



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
CURSO DE QUÍMICA-LICENCIATURA

ÍTALO MACÊDO GONÇALVES

**POR QUE A DESORDEM? UMA REFLEXÃO SOBRE O CONCEITO DE
ENTROPIA EM UM CURSO SUPERIOR DE QUÍMICA**

Caruaru

2020

ÍTALO MACÊDO GONÇALVES

**POR QUE A DESORDEM? UMA REFLEXÃO SOBRE O CONCEITO DE
ENTROPIA EM UM CURSO SUPERIOR DE QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química-licenciatura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em química.

Área de concentração: Físico-química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Roberta Pereira Dias

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Paula de Souza de Freitas

Caruaru

2020

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Maria Regina Borba - CRB/4 - 2013

G635p

Gonçalves, Ítalo Macedo.

Por que a desordem? Uma reflexão sobre o conceito de entropia em um curso superior de química. / Ítalo Macedo Gonçalves. – 2020.

84 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Roberta Pereira Dias.

Coorientadora: Ana Paula de Souza de Freitas.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Química – Licenciatura, 2020.

Inclui Referências.

1. Química – Ensino superior – Metodologia. 2. Termodinâmica. 3. Entropia. 4. Conhecimento e aprendizagem. I. Dias, Roberta Pereira (Orientadora). II. Freitas, Ana Paula de Souza de (Coorientadora). III. Título.

CDD 371.12 (23. ed.)

UFPE (CAA 2020-150)

ÍTALO MACÊDO GONÇALVES

**POR QUE A DESORDEM? UMA REFLEXÃO SOBRE O CONCEITO DE
ENTROPIA EM UM CURSO SUPERIOR DE QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química-licenciatura da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em química.

Aprovada em: 01/12/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Roberta Pereira Dias (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. João Roberto Ratis Tenório da Silva
(Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Juliana Angeiras Batista da Silva
(Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais Ivonaldo Gonçalves de Melo e Rosario Daniela Macêdo Gonçalves.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais pelo incentivo e apoio nos estudos desde muito cedo. Agradeço também ao meu irmão, Igor, antigo estudante do campus, que por possuir maior maturidade na carreira acadêmica, e por ser um brilhante físico, sempre me incentivou e tirou dúvidas em momentos de incertezas e dificuldades.

Não menos importante, também gostaria de agradecer aos meus colegas de universidade, minha namorada, meus familiares e todos(as) os(as) professores(as) da Universidade que foram grandes mestres e por muitas vezes inspiradores nessa jornada de quase 5 anos e meio.

Gostaria também de mencionar a Profa. Dra. Jane Maria Gonçalves Laranjeira por ser minha primeira docente na instituição e abrir meus olhos, mesmo que indiretamente, para as demandas e dificuldades que estavam por vir. Agradeço também a Profa. Dra. Flavia C.G. Catunda de Vasconcelos por ter sido minha orientadora no Programa de Residência Pedagógica, extremamente relevante para a minha formação docente.

Não poderia deixar de agradecer a queridíssima Profa. Dra. Ana Paula de Souza de Freitas, que além de ter sido minha orientadora no PIBID, foi a docente que eu mais acompanhei em disciplinas cursadas, com muito prazer. Obrigado por ter sido minha coorientadora e proporcionar excelentes momentos de discussão, aprendizado e acima de tudo motivação, para me tornar um profissional tão bom, quanto você.

Por fim, não poderia deixar de destacar uma pessoa excepcional, minha orientadora, Profa. Dra. Roberta Pereira Dias. Agradeço por aceitar me ter como orientando e oportunizar momentos incríveis de risos e descontração, discussões, aprendizado e incentivo na carreira acadêmica. Se eu for a metade do profissional que essa mulher é, já está ótimo.

Enfim. Obrigado a todos, vocês são demais! *Virtus Impavida!*

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo investigar como as concepções alternativas dos licenciandos, que cursam a disciplina de Físico Química I do curso de Química Licenciatura do Campus do Agreste – UFPE, acerca do nível microscópico da matéria podem influenciar no seu entendimento sobre o conceito de entropia. Para tanto, procedeu-se o levantamento bibliográfico de trabalhos de conclusão de curso do campus que abordassem o conceito, em seguida realizou-se uma investigação sobre as concepções alternativas dos discentes sobre entropia, para isso utilizou-se dois questionários, o primeiro os alunos responderam antes de estudar o conceito na disciplina de Físico-química I e o segundo após terem estudado. Os resultados obtidos a partir da pesquisa bibliográfica mostraram que existe uma escassez de pesquisas sobre a temática e que grande parte dos alunos continuam a associar o conceito de entropia ao termo desordem mesmo após cursarem a disciplina. Com relação a investigação sobre as concepções dos alunos percebeu-se que a utilização de analogias envolvendo objetos macroscópicos apenas reforça a ideia da entropia em termos da desordem, fazendo com que os alunos adquiram uma concepção equivocada sobre o conceito. Além disso, a cada 4 alunos cerca de 3 alunos não conseguem relacionar o conceito de entropia com o nível microscópico da matéria, visto que, não compreendem o conceito de microestado e a grande maioria não faz associação com os níveis de energia, fatores que são essenciais para a construção do conceito de entropia sob a ótica da termodinâmica estatística, mesmo após terem cursado a disciplina de Físico-química I. Nesse sentido, uma estratégia que pode auxiliar no processo de ensino-aprendizagem do conceito é utilizar de alguns recursos didáticos disponíveis na literatura que abordam o conceito sob o ponto de vista da termodinâmica estatística, destacando pontos essenciais como microestados, níveis de energia e distribuição estatística. A partir desses recursos, elaborou-se uma sequência didática visando oferecer um suporte na construção de um modelo conceitual de entropia condizente com o que é exigido pela comunidade científica.

Palavras-chave: Concepções. Termodinâmica. Entropia.

ABSTRACT

The present work aimed to investigate how the alternative conceptions of the undergraduate students, who are studying Physics Chemistry I in the Chemistry Degree course at Campus do Agreste - UFPE, about the microscopic level of the matter may not lead to their understanding of the concept of entropy. To do so, a bibliographic survey of the course completion works on the campus that addressed the concept was carried out, followed by an investigation of the students' alternative conceptions about entropy, for this purpose two questionnaires were used, the first the students results before studying the concept in Physics-Chemistry I and the second after studying. The results obtained from the bibliographic research showed that there is a scarcity of research on the subject and that a large part of the students continues to associate the concept of entropy with the term disorder even after attending the discipline. Concerning investigation about students' conceptions, realized which the use of analogies involving macroscopic objects only reinforces the idea of entropy in terms of disorder, making students acquire a misconception about the concept. Besides, for every 4 students about 3 students are unable to relate the concept of entropy to the microscopic level of the matter, since they do not understand the concept of microstate and the vast majority do not associate with energy levels, factors that are essential for the construction of the concept of entropy from the perspective of thermodynamic statistics, even after having studied Physics-Chemistry I. In this sense, a strategy that can assist in the teaching-learning process of the concept is to use some didactic resources available in literature that approach the concept from the point of view of thermodynamic statistics, highlighting essential points such as microstates, energy levels, and statistical distribution. From these resources, a didactic sequence was elaborated, aiming to offer support in the construction of a conceptual model of entropy consistent with what is required by the scientific community.

Keywords: Conceptions. Thermodynamics. Entropy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Energia média entre os estados de energia em função da temperatura e sua implicação na população	27
Figura 2 –	A) Níveis de energia igualmente espaçados para o cálculo da função de partição. B) Populações dos níveis de energia de um sistema genérico, em diferentes temperaturas	28
Figura 3 –	Representação de pontos para um modelo de sistemas com $E = 5$ e $N=2-5$	29
Figura 4 –	Espaço do vetor próprio (o_1, o_2, o_3) do sistema de quatro macroestados para $q = 4$. Cada ponto que representa um microestado é colorido de acordo com o vértice do quadril simplex mais próximo, definindo assim os quatro Macroestados	30
Figura 5 –	Micro e macroestados do sistema de quatro macroestados em seu espaço de estado original. As linhas indicam a partição em microestados, enquanto os pontos de dados coloridos mostram a atribuição de microestados aos quatro macroestados da Figura 4	31
Figura 6 –	A) Diferentes possibilidades para o valor obtido para a soma jogando-se dois dados. B) Possíveis resultados de jogo com os dois dados	32
Figura 7 –	A) O aparato e B) seus componentes	32
Figura 8 –	Triângulo da química	34
Figura 9 –	Questão 4 da atividade avaliativa da turma de Físico-química I do semestre Letivo 2016.2	45
Figura 10 –	Exemplo de resposta considerada incorreta para a questão 4	45
Figura 11 –	Exemplos de respostas consideradas incorretas dos alunos D_{T7} (acima) e D_{N2} (abaixo) para a questão 5	58
Figura 12 –	Exemplo de resposta considerada correta para a questão 6	60
Figura 13 –	Distribuição de partículas em estados de energia para $N = 3$ e $E = 3$	63
Figura 14 –	A) Configuração padrão. O gás ocupa um volume de 5 bolas, na parte superior da mangueira e B) uma possível configuração	65
Figura 15 –	Macroestado mais provável e microestados menos prováveis para o lançamento de dois dados	68
Figura 16 –	Distribuição das moléculas (esferas azuis) em diferentes níveis de energia	69
Figura 17 –	Quatro possíveis microestados que levam à energia total de -100 J	70
Figura 18 –	“Entropiômetro” e algumas maneiras de organizar as moléculas de modo a	

obter a energia total de -130 kJ utilizando 5 níveis (acima, G1) e 8 níveis
(abaixo, G2) 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos de conclusão de curso encontrados a partir da Pesquisa Bibliográfica realizada no CA-UFPE	42
Tabela 2 – Publicações encontradas na literatura que apresentam recursos didáticos que podem ser utilizados em uma abordagem voltada para a termodinâmica Estatística	62
Tabela 3 – Apresentação de apenas alguns dos microestados possíveis	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Análise de Conteúdo
CA	Campus Agreste
D _T 1	Discente da turma da tarde 1 (numeração de 1 a 9)
D _N 1	Discente da turma da noite 1 (numeração de 1 a 10)
<i>et al.</i>	e outro
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
MADE	Modelo de Análise Didática de Erros
P _T	Professora da turma da tarde
P _N	Professora da turma da noite
P1	Publicação 1 (numeração de 1 a 4)
T1	Trabalho de conclusão de curso 1 (numeração de 1 a 2)
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	MODELOS E ANALOGIAS NO ENSINO DE QUÍMICA	17
3.2	ASPECTOS HISTÓRICOS E CONCEITUAIS DA ENTROPIA	19
3.3	A ENTROPIA ESTATÍSTICA E A ANÁLISE COMBINATÓRIA.....	22
3.4	CONCEPÇÕES ALTERNATIVAS DOS ALUNOS SOBRE A ENTROPIA.....	33
4	METODOLOGIA	38
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	38
4.2	SUJEITOS E CAMPO DE PESQUISA	38
4.3	COLETA DE DADOS	38
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DOS TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO QUE ABORDAM A ENTROPIA NO CONTEXTO DA UFPE – CAMPUS AGRESTE	42
5.2	INVESTIGAÇÃO DAS CONCEPÇÕES PRÉVIAS DOS ALUNOS A PARTIR DA ANÁLISE DO PRIMEIRO QUESTIONÁRIO	47
5.3	ANÁLISE DAS MUDANÇAS DE CONCEPÇÕES DOS ALUNOS APÓS TEREM ESTUDADO O CONCEITO EM SALA DE AULA A PARTIR DO SEGUNDO QUESTIONÁRIO	51
5.4	RECURSOS DIDÁTICOS COMO POTENCIAIS MINIMIZADORES DAS DIFICULDADES DE APRENDIZAGEM APRESENTADAS PELOS ALUNOS	62
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO ACERCA DAS CONCEPÇÕES PRÉVIAS DOS DISCENTES	77
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 2	78
	APÊNDICE C – SEQUÊNCIA DIDÁTICA	80

1 INTRODUÇÃO

A ciência química de maneira geral é considerada abstrata, pois abrange inúmeros fenômenos relacionados tanto aos aspectos macroscópicos quanto microscópicos (atômico-molecular) da matéria, que necessitam de uma interpretação subjetiva dos indivíduos na tentativa de significar e formular conceitos essenciais para o seu entendimento.

Neste sentido, tem havido estudos que exploram a compreensão dos alunos sobre diferentes tópicos da ciência em diferentes níveis do sistema educacional e que mostram muitas incompatibilidades entre as concepções alternativas dos estudantes (muitas vezes incorretas), construídas a partir de seus próprios significados, e os conceitos cientificamente aceitos.

Carson e Watson (2004), por exemplo, destacam que para o conhecimento ser construído deve haver um processo de interação entre as concepções que já existem no aprendizado (memória) e um estímulo externo, em que nesse processo novas concepções podem ser criadas ou modificadas.

