentos propostos buscaram utilizar as vantagens do processo de ensino através da experimentação, neste caso de cunho demonstrativo, e utilizando materiais alternativos, para ilustrar os conceitos citados anteriormente.

A equivalência entre calor e trabalho, demonstrada por James Prescott Joule utilizando um sistema de pás giratórias, massas e polias foi adaptado aqui à partir do uso de um motor elétrico de corrente contínua reutilizado. O motor foi conectado a uma pequena engrenagem plástica adaptada, a fim de simular o sistema giratório em contato com uma amostra de água. Foi possível elevar a temperatura de 200 mL de água mantida em um recipiente aproximadamente isolado em 1°C após cerca de 15 minutos. Ao realizar esse experimento foi comprovado a possibilidade de converter movimento (trabalho mecânico) em energia térmica, concluindo que o calor e o trabalho são na verdade aspectos da mesma propriedade fundamental, a energia.

Foram realizados dois ensaios, em que o aquecedor foi ligado utilizados 6 intervalos de tempo de aquecimento, 5 s e 3 s, respectivamente. Em cada caso aguardou-se a elevação de 1°C na temperatura da água, fato ocorrido em cerca de 2 horas no primeiro ensaio e 1 hora no segundo. Pode-se concluir que quanto menor o tempo que o aquecedor passa ligado menos tempo é necessário ficar desligado para alcançar o equilíbrio. Ou seja, o aquecimento reversível será mais eficiente se aumentarmos a quantidade de períodos intercalados, pois o equilíbrio será alcançado de forma rápida e uma nova quantidade de energia na forma de calor será aplicada.

Embora esse experimento apresente um forte caráter qualitativo, pode ser utilizado para demonstrar a diferenciação entre processos irreversíveis e reversíveis no contexto da Termodinâmica Química, além de confrontar o significado dos termos em comparação com a linguagem cotidiana.

Neste trabalho foram elaborados experimentos que podem ser utilizados nas aulas de Química e Física para explicar conceitos que para muitos alunos podem ser difíceis de entender quando explicados apenas na teoria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINS, P.; PAULA, J. DE; **Physical Chemistry**. 9. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2010.
- BALL, D. W. **Físico-Química**. 1. ed. São Paulo: Pioneira, 2005.
- CASTELLAN, G. W. **Physical Chemistry**. 3. ed. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
- FERREIRA, A. B. DE H. **Mini Aurélio: o dicionário da língua portuguesa**. Curitiba: Positivo, 2010.
- GONÇALVES, R. P. N., GOI, M. E. J. Experimentação no Ensino de Química na Educação Básica: Uma Revisão de Literatura. **Revista Debates Em Ensino De Química**, v. 6, n. 1, 136–152, 2021.
- HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- HOUAISS, A.; VILLAR, M. DE S. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. 1. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009.
- LEITE, B. S. A experimentação no ensino de química: uma análise das abordagens nos livros didáticos. **Educ. Quím**, Ciudad de México, v. 29, n. 3, p. 61-78, 2018.
- LEVINE, I. N. **Physical Chemistry**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- LINDEMANN, Renata Hernandez. **Ensino de Química em Escolas do Campo com Proposta Agroecológica: Contribuições a Partir da Perspectiva Freireana de Educação**. 2010. 339 p. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94552>. Acesso em: 22 fev. 2022.
- LOPES, A. R. C. Livros Didáticos: Obstáculos ao Aprendizado da Ciência Química I - Obstáculos Animistas e Realistas. **Química Nova**, v. 15, n. 3, p. 254–281, 1992.
- MACHADO, A. H.; MORTIMER, E. F. Química Para o Ensino Médio: Fundamentos, Pressupostos e o Fazer Cotidiano. In: ZANON, Z. B.; MALDANER, O. A. (Eds.). **Fundamentos e Propostas de Ensino de Química para a Educação Básica no Brasil**. Ijuí: Unijuí, 2012.
- MORTIMER, R. G. **Physical Chemistry**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2000.
- MOSCOVICI, S. **Representações Sociais: Investigação em Psicologia Social**. Petrópolis: Vozes, 2003.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

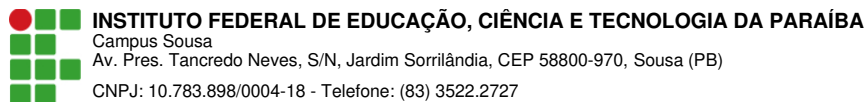
PASSOS, J. C. Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 3603–3608, 2009.

**QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 1995.

SANTOS, L. R. dos, MENEZES, J. A. de. A experimentação no ensino de Química: principais abordagens, problemas e desafios. **Revista Eletrônica Pesquiseduca**, v. 12, n. 26, p. 180–207, 2020.

SOUZA, R. S., SILVA, A. P. B. da, ARAÚJO, T. S. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: reproduzindo as dificuldades do laboratório. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 3, p. 3309–3319, 2014.

STADLER, J. P. et al. Análise de obstáculos epistemológicos em livros didáticos de química do ensino médio do PNLD 2012. **Holos**, v. 2, n. 28, p. 234–243, 2012.



## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Pdf TCC

**Assunto:** Pdf TCC  
**Assinado por:** Jose Fernandes  
**Tipo do Documento:** Anexo  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **José Teuvino Fernandes Cardoso, ALUNO (201818740012) DE LICENCIATURA EM QUÍMICA - SOUSA**, em 03/11/2022 21:28:10.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/11/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 663498  
Código de Autenticação: 5f76b7545c