Além disso, a natureza abstrata da química, juntamente com outras dificuldades de aprendizagem dos conteúdos (por exemplo de natureza matemática) podem acarretar em dificuldades conceituais e proposições incoerentes com as aceitas pela comunidade científica (SIRHAN, 2007). É o que reforçam Bain *et al.* (2019, tradução nossa) que destacam a importância de, principalmente no nível universitário, integrar o raciocínio conceitual e o matemático durante a solução de problemas em contextos químicos, visto que a habilidade em matemática é um preditor de sucesso em química durante toda a jornada da graduação.

Um conceito relevante e muito importante para o entendimento de conhecimentos de química no ramo da físico-química, como por exemplo, compreender a espontaneidade de um processo, é a entropia. Na vivência da disciplina de Físico-química I constatou-se a partir de discussões em sala e conversas extraclasse com alunos de outros períodos, que muitos estudantes da graduação apresentam concepções equivocadas sobre a entropia, atribuindo a mesma a ideia de “desordem”. Após o término da disciplina, que contou com a colaboração de uma estudante do Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências e Matemática (PPGECM) da UFPE – Campus Agreste, que ministrou algumas aulas para seu projeto de pesquisa abordando o tema da entropia, não se percebeu uma mudança significativa acerca da concepção desses estudantes. Diante disso, buscou-se analisar a seguinte indagação: como as concepções dos licenciandos sobre o nível microscópico da matéria podem influenciar no entendimento sobre o conceito de entropia?

Supõe-se que mediante essas análises os equívocos conceituais sobre entropia podem estar ligados a fatores relacionados ao uso de livros didáticos de curso superior de química que trazem exemplificações e definições equivocadas sobre o conceito de entropia; analogias usadas por professores e alunos para se referir ao aumento ou diminuição da entropia, utilizando exemplos de fatos e/ou fenômenos do contexto desses indivíduos que remetem a “desordem” / “aleatoriedade” / “caos”, sejam relacionados a físico-química ou não, que reforçam os equívocos conceituais; e por fim, devido à falta de embasamento teórico dos discentes da graduação, pois muitos não estudaram o conceito de entropia no ensino médio, o que pode implicar em uma compreensão superficial sem o aprofundamento e formalismo matemático necessário para entendê-lo no nível microscópico, como o apresentado pelos fundamentos da termodinâmica estatística.

Com o intuito de responder a nossa questão de pesquisa, realizou-se uma pesquisa bibliográfica envolvendo uma busca por trabalhos de conclusão de curso de química e física licenciatura que abordassem os aspectos conceituais da entropia no contexto do Campus Agreste – UFPE. Além disso, investigou-se as concepções dos licenciandos acerca do nível microscópico da matéria e como elas influenciam no entendimento do conceito de entropia após eles cursarem a disciplina de Físico-química I, do curso de Química Licenciatura, propondo, por fim, uma sequência didática envolvendo alguns recursos didáticos disponíveis na literatura que podem ser utilizados como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem apresentadas.

Para tanto, alguns aspectos foram discutidos no referencial teórico envolvendo a utilização de modelos e analogias no ensino de química como ponte para o entendimento de conceitos, a abordagem de aspectos conceituais da entropia, trazendo o contexto histórico em que se desenvolveu o conceito e os estudos mais recentes no âmbito científico, além de uma discussão sobre a importância de um subsídio teórico de outras áreas do conhecimento para introduzir e fortalecer o conceito, tais como a física e a matemática, a partir dos fundamentos da mecânica estatística e da análise combinatória. Por fim, discute-se ainda as concepções alternativas dos alunos sobre o conceito de entropia e como recursos didáticos, se bem utilizados, podem propiciar um melhor entendimento sobre o conceito.

Com isso, a partir do conhecimento das concepções dos alunos e de como elas podem influenciar no entendimento do conceito de entropia, espera-se contribuir para que os professores possam escolher recursos didáticos que auxiliem na construção do conceito de entropia a partir de proposições metodológica eficientes que abordem o conceito de forma apropriada, com analogias coerentes, e introduzindo aspectos macroscópicos e microscópicos

da físico-química que fundamentam os estudos da termodinâmica clássica e estatística, favorecendo uma evolução conceitual dos alunos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar como as concepções alternativas dos licenciandos, que cursam a disciplina de Físico Química I do curso de Química Licenciatura do Campus do Agreste – UFPE, acerca do nível microscópico da matéria podem influenciar no seu entendimento sobre o conceito de entropia.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar se o conceito de entropia tem sido foco de investigações em trabalhos de conclusão de curso de química e física no Campus Agreste da UFPE;
- Analisar de que forma as concepções prévias dos discentes influenciam no entendimento do conceito de entropia a partir de aspectos físico-químicos a nível macroscópico e microscópico;
- Investigar publicações disponíveis na literatura que destacam o uso de recursos didáticos que tenham potencial para minimizar as dificuldades de aprendizagem identificadas, utilizando como suporte para a proposição de uma sequência didática.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Modelos e analogias no ensino de química

No ensino de química é importante que os professores se utilizem de práticas metodológicas que facilitem o processo de aprendizagem dos alunos, visto que, existem determinados conteúdos e conceitos atrelados a estes, que devido ao grau de abstração podem comprometer esse processo.

Portanto, a utilização de modelos pode ser uma ferramenta eficaz para a construção do conhecimento dos alunos. No âmbito científico podemos entender um modelo como sendo, de maneira geral, “uma representação parcial de uma entidade, elaborado com um, ou mais, objetivos(s) específico(s) e que pode ser modificado” (GILBERT; BOULTER; ELMER, 2000 apud JUSTI, 2010, p. 211).

Neste sentido, os modelos científicos podem auxiliar na interpretação e no entendimento de um determinado conceito ou fenômeno, como a entropia. No entanto, devido ao fato de serem complexos e/ou expressos em formas de representação complexas, como formulações matemáticas, é mais viável a utilização de modelos simplificados nas aulas de ciências, tais simplificações são chamadas de modelos curriculares (JUSTI, 2010).

Dito isso, para ajudar os estudantes no entendimento de algum aspecto de um modelo curricular é possível fazer uso de modelos de ensino. Conforme destaca Justi (2010, p. 217) “os mais comuns são modelos concretos (moleculares ou não), desenhos (de materiais, processos e modelos moleculares), gráficos, aos quais outros recursos (como cores e desenhos) são adicionados, diagramas, analogias e simulações”.

Nas discussões que envolvem o conceito de entropia é recorrente os professores fazerem o uso de diversas analogias na tentativa de facilitar o entendimento e explicar a ocorrência de fenômenos que representam o aumento ou diminuição da entropia de um sistema. De acordo com Justi e Mendonça (2008, p. 25)

As analogias são bastante utilizadas no ensino de ciências. Elas são apresentadas aos alunos pelos professores ou se encontram em livros didáticos apresentando função *explicativa*, isto é, apresentando uma explicação mais acessível ao aluno para algo de difícil compreensão [...] elas têm como função básica estabelecer um relacionamento entre similaridades de dois domínios, sendo que um dos domínios é familiar ao estudante (domínio da analogia), enquanto o outro não lhe é familiar (domínio do alvo) (CURTIS; REIGELUTH, 1984, apud JUSTI; MENDONÇA, 2008).

Contudo, Justi e Mendonça (2008) reiteram que a depender da maneira que as analogias são usadas elas podem trazer vantagens e desvantagens. Para isso utilizaram-se de

informações disponíveis na literatura (GLYNN *et al.*, 1989; DUIT, 1991; ORGILL; BODNER, 2004) para elencar as principais desvantagens do uso de analogias, que se relacionam:

Ao fato de poderem trazer uma informação irrelevante ao aluno, resultando em o mesmo continuar a não compreender o domínio-alvo; [...] à existência de domínios análogos que não sejam realmente familiares ao aluno ou que não existam na realidade; [...] ao fato de alunos recorrerem ao uso de analogias de forma mecânica, isto é, utilizando-as como sendo os próprios conceitos (JUSTI; MENDONÇA, 2008, p. 25).

Diante disso, é perceptível que as analogias trazidas por alguns professores e os próprios livros didáticos para abordar os aspectos conceituais atrelados ao conceito de entropia comprometem o entendimento por parte dos alunos. O modo como os livros didáticos trazem o conceito também influenciam muito, como pode ser visto nos trechos trazidos por Cavalcanti *et al.* (2018, p. 173) em uma análise sobre os livros didáticos introdutórios mais usados em química no ensino superior:

“De modo geral, a entropia de todo e qualquer sistema aumenta à medida que ele se torna mais aleatório ou espalhado” (BROWN *et al.*, 2016, p. 858).
 [...] a energia e a matéria tendem a ficar mais desordenadas” (ATKINS; JONES, 2012, p. 288).
 [...] veremos como usar a ideia do aumento da desordem para explicar qualquer mudança espontânea” (ATKINS; JONES, 2012, p. 288).
 “Entropia baixa significa pouca desordem e entropia alta significa muita desordem” (ATKINS; JONES, 2012, p. 288).
 “[...] os sistemas tendem a transformar-se em estados mais desordenados por causa de a probabilidade de tais estados ser maior do que a de um estado mais ordenado” (RUSSEL, 1994, p. 835).

É importante destacar que os livros citados por Cavalcanti *et al.* (2018) apresentam seções específicas que tratam o conceito de entropia a partir de uma abordagem molecular que explicita um entendimento baseado nos conceitos da termodinâmica estatística e de mecânica quântica, como será discutido brevemente no tópico seguinte.

Porém, essa impressão errônea costuma ser estendida a todos os tipos de coisas quando elas passam da ordem designada humanamente para o que é comumente considerado desordem: um grupo de bolas de gude para bolas de gude espalhadas, bolas de bilhar empilhadas em uma prateleira quebrada, grupos de papéis organizados para espalhados em um escritório (LAMBERT, 1999, tradução nossa). Dito isso, é necessário cuidado ao utilizar analogias que remetem a identificação de mudança na posição de um objeto macroscópico ou um grupo deles como uma forma de alteração de entropia:

Se alguém deseja substantiar uma afirmação ou um palpite de que algum processo específico envolve uma alteração da entropia termodinâmica ou estatística, deve-se perguntar se existe um efeito de calor reversível ou uma alteração no número de

microestados de energia acessível, referentes ao processo em questão. Caso contrário, não houve alteração da entropia física (mesmo que tenha havido alguma alteração em nossas “informações”) (DENBIGH, 1989, apud LAMBERT, 1999, p. 1385).

Acredita-se que essa dificuldade só será superada se os alunos entenderem a alteração na entropia de um sistema físico-químico em termos do aumento ou diminuição do número de microestados acessíveis. Por exemplo, utilizando uma analogia simples e coerente, podemos pensar em microestados como sendo uma maneira de organizar um número finito de livros semelhantes (partículas) em um determinado número de prateleiras horizontais de diferentes alturas (níveis de energia) em uma biblioteca. Os níveis de energia acessíveis seriam aqueles que podem ser alcançados por um bibliotecário dependendo da altura da prateleira ou da altura do bibliotecário, ou mesmo de um up na energia ou escada através do fornecimento de calor, por exemplo (KOZLIAK, 2004).

Portanto, é essencial para a compreensão desse conceito desmistificar a ideia de que a entropia se relaciona ao aumento ou diminuição da desordem de um sistema físico-químico, a partir da utilização de analogias coerentes, de fácil assimilação e que corroboram com fenômenos da realidade dos alunos, como a que foi descrita anteriormente. Para um melhor entendimento acerca do conceito de entropia é necessário perpassar pelos aspectos históricos e conceituais que levaram ao seu desenvolvimento sob o ponto de vista de abordagens distintas.

3.2 Aspectos históricos e conceituais da entropia

Conforme destaca Silva (2007) o conceito de entropia é de difícil compreensão, pois é multifacetado, visto que, há depender do contexto e da familiaridade, esse termo pode ser usado como um modelo metodológico para outras áreas do conhecimento, tais como a Biologia, a Economia, a Teoria da Informação, entre outras.

No entanto, existe uma diferenciação muito grande quanto ao significado da entropia nas diferentes áreas do conhecimento. No âmbito da físico-química, o processo de construção do conceito de entropia foi árduo e duradouro, tendo início nas experiências de Joule, as quais provaram que a energia mecânica se transformava quantitativamente em calor, colaborando para que a teoria da Termodinâmica tomasse forma no início do século XIX, com o surgimento das máquinas a vapor, durante a Revolução Industrial (MARSON, 1964; COVENEY; HIGHFIELD, 1993, apud COVOLAN; SILVA, 2005).

A termodinâmica consiste no estudo das transformações entre os diferentes tipos de energia em função das mudanças nas variáveis que definem um dado estado do sistema, e do efeito dessas mudanças nas vizinhanças, bem como nas relações existentes entre as várias propriedades dos sistemas em equilíbrio. É principalmente uma ciência experimental que começou a ser desenvolvida em 1800 e ainda é de grande valor prático em muitos campos como química, biologia, geologia, física e engenharia (MCQUARRIE; SIMON, 1997, tradução nossa).

É de conhecimento que durante o desenvolvimento da termodinâmica ainda não estava estabelecida nenhuma teoria atômica da matéria, visto que, a teoria atômica de John Dalton foi desenvolvida no século XIX. Portanto, as leis e resultados da termodinâmica não são baseados em qualquer teoria atômica ou molecular, eles são independentes de modelos atômicos e moleculares. O desenvolvimento da termodinâmica nesse contexto é conhecido como *termodinâmica clássica*. Neste sentido, ainda que os resultados da mecânica clássica não precisem ser modificados à medida que o conhecimento científico sobre a estrutura atômica e molecular evolua, a termodinâmica clássica fornece apenas uma visão limitada sobre o nível molecular da matéria (MCQUARRIE; SIMON, 1997, tradução nossa).

Nesse cenário, se desenvolveu a 1ª e a 2ª Leis da termodinâmica, que são leis empíricas formuladas com base na experimentação e observação do comportamento do sistema com relação as suas propriedades macroscópicas, ou seja, trata de sistemas que podemos ver, sentir, pensar e manipular com nossas mãos. Uma das formas de enunciar a Primeira Lei da Termodinâmica é a seguinte: em um sistema isolado, a energia total permanece constante, logo, a energia nunca é criada ou destruída apenas se transforma em outras formas de energia de forma constante, nos indicando se um processo físico-químico é ou não permitido (BALL, 2016).

A Segunda Lei da Termodinâmica nos ajuda a entender a tendência de um dado processo, ou seja, a espontaneidade dos processos físico-químicos, podendo ser expressa a partir da relação de Clausius descrita ainda nesta seção. De modo geral, considera-se que se ocorrer uma transformação espontânea, ou seja, a partir de um processo irreversível, em um sistema isolado, ela ocorre com um aumento concomitante da entropia do sistema, portanto, a entropia do universo tende sempre a aumentar (BALL, 2016).

Por fim, a Terceira Lei da Termodinâmica é abordada em termos da entropia absoluta, S , do sistema e o número de diferentes maneiras de arranjar as partículas do sistema, W . Essa proporcionalidade entre S e W é transformada em uma equação a partir da inserção da constante de Boltzmann:

$$S = k_B \ln W \quad (1)$$

Em linhas gerais, a Terceira Lei pode ser enunciada como segue: a entropia absoluta se aproxima de zero à medida que a temperatura absoluta se aproxima de zero para um sólido cristalino perfeito (BALL, 2016).

Após o surgimento das três leis, e a partir do desenvolvimento das teorias atômicas e moleculares no final do século XIX e início do século XX, a termodinâmica recebeu uma interpretação molecular ou base molecular. Este campo é chamado de *termodinâmica estatística*, pois relaciona médias de propriedades moleculares com propriedades termodinâmicas macroscópicas, como a temperatura e a pressão (MCQUARRIE; SIMON, 1997, tradução nossa e grifo nosso).

Grandes cientistas marcaram época propondo definições e princípios que regem os fundamentos da termodinâmica clássica e estatística, contribuindo significativamente para a evolução conceitual do termo entropia e a elaboração das três leis fundamentais da termodinâmica. Dentre estes pode-se destacar Rudolf Clausius (1822-1888) que do ponto de vista da termodinâmica foi o primeiro a utilizar o termo entropia, em 1865, para designar uma grandeza que aumenta com a dissipação do calor em uma máquina térmica de Carnot e atinge o seu valor mais alto quando todo potencial de realizar trabalho está esgotado (COVENEY; HIGHFIELD, 1991, apud COVOLAN; SILVA, 2005).

O mesmo propôs uma definição que é abordada de modo tradicional em cursos superiores, enfatizando o aspecto macroscópico da entropia (Equação 2).

$$dS = \frac{dq_{\text{reversível}}}{T} \quad (2)$$

em que dS é a variação infinitesimal da entropia, $dq_{\text{reversível}}$ é a variação infinitesimal do calor reversível e T é a temperatura em graus Kelvin. O uso dessa definição clássica para a resolução de problemas de físico-química de modo separado de uma consideração estatística moderna da entropia, pode provocar equívocos conceituais nos estudantes de graduação (KOZLIAK, 2004, tradução nossa).

Neste sentido, a proposição do uso de uma abordagem molecular, ainda que necessite de um rigor matemático e conceitual mais robusto, dará mais significado às interpretações dos fenômenos físico-químicos. Para isso, é possível utilizar-se da termodinâmica estatística,

baseando-se na proposição de um importante cientista da área, Ludwig Boltzmann (1844-1906) (KOZLIAK, 2004, tradução nossa).

Na sua interpretação, Boltzmann, em meados de 1866, introduziu a teoria das probabilidades e da entropia, admitindo que os sistemas moleculares possuem níveis ou estados de energia que comportam toda a distribuição de energia do sistema, em que os estados de maior entropia são os mais prováveis (GILBERT, 1982; SILVA, 1995, apud COVOLAN; SILVA, 2005).

A fórmula de Boltzmann baseada na estatística molecular, também utilizada para determinar a entropia, é expressa por

$$S = k_B \ln W$$

$$\Delta S = k_B \left(\ln \left(\frac{W_{final}}{W_{inicial}} \right) \right) \quad (3)$$

em que W é o número de microestados dentro do sistema, que é definido por Baierlein (1999, apud KOZLIAK, 2004, tradução nossa) como sendo o estado de um sistema no qual a posição e o momento de cada molécula e átomo são especificados em grande detalhe; e k_B é a constante de Boltzmann.

Um fato curioso e não menos importante, é que a origem do equívoco sobre o conceito de entropia ser associado ao termo desordem tem razão histórica. O próprio Ludwig Boltzmann, na publicação do seu artigo em 1898, intitulado “*Entropy as the measure of the disorder (Unordnung)* em *Lectures on Gas Theory, Part II*, foi quem primeiro relacionou a variação de entropia com o processo ordem-desordem (KOZLIAK; LAMBERT, 2005, grifo do autor e tradução nossa).

Dito isso, uma abordagem que contemple os aspectos da termodinâmica clássica e estatística pode ser efetiva para introduzir aspectos conceituais da entropia relacionados ao nível microscópico da matéria, integrando descrições sobre a dispersão de energia, níveis ou estados quânticos de energia de um átomo ou molécula, o número de microestados de um sistema, utilizando-se de outras áreas do conhecimento para facilitar o entendimento sobre o conceito, como a física e a matemática, a partir de abordagens do ponto de vista da mecânica estatística e da análise combinatória.

3.3 A entropia estatística e a análise combinatória

Do ponto de vista da termodinâmica estatística a entropia é um parâmetro termodinâmico que pode ser medido a partir de conhecimentos de estatística e termodinâmica. Diante disso, para uma discussão mais detalhada faz-se necessário abordar aspectos da termodinâmica estatística, que são fundamentais para uma consolidação do conceito de entropia, buscando para isso estabelecer uma correlação entre as propriedades moleculares e as propriedades termodinâmicas macroscópicas (ATKINS; PAULA, 2013).

É sabido que o conceito de entropia tratado sob o ponto de vista da termodinâmica clássica é uma abordagem meramente fenomenológica levando em consideração apenas os aspectos macroscópicos dos sistemas, deixando de lado considerações atreladas ao comportamento microscópico. Como já citado anteriormente, para analisar a entropia de um sistema é preciso levar em consideração a distribuição de energia entre os possíveis estados de energia do sistema molecular.

Nesse sentido, a maneira mais adequada para descrever a distribuição de energia consiste em fornecer a *população* de um estado, isto é, o número médio de moléculas que ocupam esse estado, ou seja, dizer que, em média n_i moléculas ocupam o estado de energia ϵ_i (ATKINS; PAULA, 2013).

Nesse cenário, surge como base para esta discussão as contribuições de Roger W. Kugel (Departamento de Química) e Paul A. Weiner (Departamento de Matemática e Estatística) da Universidade de Saint Mary em Minnesota – EUA, onde, em um artigo publicado no *Journal of Chemical Education*, em setembro de 2010, intitulado *Energy Distributions in Small Populations: Pascal versus Boltzmann*, tentam desmistificar a lei de distribuição de Boltzmann estudando inicialmente sistemas modelo com um pequeno número de partículas, N , com um número correspondentemente pequeno de unidades de energia, E , usando combinatória simples. Quando esses sistemas são estudados sistematicamente, um padrão remanescente do triângulo de Pascal emerge nas distribuições de probabilidade de energia previstas. Esse padrão pode ser representado por uma fórmula geral que se aproxima da lei de distribuição de Boltzmann para grandes valores de E e N (KUGEL; WEINER, 2010, tradução nossa).

A distribuição de Boltzmann é a base teórica da termodinâmica estatística e descreve como uma quantidade fixa de energia se distribui por uma coleção com um grande número de partículas. Para os autores é importante os estudantes de graduação em química compreenderem como a energia se distribui entre as moléculas em um sistema, porque essa distribuição determina muitos dos atributos macroscópicos de um sistema, incluindo suas

propriedades termodinâmicas, cinéticas e espectroscópicas (KUGEL; WEINER, 2010, tradução nossa).

Como mencionado no tópico anterior, Ludwig Boltzmann foi fundamental para o desenvolvimento da termodinâmica estatística e possibilitou uma descrição mais detalhada sobre os estados de um sistema físico-químico. Um trabalho publicado por ele em 1877, se não o mais importante, apresentou ao mundo sua famosa equação descrita na eq. (3). A partir dessa equação ele conseguiu integrar os conhecimentos de mecânica estatística e análise combinatória para mostrar a dependência da entropia em relação as possibilidades de ocupação dos microestados de um sistema (DAHMEN, 2006).

Conforme menciona Dahmen (2006, p. 287)

[...] Boltzmann mostrou que a entropia de um estado mede sua probabilidade e a entropia aumenta pois sistemas evoluem de estados menos para mais prováveis. [...] Boltzmann lançou-se à tarefa de determinar o número de maneiras de se distribuir N partículas por entre os níveis tais que w_0 tinha energia 0 , w_1 tinha energia ϵ , w_2 tinha energia 2ϵ , e assim por diante, até w_p . Este novo método combinatório de contagem do número de maneiras de se distribuir partículas por entre níveis evita completamente questões acerca das colisões das partículas e sua dinâmica.

Sabendo disso, Kugel e Weiner (2010, tradução nossa) analisam a situação a seguir: um sistema contendo um pequeno número, N , de partículas com uma energia total E que é distribuída sobre as N partículas. Se as partículas tiverem estados de energia integrais quantificados (degenerados) com níveis de energia dados por unidades $\epsilon_j = j$, a energia total, E , poderá ser distribuída discretamente sobre os estados de energia disponíveis. O nível mais baixo de energia é ϵ_0 , que possui 0 unidades de energia, e é chamado estado fundamental. O nível de energia mais alto possível de uma partícula nesse sistema é $\epsilon_E = E$. Uma distribuição de energia entre microestados pode ser descrita por $\Omega_i = n_{i0}, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{iE}$, em que n_{ij} é a população do j -ésimo estado na i -ésima distribuição. Para cada distribuição Ω_i , em um sistema, deve ser verdade que

$$\sum_j n_{ij} = N \quad (4)$$

e

$$\sum_j n_{ij} \epsilon_j = E \quad (5)$$

O peso estatístico, W_i , de uma distribuição fornece o número de maneiras distintas em que a distribuição pode ser alcançada pela troca de partículas entre os estados de energia. O peso estatístico da i -ésima distribuição pode ser calculado pela fórmula mostrada a seguir

$$W_i = \frac{N!}{\prod_j n_{ij}!} \quad (6)$$

A distribuição mais provável, aquela de maior peso estatístico, é a distribuição de Boltzmann:

$$\frac{N_i}{N} = \frac{e^{-\beta \varepsilon_i}}{\sum_i e^{-\beta \varepsilon_i}} \quad (7)$$

na qual $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_2 \dots$ e o parâmetro β determina a população mais provável dos estados do sistema em que

$$\beta = \frac{1}{k_B T} \quad (8)$$

na qual T é a temperatura termodinâmica e k_B é a constante de Boltzmann.

Esses problemas são tratados na literatura combinatória a partir da teoria das partições. Um ponto chave na termodinâmica estatística é reconhecer como as moléculas são distribuídas sobre esses estados de energia a uma dada temperatura e qual fração das moléculas se encontra no estado fundamental, no primeiro estado excitado - e assim por diante. Intuitivamente, sabe-se que a probabilidade de ocupação dos estados mais altos em energia aumenta com a temperatura (MCQUIRRIE; SIMON, 1997, tradução nossa).

A função de partição molecular vai fornecer o número de estados termicamente acessíveis para uma coleção de moléculas a uma temperatura T , consistindo de um somatório das contribuições dos estados vibracionais, rotacionais, translacionais e eletrônicos do sistema. Angeli *et al.* (2013, tradução nossa) destacam que a distribuição de Boltzmann desempenha um papel central nos cursos de termodinâmica estatística de nível universitário. Sua derivação depende do conjunto termodinâmico considerado e é, em geral, atingido maximizando o número de estados do sistema (a função Ω ou W).

É importante ressaltar que o uso termodinâmica estatística também permite a interpretação de calor de trabalho termodinâmico de forma muito natural. No currículo de

química, geralmente se supõe que o sistema em estudo tenha um conjunto de estados discretos (possivelmente em número infinito) e o caso de um contínuo de estados não é tratado tão claramente. Partindo dessa suposição, Angeli *et al.* (2013, tradução nossa) relatam que, para o conjunto estatístico canônico, o número fracionário de sistemas no i -ésimo estado, P_i , (também conhecido como população ou probabilidade de ocupação do i -ésimo estado) com energia ϵ_i é dada por

$$P_i = \frac{e^{-\beta\epsilon_i}}{Q} \quad (9)$$

em que

$$Q = \sum_j e^{-\beta\epsilon_j} \quad (10)$$

é a função de partição Canônica.

A função de partição canônica pode fornecer a partir do conhecimento dos estados quantidades da termodinâmica clássica (energia interna, U ; entalpia, H ; energia livre de Helmholtz, A ; energia livre de Gibbs, G ; entropia S ; pressão, p ; capacidade térmica a volume constante, C_v etc.), mostrando que o conhecimento de Q dá acesso a todas essas quantidades (ANGELI *et al.*, 2013, tradução nossa). Ainda, seguindo os autores é possível fazer o uso de P_i para fazer a interpretação da entropia de um sistema usando a equação

$$S = -k_B \sum_j P_j \log P_j \quad (11)$$

Diante disso, Angeli *et al.* (2013) propõem uma derivação matemática partindo da eq. (9) para analisar a variação da medida da dispersão de energia em torno de seu valor médio a partir de um estado i , com probabilidade de ocupação P_i . A derivação de P_i em função de T com volume constante é

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial P_i}{\partial T} \right)_v &= -k_B \beta^2 \left(\frac{\partial P_i}{\partial \beta} \right)_v \\ &= -k_B \beta^2 \left[-\frac{E_i e^{-\beta E_i}}{Q} - \frac{e^{-\beta E_i}}{Q^2} \left(\frac{\partial Q}{\partial \beta} \right)_v \right] \\ &= k_B \beta^2 P_i \left[E_i + \frac{1}{Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial \beta} \right)_v \right] \end{aligned} \quad (12)$$

A equação (12) pode ser simplificada lembrando que a energia média, $\langle E \rangle$, está relacionada a Q por

$$\langle E \rangle = -\frac{1}{Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial \beta} \right)_V \quad (13)$$

Substituindo a equação (13) na expressão da equação (12) temos uma nova expressão:

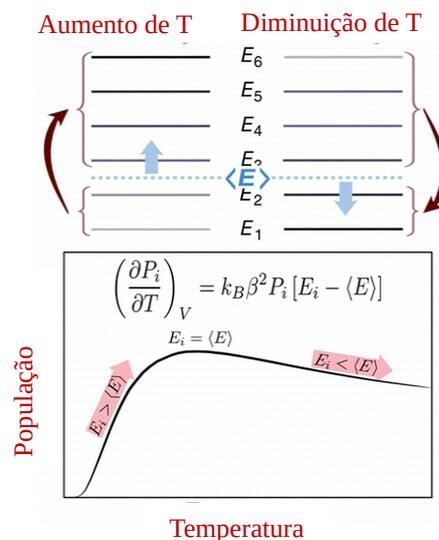
$$\left(\frac{\partial P_i}{\partial T} \right)_V = k_B \beta^2 P_i [E_i - \langle E \rangle] \quad (14)$$

A equação (13) é uma relação útil. De fato, identifica três situações diferentes:

- $E_i > \langle E \rangle$: $(\partial P_i / \partial T)_V$ é positivo e, portanto, P_i aumenta com T.
- $E_i = \langle E \rangle$: $(\partial P_i / \partial T)_V = 0$, então P_i é estacionário em relação a T e tem seu valor máximo.
- $E_i < \langle E \rangle$: a derivada $(\partial P_i / \partial T)_V$ é negativa e portanto, P_i diminui se T aumenta.

Essas considerações podem ser resumidas na Figura 1, que mostra o aumento da energia média entre os estados com o aumento ou diminuição de temperatura.

Figura 1. Energia média entre os estados de energia em função da temperatura e sua implicação na população.

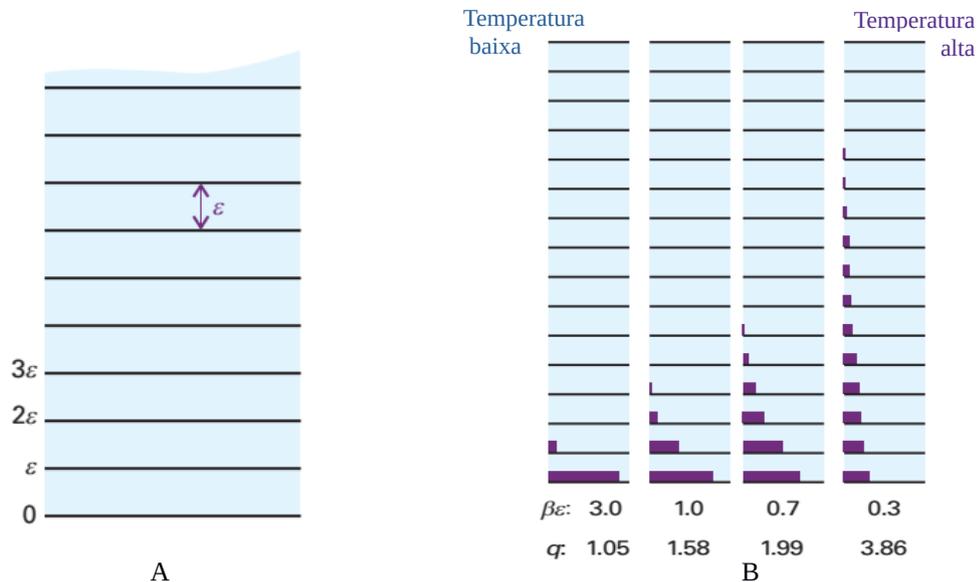


Fonte: Adaptado de Angeli *et al.* (2013).

Na Figura 2, à esquerda temos a representação dos níveis de energia, igualmente espaçados, para o cálculo da função de partição. A direita temos as populações dos mesmos

níveis de energia, em diferentes temperaturas, e os correspondentes valores da função de partição. Como se pode ver, o aumento da temperatura favorece a ocupação de estados de mais alta energia, que consiste na interpretação molecular de calor.

Figura 2. A) Níveis de energia igualmente espaçados para o cálculo da função de partição. B) Populações dos níveis de energia de um sistema genérico, em diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Atkins e Paula (2012).

Partindo disso, Kugel e Weiner (2010 apud ATKINS; PAULA, 2006, tradução nossa) propuseram uma representação de pontos, mostrado na Figura 3, para um modelo de sistemas que descreve a distribuição de energia de sistemas com poucas partículas. Na representação de pontos, os níveis de energia são representados como caixas dispostas verticalmente com as partículas representadas como pontos, •, nessas caixas. O número de partículas (pontos) no nível j é designado n_j e a energia de cada partícula no nível j é ϵ_j . O número total de partículas em uma distribuição permitida é $N = \sum n_j$ e a energia total é $E = \sum n_j \epsilon_j$. Várias distribuições diferentes, designada de Ω_i , são possíveis e cada uma pode ocorrer em um número de maneiras diferentes, designadas W_i , devido a troca de partículas.

Figura 3. Representação de pontos para um modelo de sistemas com $E = 5$ e $N=2-5$.

$E = 5, N = 2, W_{\text{total}} = 6$			
ϵ_j	Ω_1	Ω_2	Ω_3
5	•		
4		•	
3			•
2			•
1		•	
0	•		
W_i	2	2	2

$E = 5, N = 3, W_{\text{total}} = 21$					
ϵ_j	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5
5	•				
4		•			
3			•	•	
2			•		••
1		•		••	•
0	••	•	•		
W_i	3	6	6	3	3

$E = 5, N = 4, W_{\text{total}} = 56$						
ϵ_j	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6
5	•					
4		•				
3			•	•		
2			•		••	•
1		•		••	•	•••
0	•••	••	••	•	•	
W_i	4	12	12	12	12	4

$E = 5, N = 5, W_{\text{total}} = 126$							
ϵ_j	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6	Ω_7
5	•						
4		•					
3			•	•			
2			•		••	•	
1		•		••	•	•••	•••••
0	••••	•••	•••	••	••	•	
W_i	5	20	20	30	30	20	1

Fonte: Kugel e Weiner (2010).

O valor de W_{total} , ou seja, o somatório de todos os W_i , fornece o que pode ser entendido como o número de microestados, podendo a entropia de um sistema num estado definido ser relacionada ao que denomina-se de probabilidade deste estado (CASTELLAN, 2015). Como se pode ver, a utilização de um sistema de modelos é um método mais palpável para favorecer o entendimento de “[...] problemas de física estatística que envolvem contagens de microestados acessíveis de sistemas com poucas partículas que são úteis para a compreensão do conceito de entropia” (CARUZO; NEVES; TEIXEIRA, 2007, p. 11-12).

No entanto, essa construção pode ser comprometida caso os estudantes não consigam distinguir entre os macroestados e os microestados do sistema. Em termos da físico-química a definição dos estados observáveis de um sistema depende do nível ou da escala em que o sistema é considerado. Essa dependência de escala se reflete na distinção entre micro e macro

estados, referindo-se a níveis mais baixos e mais altos de descrição (ATMANSPACHER, 2016, tradução nossa).

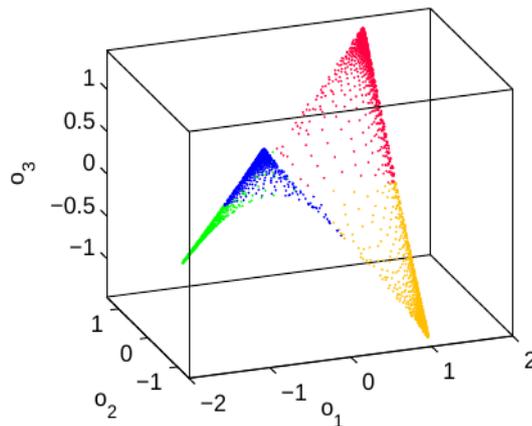
Segundo o autor, um exemplo para um observável associado ao estado estatístico de um sistema de muitas partículas é a sua energia cinética média. O valor esperado da energia cinética é definido como o limite do seu valor médio para N infinito. Considerando a falsa alegação de que a temperatura termodinâmica de um gás é idêntica à energia cinética média das moléculas que constituem o gás, é possível utilizar-se de uma “lei-ponte” para estabelecer uma relação entre a mecânica e a termodinâmica (de equilíbrio). Uma lei-ponte crucial a esse respeito, derivada primeiramente da distribuição canônica de Maxwell-Boltzmann de velocidades da teoria cinética dos gases em meados do século XIX, relaciona a temperatura T à energia cinética média, E_{kin} , das partículas de gás,

$$E_{kin} = \frac{3}{2} kT, \quad (15)$$

em que k é constante de Boltzmann.

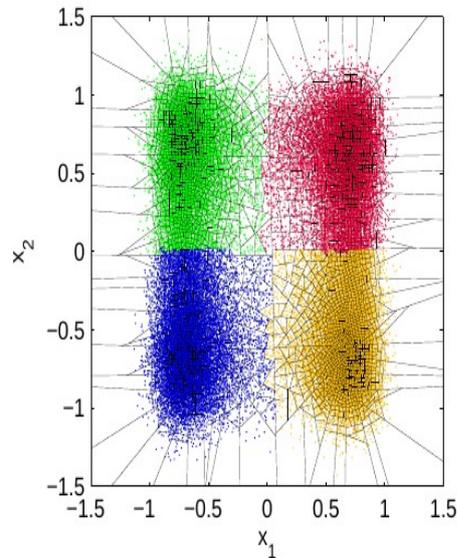
Nesse ponto de vista, a temperatura depende do contexto do equilíbrio térmico através da lei zero da termodinâmica, que não existe na mecânica estatística. Entretanto, estados de equilíbrio térmico podem estar relacionados a estados mecânicos estatísticos. Essa descrição, basicamente, objetiva mostrar que a temperatura é constituída a partir de um equilíbrio de macroestados que são especificados a partir das funções de partição de cada microestado do sistema, sendo resumido nas Figuras 4 e 5 a seguir. (HAAG *et al.*, 1974, KOSSAKOWSKI *et al.*, 1977, apud ATMANSPACHER, 2016, tradução nossa).

Figura 4. Espaço do vetor próprio (o_1, o_2, o_3) do sistema de quatro macroestados para $q = 4$. Cada ponto que representa um microestado é colorido de acordo com o vértice do quadril simplex mais próximo, definindo assim os quatro macroestados.



Fonte: Allfeld (2009, apud ATMANSPACHER, 2016, tradução nossa).

Figura 5. Micro e macroestados do sistema de quatro macroestados em seu espaço de estado original. As linhas indicam a partição em microestados, enquanto os pontos de dados coloridos mostram a atribuição de microestados aos quatro macroestados da Figura 4.



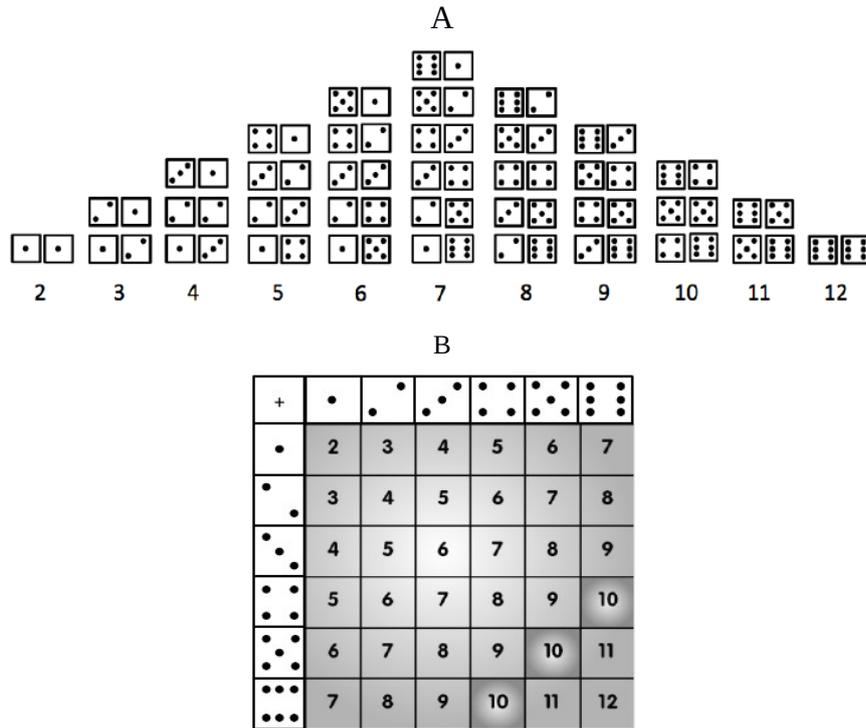
Fonte: Allfeld (2009, apud ATMANSPACHER, 2016, tradução nossa).

É possível correlacionar essa abordagem com uma analogia simples envolvendo a probabilidade de objetos comuns ao nosso cotidiano e uma interpretação probabilística e termodinâmica sobre o problema, como dois dados não-viciados. Diante disso, considere a seguinte situação

Com dois dados, o valor da soma das duas faces que caíram para cima variará de um mínimo de 2 (=1+1) até um máximo de 12 (=6+6): existirão 11 macroestados possíveis: 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12. Entretanto eles não serão equiprováveis. Para perceber isto em primeiro lugar é necessário perceber por meio de um diagrama em árvore que se no primeiro dado haverá 6 possibilidades, no segundo dado, para cada uma das 6 possibilidades anteriores haverá outras 6 possibilidades, e, portanto, existirão um total de 36 possibilidades de microestados (CARUZO; NEVES; TEIXEIRA, 2007, p. 11).

Conforme ilustra a Figura 6 os pares de dados representam os microestados e os números (somas) são os macroestados. Uma representação equivalente a figura 6, mostrando os 36 microestados possíveis e equiprováveis, etiquetados pelo macroestado correspondente. Nota-se novamente, que alguns macroestados aparecem mais frequentemente do que outros. Por exemplo, o macroestado correspondente à soma 7 é o mais provável, ou seja, o que aparece mais vezes, enquanto o macroestado equivalente à soma 2 é o menos provável, pois só aparece uma única vez (MOURA, 2016).

Figura 6. A) Diferentes possibilidades para o valor obtido para a soma jogando-se dois dados. B) Possíveis resultados de jogo com os dois dados.



Fonte: Moura (2016).

Uma outra abordagem interessante é feita por Souza *et al.* (2013) no artigo *Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no Ensino Médio*, publicado em 2013 na Revista Brasileira de Ensino de Física. Nessa produção, os autores apresentam uma proposta de ensino de estatística da segunda lei para uso no ensino médio. Essa proposta adapta uma ideia de Martim Sussman para representar estados, usando uma garrafa PET, bolas de gude e uma mangueira de ar refrigerado. A partir desse material é possível utilizar conhecimentos básicos de estatística para construir os conceitos de macroestados e microestados. A Figura 7 ilustra o aparato construído.

Figura 7. A) O aparato e B) seus componentes.



A)

B)

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Diante do que foi explanado, conhecimentos sobre distribuição, fatorial e probabilidade, aprendidos em cursos introdutórios e superiores de matemática, podem ser integrados às noções de mecânica estatística e termodinâmica para possibilitar uma interpretação microscópica de como se dá a distribuição de energia sobre os microestados de um sistema, implicando em um modelo conceitual coerente para o fenômeno da entropia.

Conforme destaca Kozliak (2004, tradução nossa), o aumento da entropia envolve um aumento no número de microestados acessíveis, entre os quais a energia de um sistema pode ser distribuída. Assim, existe apenas um tipo de mudança na entropia de um sistema: a propagação de energia entre os diferentes números de microestados acessíveis do sistema devido à mudança de volume, composição ou temperatura.

Correlacionando essa discussão com a utilização das analogias para tratar do conceito de entropia, considerando um sistema quântico em que a localização da partícula é indefinida, uma simples analogia pode ser sugerida: um microestado é uma forma de arranjar um número finito de livros similares (partículas) em um certo número de prateleiras horizontais de diferentes alturas (níveis quânticos) em uma biblioteca; os níveis de energia acessíveis são aqueles que podem ser alcançados pelo bibliotecário, dependendo de quão alto é a prateleira (KOZLIAK, 2004, tradução nossa).

A partir de todo esse arcabouço de conceitos e conhecimentos, que podem ser construídos mediante uma abordagem diferenciada para o conceito de entropia, é crucial como fator preponderante entender a influência que as concepções prévias e/ou alternativas dos alunos tem para a formulação de um conceito científico, tal como a entropia.

3.4 Concepções alternativas dos alunos sobre a entropia

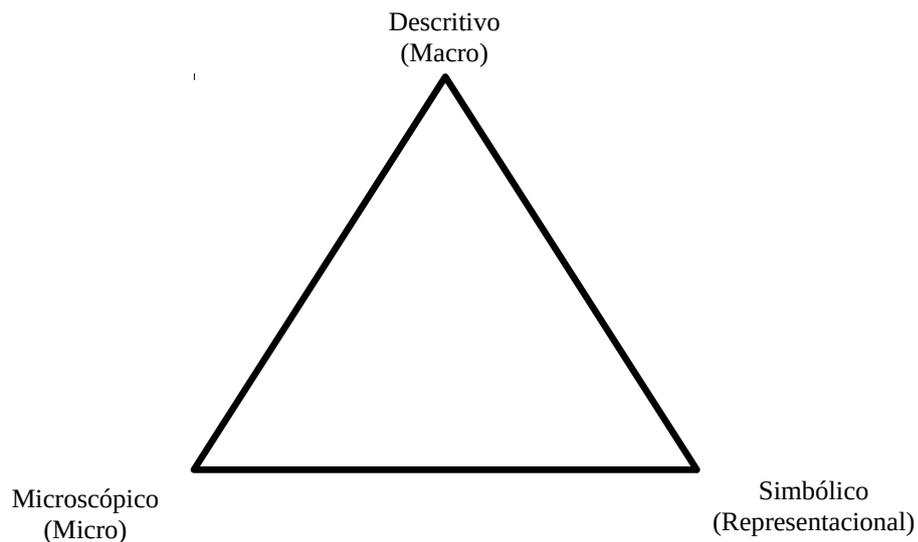
A natureza abstrata da química, juntamente com outras dificuldades de aprendizagem de conteúdos (por exemplo de natureza matemática) credencia as aulas de química a exigirem, no olhar de muitos estudantes, um conjunto de habilidades para favorecer a compreensão de conceitos e fenômenos mais complexos (FENSHAM, 1988, ZOLLER, 1990, TABER, 2002, apud SIRHAN, 2007, tradução nossa). Devido a isso, muitos estudantes podem criar uma certa resistência ao se deparar com conceitos que necessitam de um embasamento matemático prévio e uma interpretação microscópica.

Uma das características essenciais da química é a constante interação entre os níveis de pensamento macroscópico e microscópico, e é esse aspecto do aprendizado de química (e física) que representa um desafio significativo para a maioria dos alunos (BRADLEY;

BRAND, 1985, apud SIRHAN, 2007, tradução nossa). Inúmeros textos disponíveis na literatura apoiam a visão de que a interação entre esses mundos é uma fonte de dificuldade para muitos aprendizes de química. Exemplos incluem a termodinâmica, o uso de linguagem e analogias antropomórficas e o aprimoramento da compreensão conceitual dos alunos (ABRAHAM *et al.*, 1992, ÖZMEN; AYAS, 2003, HARRISON; TREAGUST, 2000; COLL; TREAGUST, 2001a, ESHACH; GARIK, 2001, NICOLL, 2001, BARKER; MILLAR, 2000, HARRISON; TREAGUST, 2000, apud SIRHAN, 2007, tradução nossa).

Diante disso, para que algum conceito de química possa ser aprendido é preciso estabelecer uma ligação entre três níveis do conhecimento químico: “microscópico”, “macroscópico” e “simbólico”. Além disso, as interações e distinções entre eles são características importantes do aprendizado de química e necessárias para a conquista da compreensão de conceitos químicos (JOHNSTONE, 1991, GABEL, 1992, HARRISON; TREAGUST, 2000, EBENEZER, 2001, RAVIALO, 2001; TREAGUST *et al.*, 2003, apud SIRHAN, 2007, tradução nossa e grifo do autor). Esses níveis são destacados no Triângulo da química, proposto por Johnstone (1982, apud SIRHAN, 2007).

Figura 8. Triângulo da química.



Fonte: Adaptado de Sirhan (2007, tradução nossa).

Além disso, muitos conceitos químicos precisam também de um aporte da matemática. Como já foi discutido, os aspectos teóricos e conceituais fundamentais para a compreensão do conceito de entropia, sob a ótica da termodinâmica estatística, necessitam de um embasamento teórico em análise combinatória e probabilidade. Neste sentido Bain *et al.*

(2019, tradução nossa e grifo do autor) defendem que, para o sucesso dos alunos de química em todo o currículo da graduação, a instrução e a avaliação enfatizem não apenas o raciocínio algorítmico e conceitual, mas também uma mistura significativa do raciocínio matemático e químico *durante* a resolução de problemas.

Assim sendo, deficiências atreladas tanto aos aspectos microscópicos como matemático podem comprometer o processo de aprendizagem de um determinado conceito, fazendo com que os alunos construam conceitos errôneos. Nas últimas décadas, um dos focos de estudo de vários pesquisadores em muitos países tem sido investigar as concepções dos alunos sobre os conceitos fundamentais da química (STAVY, 1988, PETERSON; TREAGUST, 1989, EBENEZER; GASKELL, 1995; QUILES-PARDO; SOLAZ-PORTOLES, 1995, AYAS; DEMIRBAŞ, 1997, AYAS; COŞTU, 2002; ÇALIK *et al.*, 2005 apud SIRHAN, 2007, tradução nossa).

Tendo em vista que o termo entropia é multifacetado e no âmbito da físico-química possui duas abordagens distintas, caso visto de maneira isolada, esse conceito pode causar confusão e estabelecer concepções que não condizem com os conceitos cientificamente corretos.

Neste sentido, Carson e Watson (2004, tradução nossa) reiteram que para o conhecimento ser construído deve haver um processo de interação entre as concepções que já existem no aprendizado (memória) e um estímulo externo, em que nesse processo novas concepções podem ser criadas ou modificadas. No entanto, se o conceito de entropia for abordado de modo superficial relacionado apenas aos aspectos do aumento ou diminuição da desordem de um sistema, considerando apenas estados macroscópicos como volume, pressão e temperatura, os alunos podem criar concepções erradas e terem resistência para modificar essas concepções.

Além disso, a forma como os livros textos tradicionais de ensino superior de físico-química trazem o conceito de entropia, também, comprometem a construção dessas novas concepções, visto que, na maioria deles, a consideração estatística moderna da entropia é vista de maneira separada de sua definição clássica, sendo tratada muitos capítulos mais tarde, enfatizando sua base matemática ao invés de estabelecer conexões com a equação (2) citada anteriormente. Portanto, este tipo de abordagem pode acarretar em concepções equivocadas sobre o conceito, fazendo os alunos pensarem, por exemplo, que existem dois tipos de entropia: uma “térmica”, envolvendo a transferência de calor, e uma “posicional” que se manifesta na expansão de um gás ou em uma mistura (KOZLIAK, 2004, tradução nossa e grifo do autor).

Partindo disso, é possível levar em consideração as ideias prévias dos alunos e relacionar com os conhecimentos científicos necessários para se entender o conceito a partir da elaboração de estratégias de ensino coerentes com os modelos teóricos vigentes (SILVA; LATTOUF, 1996, apud COVOLAN; SILVA, 2005).

Nesse viés, Sirhan (2007, tradução nossa) elenca que o processo de aprendizado de química envolverá a modificação ou alteração de ideias mantidas anteriormente e este é um processo natural. É de natureza individual e não há como o professor ter tempo ou capacidade para abordar cada aluno individualmente. No entanto, na prática, se os conceitos forem abordados com cuidado, baseando-se na linguagem e nas formas de pensamento já presentes, ao mesmo tempo em que permitem que conceitos sejam abordados de várias direções, o aluno poderá desenvolver ideias de maneira mais significativa.

Além disso, os alunos precisam da oportunidade de "brincar com ideias", compartilhar ideias, verbalizar conceitos para que, de maneira natural e gradual, as concepções avancem constantemente em uma base segura. Isso permitirá que concepções inadequadas sejam modificadas de maneira aceitável.

O conceito de entropia está inserido nesse contexto, sendo crucial para o seu entendimento os alunos relacionarem com a 2ª Lei da Termodinâmica que é definida em termos da entropia. Sendo assim, para que possamos entender a reversibilidade ou irreversibilidade de processos físico-químicos é necessário compreender a real natureza desta lei e o conceito de entropia. Nesse cenário, existem alguns recursos didáticos que podem ser utilizados pelos professores como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem dos alunos acerca do conceito de entropia, enfatizando o seu caráter microscópico, visto que, “[...] ignorar esse aspecto é ignorar o caráter estatístico da lei e seu significado” (SOUZA *et al.*, 2013, p. 1).

Neste sentido, Souza *et al.* (2013) elaboraram uma abordagem que introduz os aspectos estatísticos da segunda lei e é acessível para o ensino médio, logo, também pode ser utilizada no ensino superior. Na proposta, que ocorreu em uma escola da rede estadual do Rio de Janeiro, os alunos já tinha estudado a segunda lei da termodinâmica como normalmente é abordada, incluindo as máquinas térmicas, foi apresentado um texto em prosa cujo título era: *Cecília, o perfume e a segunda lei da termodinâmica*.

O texto, descreve as peripécias de Cecília, uma adolescente que vive mexendo nas coisas de sua mãe, até o dia em que derruba, sobre a cama, o frasco do perfume preferido de sua mãe. Apavorada, pois sabia que sua mãe ficaria zangada e lhe daria uma bronca, Cecília escondeu o frasco vazio, mais o cheiro do perfume persistiu no quarto e na coberta da cama. Para ajudar Cecília a esconder sua “arte”, foi feita uma

pergunta: uma vez espalhado, há alguma possibilidade do cheiro voltar a concentrar-se dentro do frasco, como de início? Ou mais precisamente, pode um gás difundido retornar espontaneamente às condições iniciais? (SOUZA *et al.*, 2013, p. 8)

Para discutir a questão, os autores propuseram a construção de um aparelho pelos alunos composto por uma garrafa PET, uma mangueira de plástico flexível e bolas de gude. Além disso, foi utilizado um aplicativo para eles simularem a “contagem” de estados de fácil uso em sala de aula. Como resultado eles observaram que os alunos ficaram menos resistentes ao conteúdo, pois toda a discussão foi realizada dentro de um contexto que lhes é familiar, como o texto sobre Cecília, além de se envolverem ativamente, quando precisaram, por conta própria, construir o aparato e utilizá-lo para fazer medições e estimativas.

Sendo assim, os alunos que antes da ação possuíam uma visão superficial da segunda lei da termodinâmica, por exemplo, em termos de uma equação que fornece o rendimento de uma máquina térmica, puderam perceber que essa fórmula é uma consequência da lei e seu real significado está relacionado com o aspecto estatístico que define os macro e microestados do sistema que é descrito pela termodinâmica estatística.

Diante do que foi explanado, existem estratégias viáveis para se abordar o conceito de entropia em sala de aula. O uso de recursos como este pode auxiliar o docente a utilizar a metodologia mais adequada com o objetivo de explorar de maneira integrada os aspectos macroscópicos e microscópicos relacionados ao conceito de entropia, subsidiando-se de analogias coerentes e conhecimentos (conceitos) de termodinâmica, estatística e probabilidade, com o intuito de modificar a concepção dos discentes sobre o conceito.

4 METODOLOGIA

4.1 Classificação da pesquisa

Quanto ao objetivo geral a pesquisa enquadra-se como descritiva, visto que, pretende-se descrever as características de uma dada população ou fenômeno de determinada realidade. Além disso, uma de suas características mais marcantes é a padronização de técnicas de coleta de dados, tais como o questionário e a observação sistemática (GIL, 2012). Portanto, a ideia é analisar quais características são marcantes nos discursos dos alunos acerca do conceito de entropia envolvendo suas concepções alternativas e a influência destas no aprendizado do conceito após terem estudado o mesmo na disciplina de Físico-química.

Em relação a forma de abordagem do problema a pesquisa é de caráter qualitativo, visto que, objetiva-se identificar o modo como os estudantes interpretam fenômenos e atribuem significados sobre o conceito de entropia em situações diversas (PRODANOV; FREITAS, 2013).

A pesquisa também é bibliográfica. Na visão de Fonseca (2002) a pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas da web e sites. Nessa pesquisa foram feitos levantamentos sobre os trabalhos de conclusão de curso desenvolvidos pelos alunos dos cursos de licenciatura em química e física da Universidade Federal de Pernambuco – Campus do Agreste, visando identificar quais destes abordavam de alguma forma o conceito de entropia.

4.2 Sujeitos e Campo de pesquisa

O campo de pesquisa foi a Universidade Federal de Pernambuco – Campus do Agreste, e os sujeitos participantes foram alguns discentes das turmas de Físico-química I do curso de Química-licenciatura, sendo o quantitativo diretamente ligado a disponibilidade dos alunos. Essa seleção dos sujeitos foi pensada no intuito de verificar o entendimento de entropia dos alunos de uma mesma turma antes e após estudarem o conceito. Também foram objetos de estudo os trabalhos de conclusão de curso que abordaram o conceito de entropia.

4.3 Coleta de dados

A coleta de dados empregada na pesquisa perpassou por três etapas, conforme destacado a seguir:

- Levantamento bibliográfico sobre os trabalhos de conclusão de curso de química e física licenciatura que abordam o conceito de entropia para identificar a recorrência de pesquisas sobre o tema e os aspectos investigados;
- Aplicação de dois questionários;
- Análise do material utilizado pelas professoras durante as aulas sobre entropia;
- Investigação de publicações disponíveis na literatura que utilizam recursos didáticos que podem ser usados como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem identificadas nos alunos.

Segundo Gerhardt e Silvera (2009, p. 69) o questionário “é um instrumento de coleta de dados constituído por uma série ordenada de perguntas que devem ser respondidas por escrito pelo informante, sem a presença do pesquisador”. Visto que, a ideia é ter acesso as concepções dos alunos sobre o conceito de entropia. Para o questionário utilizado na pesquisa foram propostas uma série de questões abertas que possibilitaram identificar as opiniões e interpretações dos estudantes em cada problema.

Na segunda etapa, com a aplicação do primeiro questionário, buscou-se identificar as concepções prévias dos alunos sobre o conceito de entropia e sua associação com palavras ou frases que remetam a “desordem” ou “aumento e diminuição da desordem” de um determinado sistema.

Posterior a isso, foi feita a análise do material utilizado durante as aulas pelas professoras das turmas de Físico-química I em que foi feita a abordagem do conceito de entropia, com o intuito de identificar quais aspectos acerca do conteúdo foram explorados.

Uma semana após as aulas ocorreu a aplicação de um segundo questionário, com o objetivo de identificar quais as modificações de entendimento que ocorreram após o conceito ter sido trabalhado em sala de aula pelos(as) professores(as) da disciplina. Nesse questionário as questões foram mais aprofundadas, englobando exemplos de analogias e sistemas de macro e microestados, com o intuito de analisar como os discentes interpretam a entropia em sistemas macro e microscópicos e se houve um entendimento por parte deles ao ponto de causar uma mudança no entendimento sobre entropia.

4.4 Análise dos Dados

A análise dos trabalhos de conclusão que abordaram o conceito de entropia ocorreu na base de dados da biblioteca da universidade e levou em consideração os trabalhos disponíveis no sistema na época, ou seja, publicados no período entre 2014 e 2018. A escolha desse período para a análise está relacionada à quantidade de publicações disponíveis no sistema no momento em que foi feito o levantamento, que ocorreu no primeiro semestre de 2019.

Na análise dos questionários o objetivo foi debruçar-se sobre aspectos relacionados “a presença ou ausência de uma dada característica de conteúdo ou conjunto de características num determinado fragmento de mensagem” (LIMA, 1993 apud CAREGNATO; MUTTI, 2006, p. 682) que no presente trabalho relaciona-se as recorrentes associações da entropia ao termo “desordem”.

Em relação a técnica de análise dos dados empregada seguimos o modelo da Análise de Conteúdo (AC) proposto por Bardin (1977), visto que, o objetivo foi interpretar como os alunos expressam seus conhecimentos prévios e construídos diante de fenômenos que envolvem a entropia, sendo isso constatado a partir da análise dos questionários. De acordo com a autora o termo análise de conteúdo pode ser designado como

Um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção /recepção (variáveis inferidas) dessas mensagens (BARDIN, 1977, p.48).

Dito isso, a análise de conteúdo leva em consideração as significações (conteúdo), eventualmente a sua forma e a distribuição desses conteúdos e formas (índices formais e a análise da ocorrência simultânea dos fatos), tendo como objetivo a manipulação de mensagens (conteúdo e expressão desse conteúdo) para evidenciar os indicadores que permitam inferir sobre uma outra realidade que não a da mensagem. Sendo assim, a técnica de AC engloba três fases: 1) a pré-análise; 2) a exploração do material e 3) o tratamento dos resultados, a inferência e a interpretação (BARDIN, 1997).

A etapa de pré-análise é a fase de organização da pesquisa e contempla: “a escolha dos documentos a serem submetidos à análise, a formulação das hipóteses e dos objetivos e a elaboração de indicadores que fundamentem a interpretação final” (BARDIN, 1997, p. 124, grifo do autor). Nesta pesquisa optamos por elaborar categorias *a priori* e *posteriori* para os resultados analisados.

Essa análise categorial consistiu em selecionar características que são utilizadas na literatura envolvendo o conceito de entropia e a partir dessas observar as respostas dos pesquisados nos questionários. Características essas que podem ser, como elencado acima,

fragmentos de frases ou palavras que denotam a aspectos macroscópicos do sistema relacionados a desordem ou abordagens atômico-moleculares atreladas ao número de macro e microestados do sistema.

Para a etapa de exploração do material foram criadas categorias, a partir das quais foram feitas inferências entre o entendimento dos alunos e as discussões cientificamente coerentes sobre o conceito de entropia. Neste sentido, foram criadas as seguintes categorias a *priori*, que foram utilizadas para a análise do primeiro questionário: (C1) Respostas que remetem a desordem ou aumento/diminuição da desordem do sistema e (C2) Respostas que não remetem a desordem, visto que, era de se esperar que muitos alunos utilizassem termos nesse sentido, uma vez que essa associação é bastante utilizada nos livros didáticos.

No segundo questionário, após a análise do material utilizado pelas professoras e das respostas dos alunos, foram criadas mais três categorias a *posteriori*: (C3) Respostas que denotam a dispersão de energia do sistema; (C4) Respostas que abordam o número de macro e microestados do sistema; e, por fim, (C5) respostas que remetem aos níveis de energia, distribuição estatística e probabilidade.

Posterior a criação dessas categorias, na última fase de análise, foi feita a interpretação dos dados a partir da análise dos questionários propondo-se inferências e apropriando-se dos resultados de análise para fins teóricos e metodológicos mediante a proposta de utilização de recursos disponíveis na literatura que podem favorecer o processo de ensino-aprendizagem acerca da entropia. Para isso, foi discutido de que forma os mesmos podem ser utilizados e em quais contextos da sala de aula.

Por fim, ocorreu a investigação dos recursos didáticos disponíveis na literatura que podem ser utilizados como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem identificadas nos alunos. Nesse levantamento foram utilizadas palavras-chave como: materiais didáticos, termodinâmica estatística, entropia e microestados, em buscadores de publicações como o Google Acadêmico, Scielo e ACS Publications, levando em consideração o intervalo de tempo entre 2010 e 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho estão apresentados e discutidos ao longo desta seção, que foi dividida da seguinte forma: 5.1 Pesquisa bibliográfica dos trabalhos de conclusão de curso que abordam o conceito de entropia no contexto da UFPE – Campus Agreste; 5.2 Investigação das concepções prévias dos alunos a partir da análise do primeiro questionário; 5.3 Análise das concepções dos alunos após terem estudado o conceito em sala de aula a partir do segundo questionário e; 5.4 Recursos didáticos como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem apresentadas pelos alunos.

5.1 Pesquisa bibliográfica dos trabalhos de conclusão de curso que abordam a entropia no contexto da UFPE – Campus Agreste

O presente tópico consiste na apresentação dos resultados encontrados em uma pesquisa bibliográfica feita na biblioteca da UFPE – Campus Agreste com o intuito de fazer um levantamento sobre os trabalhos de conclusão dos cursos de química e física licenciaturas, que continham alguma abordagem referente à entropia. Após esse procedimento constatou-se que apenas dois trabalhos, ambos do curso de química, explanavam sobre entropia conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1. Trabalhos de conclusão de curso encontrados a partir da Pesquisa bibliográfica realizada no CA-UFPE.

Título	Ano de publicação
(T1) Análise dos equívocos relacionados ao processo de ensino e aprendizagem do conceito de entropia em um curso de química de nível superior.	2016
(T2) Categorização de erros em atividades avaliativas sobre as leis termodinâmicas.	2017

Fonte: O autor (2020).

No T1 uma licencianda buscou investigar os equívocos mais comuns apresentados pelos discentes do curso de Química-Licenciatura acerca do conceito de entropia e tentou verificar a origem a partir da análise das concepções deles. Para isso, aplicou um questionário, analisou livros textos voltados para o ensino superior das disciplinas de Química Geral e Físico-Química, e observou como os professores que ministraram estas disciplinas abordavam o conceito de entropia. Em seguida, a licenciada propôs uma aula com o objetivo principal de apresentar a entropia sob a ótica da termodinâmica clássica e estatística, a partir de termos

mais adequados e uma abordagem histórica do conceito. Ao final, reaplicou o questionário para verificar a validade de suas hipóteses (LIMA, 2016).

Dentre os equívocos apresentados pelos alunos encontrados na pesquisa constatou-se, com o primeiro questionário, que até alunos de disciplinas mais avançadas e que já possuem uma certa familiaridade com o conceito de entropia, descrevem a entropia em termos da “desordem” do sistema, como é possível observar em trechos das respostas dos alunos de uma das questões do questionário aplicado na turma de físico-química II do curso de Química-Licenciatura da UFPE – Campus Agreste, no segundo semestre de 2016. A afirmativa era a seguinte: defina entropia em poucas palavras, baseado nos seus conhecimentos anteriores à esta disciplina. Algumas das respostas foram:

É uma função de estado que mede o grau de desordem de uma mistura gasosa.
 É a desordem de um sistema, ou seja, quanto maior for a desordem, maior a entropia.
 Desorganização do sistema.
 Está relacionada a desordem das reações.
 Está relacionada a desordem das moléculas. (LIMA, 2016, p 44)

Sendo assim, é perceptível que, embora alguns alunos já tenham cursado disciplinas mais avançadas, como Físico-química I e II, ainda não compreendem o conceito de forma apropriada, pois continuam relacionando a entropia com a desordem do sistema. Tal resultado sugere que, possivelmente, a forma como o conceito é abordado nas disciplinas não leva o aluno a pensar na entropia em uma descrição voltada para os aspectos da termodinâmica estatística, deste modo a ideia de entropia como desordem permanece das vivências anteriores às disciplinas em questão.

Em relação à análise dos livros textos, no T1 foi identificado que livros mais introdutórios abordam a entropia como desordem, não se preocupando muito com a abordagem em termos da termodinâmica estatística.

Conforme destacado por Cavalcanti *et al.* (2018) livros de disciplinas mais introdutórias, como Química-geral, abordam o conceito de entropia em termos do grau de desordem, enquanto outros voltados para disciplinas mais avançadas, como Físico-química, dão uma ênfase maior aos aspectos da termodinâmica estatística em uma abordagem a nível molecular e probabilística.

Diante disso, utilizar bibliografias recomendadas que contemplem os aspectos da termodinâmica estatística, mesmo que de forma introdutória, já nas disciplinas iniciais pode ser uma forma de preparar os alunos para discussões mais aprofundadas em disciplinas mais avançadas, como a de Físico-química I, evitando assim que cursem tais disciplinas com

concepções equívocas sobre a entropia devido à forma como os livros mais básicos abordam o conceito. Dessa forma, não será necessário desconstruir todo o conhecimento adquirido nas disciplinas anteriores acerca da entropia.

No que diz respeito às aulas dos(as) professores(as), a pesquisadora observou que muitos preferem não abordar o conceito a partir da termodinâmica estatística por acharem que o contexto microscópico é mais difícil dos alunos entenderem, sendo preferível explicar o conceito em termos da termodinâmica clássica enfatizando os aspectos macroscópicos.

Dito isso, fica ainda mais clara a necessidade dos professores utilizarem recursos didáticos que favoreçam uma maior compreensão acerca dos aspectos microscópicos da matéria relacionados ao conceito de entropia.

Após essas constatações, a autora aplicou um novo questionário, englobando aspectos da termodinâmica clássica e estatística, depois dos alunos terem estudado o conceito e observou que os mesmos equívocos mencionados anteriormente, permaneciam. Uma semana depois, ela ministrou uma aula contemplando aspectos históricos e conceituais da termodinâmica clássica e estatística. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, pois, segundo a autora, ocorreu uma evolução conceitual dos alunos, visto que, quase todos responderam às perguntas corretamente e praticamente todos relacionaram o termo entropia com a distribuição de energia associada aos estados acessíveis e não mais à desordem.

Em relação aos alunos que não entenderam o conceito corretamente mesmo após a aula proposta, talvez mesmo com uma abordagem mais apropriada utilizando a história da química e uma aula expositiva dialogada, ainda seja necessário utilizar outros recursos que tratem mais claramente dos aspectos microscópicos do conceito.

Discorrendo agora sobre o T2, neste trabalho foi feita uma pesquisa qualitativa de caráter documental, no intuito de analisar e categorizar os erros encontrados em atividades avaliativas sobre as leis termodinâmicas, a partir do Modelo de Análise Didática de Erros (MADE), proposto por De La Torre (2007), no contexto da disciplina de físico-química. O pesquisador constatou que em questões envolvendo as Leis da Termodinâmica erros relacionados à interpretação da variação de entropia de sistemas físico-químicos eram recorrentes, devido à dificuldade dos alunos na interpretação e resolução de problemas que envolviam a apresentação do conceito a nível molecular e cálculos matemáticos (SOUZA, 2017).

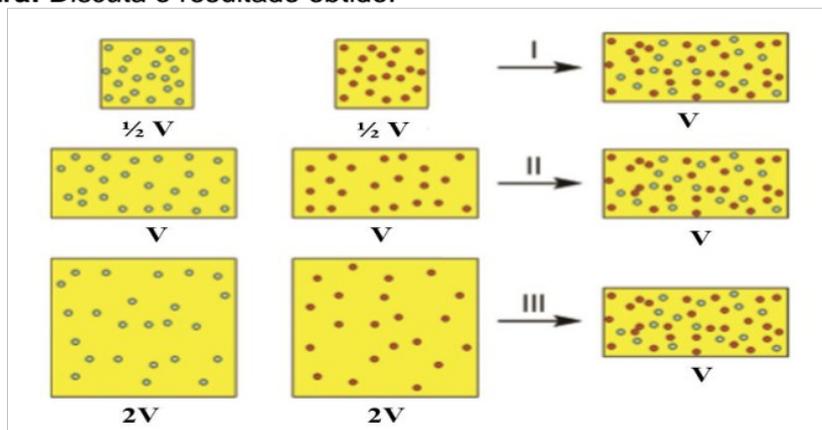
Dentre os erros observados pelo autor da pesquisa pode-se destacar uma questão de uma atividade avaliativa da turma de Físico-química I do semestre letivo de 2016.2

relacionada ao cálculo da variação de entropia em um sistema gasoso ideal, considerando que o processo é isotérmico, ou seja, a temperatura constante e reversível (Figura 9).

Figura 9. Questão 4 da atividade avaliativa da turma de Físico-química I do semestre letivo 2016.2.

Questão: 4. (2,5) Calcule a variação de entropia associada a cada processo representado abaixo, considerando que os processos são isotérmicos reversíveis e os gases se comportam como gases ideais.

Ponto Extra: *Discuta* o resultado obtido.



Figuras adaptadas da referência: A. Ben-Naim. Entropy: Order or Information. *J. Chem. Educ.* 88, 594, 2011.

Fonte: Souza (2017).

Conforme solicitado acima, o discente deveria determinar a variação de entropia de cada processo e para obter a pontuação extra seria necessário discutir qualitativamente o significado do resultado obtido em termos da mudança de entropia (Figura 10).

Figura 10. Exemplo de resposta considerada incorreta para a questão 4.

Resposta errada:

$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_1 + \Delta S_2$ Ponto Extra: *Discuta* o resultado obtido.

$\Delta S = n \cdot R \cdot \ln \frac{V_f}{V_i}$

$\Delta S = n \cdot R \cdot \ln \frac{V_f}{V_i}$

$\Delta S = n \cdot R \cdot \ln \frac{V_f}{V_i}$

8/1 = 8 pontos

Podemos observar de acordo com o volume do recipiente e os gases comportamentos dos gases que não se misturam mas tem a tendência de estar ou não mais próximos uma molécula das outras.

Fonte: Souza (2017).

Mesmo o autor discutindo a questão em termos da categorização dos erros são feitas algumas ponderações importantes. Primeiramente a resposta não contém o cálculo matemático e atribui a variação de entropia ao fato dos gases diferentes não se misturarem, esquecendo-se que no modelo dos gases perfeitos as partículas que constituem os gases não interagem. Além disso, não discute que a variação de entropia ocorreu por causa da mudança do volume à qual os gases estão confinados no processo (SOUZA, 2017).

Como se pode ver, muitos erros ocorreram na resolução da questão. Uma forma qualitativa de discutir o resultado obtido, sem a necessidade de cálculos matemáticos, seria em termos do número de microestados acessíveis diferentes em cada um desses processos.

Conforme menciona Lambert (2002, tradução nossa) quando um gás se expande no vácuo, o número de microestados aumenta em qualquer pequena faixa de energia do volume original quando um volume maior está disponível. Para aquelas moléculas cuja energia está associada a esse intervalo de energia particular, isso resulta em uma maior dispersão de sua energia original porque agora ela pode ser espalhada para um número maior de microestados do que antes da expansão do gás. Por causa de tal aumento na dispersão de energia, a entropia do sistema aumenta. Sendo assim, a entropia aumenta à medida que o volume aumenta - mas não simplesmente porque há mais espaço para as moléculas!

Portanto, mesmo sem o cálculo matemático é possível prever a variação de entropia para cada processo. No sistema I as partículas dos gases ideais passam de uma condição de volume menor para um volume maior, sendo assim a variação de entropia aumenta, pois existem mais microestados disponíveis para serem ocupados. Já no sistema II os gases permanecem com a mesma configuração, logo não ocorre alteração na entropia. E por fim, no sistema III as partículas saem de um estado com um volume maior para um estado de volume menor levando então a uma diminuição no número de microestados disponíveis para serem ocupados e conseqüentemente a uma diminuição da entropia do sistema.

Nesse sentido, diante do que foi explanado, uma forma de minimizar as dificuldades de aprendizagem verificadas nestes trabalhos pode ser o uso apropriado de recursos didáticos para favorecer o processo de aprendizagem do conceito de entropia, principalmente no que diz respeito às definições de macroestados e microestados. Portanto, como será discutido no tópico 5.4, as propostas de Souza *et al.* (2013), Moura (2016) e Cavalcanti *et al.* (2018) podem ser eficientes para minimizar as dificuldades de aprendizagem dos alunos encontradas nos tópicos 5.2 e 5.3.

5.2 Investigação das concepções prévias dos alunos a partir da análise do primeiro questionário

Neste tópico apresentamos os resultados obtidos a partir da análise do primeiro questionário, conforme consta no APÊNDICE A. O objetivo foi analisar as concepções dos alunos sobre o conceito de entropia a partir de cinco perguntas abertas, como será discutido a seguir. Participaram da pesquisa nesse primeiro momento 19 discentes matriculados na disciplina de Físico-química I, dos quais 9 alunos eram da turma da tarde e 10 da turma da noite, ambas com professoras diferentes. Os discentes da tarde foram identificados por D_T e os da noite por D_N .

Inicialmente, buscou-se investigar se os alunos já haviam cursado a disciplina de Físico-química, pois, assim sendo, já teriam o contato prévio com o conceito de entropia e isso poderia influenciar nas respostas dependendo do entendimento deles. Sendo assim, a primeira pergunta foi:

É a primeira vez que você cursa a disciplina Físico Química I?

Os alunos D_{T1} e D_{T3} foram os únicos que já tinham cursado a disciplina durante a realização desta pesquisa. Sendo assim, esperava-se que eles tivessem um entendimento maior sobre o conceito de entropia. Em relação aos outros 17 alunos, que ainda não haviam cursado a disciplina, as concepções deles sobre o tema, provavelmente, estão atreladas a contatos anteriores ao da disciplina em questão. O intuito da segunda questão foi justamente identificar em quais contextos os alunos ouviram falar sobre entropia. Sendo assim fez-se a segunda indagação, conforme mostrado abaixo no quadro 1, em que percebeu-se que todos os alunos ouviram falar do conceito e remeteram a disciplinas cursadas anteriores a Físico-química I.

Quadro 1 – Respostas dos alunos relacionadas a questão 2 (Você já ouviu falar do conceito de entropia antes? Se sim, onde?).

Alunos	Respostas
D _T 1, D _T 4, D _T 7, D _T 8, D _T 9 e todos os D _N	Mencionaram as disciplinas de Química geral.
D _T 2	“Sim, no ensino médio e quando cursei geral 1.”
D _T 3	“Sim. No ensino médio, na universidade quando foi pago algumas cadeira.”
D _T 5	“Sim. Nas disciplinas de Química Geral I e Física III.”
D _T 6	“Sim, ouvi pela primeira vez nas aulas de Inorgânica I.”

Fonte: O autor (2020).

Como se pode ver a maioria dos alunos se remeteram a disciplinas introdutórias de Química geral como sendo o primeiro contato com o conteúdo e apenas um aluno mencionou o ensino médio. O estudante D_T3 não especificou quais foram as disciplinas anteriores em que ele ouviu falar do conceito, mas provavelmente foi alguma disciplina de Química geral. A disciplina de Física III é ofertada no curso de Física-licenciatura, logo, o discente provavelmente era deste curso. O aluno D_T6 mencionou a disciplina de Inorgânica I, em que o conceito não é objeto de estudo, mas o(a) professor(a) pode ter discutido algum aspecto sobre entropia em algum momento da aula.

Dessa forma, estes resultados sugerem que as concepções iniciais dos alunos provavelmente estariam associadas ao termo desordem, pois como mencionado anteriormente esta associação está presente nos livros didáticos utilizados nas disciplinas introdutórias. Considerando isso, elaborou-se previamente as categorias 1 e 2 apresentadas a seguir (quadro 2), as quais foram utilizadas na análise das respostas dos alunos a questão 3.

Quadro 2 – Categorias elaboradas a priori a partir da questão 3 (O que você entende pelo conceito de entropia?).

Categoria 1	Respostas que remetem à desordem ou aumento/diminuição da desordem do sistema.
Categoria 2	Respostas que não remetem a desordem.

Fonte: O autor (2020).

A terceira questão teve como objetivo identificar a concepção dos pesquisados acerca do que eles compreendiam do conceito de entropia. Os resultados mostraram que aproximadamente 89% do quantitativo total de alunos mencionaram o termo desordem ao definir entropia que está diretamente relacionado a categoria 1. As respostas de dois discentes foram particularmente interessantes e estão dispostas abaixo:

“Entropia é o grau de desordem das moléculas de um sistema, quanto maior a entropia, maior a probabilidade de ocorrência de choques efetivos entre as moléculas favorecendo a reação.”
(D_N2)

“A entropia mede a desordem da reação, quanto maior a desordem maior a probabilidade da reação acontecer.” (D_N9)

Nota-se nas respostas que os alunos relacionaram a entropia ao Modelo da Teoria das Colisões estudado no conteúdo de Cinética Química, segundo o qual, para que uma reação química aconteça é necessário ocorrer choques efetivos entre as moléculas que devem estar com orientações e geometrias favoráveis para superarem a barreira energética do estado de transição e ocorrer a transformação dos reagentes em produtos.

Essas colocações provavelmente estão relacionadas ao fato dos alunos associarem a espontaneidade ou não de uma reação, que está relacionada a entropia, com a taxa de velocidade de uma reação, que é objeto de estudo da cinética química. O favorecimento da reação, em termos cinéticos, está diretamente relacionado aos choques efetivos entre as moléculas que implicam na formação do complexo ativado que culminará na formação dos produtos. Os estudantes que não citaram a desordem responderam relacionando a categoria 2, afirmando:

“Conceito que uma reação ocorre naturalmente.” (D_T1)

“Equivale as 2ª e 3ª leis da Termodinâmica, e essa é a única lembrança que eu tenho sobre o assunto.” (D_N3)

Ainda que a entropia do universo esteja relacionada a processos irreversíveis ou espontâneos, que podem ser utilizados como sinônimos para o termo “naturalmente”, o estudante D_T1 que já havia cursado a disciplina, não conceituou corretamente, visto que, existem várias reações que não ocorrem naturalmente e ainda assim sofrem alterações de entropia. Sendo assim, mesmo já tendo cursado a disciplina o estudante continua não compreendendo o conceito. Em relação a D_N3, mesmo que as 2ª e 3ª Leis da Termodinâmica sejam descritas em termos da entropia, elas não equivalem ao real significado do conceito.

Esses resultados sugerem que talvez pelo fato da maior parte dos alunos estudaram o conceito apenas em disciplinas introdutórias do curso, como Química-geral, o termo “desordem” utilizado por eles para explicar a entropia pode ser uma consequência do uso de livros didáticos pelos professores que abordam o conceito de forma mais geral,

desconsiderando uma abordagem da termodinâmica estatística e levando os alunos a pensarem na desordem como bagunça (CAVALCANTI *et al.*, 2018).

Na quarta questão o intuito foi analisar se os pesquisados conseguiam relacionar a entropia com algum fenômeno do seu cotidiano. Sendo assim, perguntou-se:

Você consegue relacionar o conceito com algum processo do seu cotidiano?

Foi observado que os discentes D_{T8}, D_{N3}, D_{N6}, D_{N8} e D_{N9} não responderam a questão. Os demais conseguiram relacionar a entropia a fenômenos do cotidiano tais como: a expansão do universo, o derretimento do gelo, o aumento da temperatura de um aquecedor, mistura de gases em um gás de cozinha, expansão de um gás, uso da panela de pressão etc. Contudo, os estudantes não conseguiram explicar qual o motivo de ocorrer uma variação de entropia nesses processos e quando explicaram relacionaram novamente a desordem, como podemos ver a seguir.

“Sim, como por exemplo quando coloca-se água para ferver, com a transferência de energia em forma de calor do fogo para a panela e da panela para a água as moléculas de água ao aumentarem os choques efetivos estarão aumentando a entropia.” (D_{T4})

Novamente relaciona-se à entropia a cinética química. Além disso o pesquisado não consegue explicar o motivo de no processo de ferver a água ocorrer um aumento de entropia, algo que está relacionado com a possibilidade de ocupação de mais níveis de energia à medida que a temperatura aumenta. Outras respostas que merecem destaque são descritas a seguir.

“Se relaciona com desordem, um exemplo seria o meu quarto que está sempre bagunçado.” (D_{T6})

“A entropia como dito antes, está relacionada com a desordem de algum sistema, que este pode atrapalhar no equilíbrio. Exemplo, se estou no quarto estudando e meu irmão, por exemplo, começa a gritar, ele estará causando uma desordem sobre a minha concentração, e para que eu volte ao meu estado de equilíbrio preciso me deslocar para um [...]” (D_{T7}, o aluno não concluiu a resposta)

“Quando relacionamos a entropia a tudo tende a um estado de desordem. A vida em si é uma desordem...” (D_{T9})

“Com o meu quarto (haha)!; Em uma expansão (ex.: lata fechada de refrigerante no congelador); O aumento da temperatura de um aquecedor.” (D_{N1})

Os dados mostram que muitos estudantes relacionaram a entropia a uma analogia muito usual ao se exemplificar o aumento ou diminuição de entropia em termos da desordem, como, por exemplo, em um quarto bagunçado. Conforme destaca Denbigh (1989, apud LAMBERT, 1999, p. 1385) se

[...] algum processo específico envolve uma alteração da entropia termodinâmica ou estatística, deve-se perguntar se existe um efeito de calor reversível ou uma alteração no número de microestados de energia acessível, referentes ao processo em questão. Caso contrário, não houve alteração da entropia física (mesmo que tenha havido alguma alteração em nossas “informações”).

Sendo assim, objetos bagunçados em um quarto não servem como uma analogia para exemplificar a variação de entropia a partir de fenômenos do nosso cotidiano, visto que, tratam-se apenas de objetos macroscópicos como roupas, sapatos, livros etc. que estão em lugares diferentes no quarto, não havendo nenhuma alteração na composição destes materiais ou ainda transferência alguma de calor, pois objetos não possuem energia de interação (macroscópica) que, caso mudem de posição, alterariam sua energia.

5.3 Análise das concepções dos alunos após terem estudado o conceito em sala de aula a partir do segundo questionário

Na presente seção apresentamos os resultados obtidos a partir da análise do segundo questionário, conforme consta no APÊNDICE B. O objetivo foi analisar se ocorreu alguma mudança conceitual nos alunos após eles terem estudado o conteúdo sobre entropia em uma disciplina mais avançada como a de físico-química I. Sendo assim, o questionário foi mais aprofundado e envolveu questões que abordaram exemplos de analogias e sistemas de macro e microestados a partir de seis perguntas abertas, como será discutido abaixo. Participaram da pesquisa no segundo momento 16 discentes do quantitativo anterior, dos quais 7 alunos eram da turma da tarde e 9 da turma da noite.

As disciplinas foram ministradas por professoras diferentes. Não houve o acompanhamento presencial das aulas, mas teve-se acesso ao material utilizado para ministrar as aulas. Ambas utilizaram como recurso o projetor para a explanação do conteúdo relacionado a 2ª Lei da Termodinâmica. A partir da análise desses materiais foi possível perceber algumas semelhanças e diferenças nas abordagens relacionadas ao conteúdo.

A professora da tarde foi identificada por P_T e a da noite por P_N . Percebeu-se que as docentes fizeram abordagens históricas voltadas para as discussões sobre a máquina térmica de Carnot e o Ciclo de Carnot, para comprovar que a entropia é uma função de estado. Além disso, trouxeram exemplos de processos envolvendo variação de entropia, tais como: transições de fase, expansão de um gás e em mudanças envolvendo a variação de temperatura. Contudo, a presença do termo desordem foi recorrente ao longo dos slides.

Em relação a P_N houve uma discussão focada na relação da entropia com a dispersão de energia e na definição termodinâmica da entropia, centrada na termodinâmica clássica, que define a entropia em termos da equação 2, apresentada no referencial teórico. Enquanto que, P_T estruturou sua apresentação em três tópicos: 1. Definição termodinâmica da entropia; 2. A interpretação estatística da entropia e 3. A natureza molecular da entropia.

Na interpretação estatística da P_T foi abordada a equação 3, mostrada no tópico 3.2 do referencial teórico, e aparentemente discutiu-se alguns aspectos relacionados aos níveis de energia e aos microestados. Ao abordar a natureza molecular fez-se menção ao fato da entropia estar relacionada à probabilidade, enfatizando que o aumento de entropia está relacionado ao sistema estar saindo de um estado de baixa probabilidade e indo para um estado de alta probabilidade. Diante disso, foram elaboradas mais três categorias baseando-se nas informações apresentadas no material didático utilizado pelas professoras e nas respostas dos alunos para o segundo questionário, conforme mostra o quadro 3.

Quadro 3 – Categorias elaboradas a *posteriori* a partir da questão 1 (O que você entende pelo conceito de entropia?).

Categoria 3	Respostas que denotam a dispersão de energia do sistema.
Categoria 4	Respostas que abordam o número de macro e microestados do sistema.
Categoria 5	Respostas que remetem aos níveis de energia, distribuição estatística e probabilidade.

Fonte: O autor (2020).

As duas primeiras questões foram repetidas do questionário anterior justamente para identificar se houve alguma mudança na concepção dos alunos sobre entropia, após terem estudado o conceito em sala de aula. Logo, a primeira questão foi:

“O que você entende pelo conceito de entropia?”

Apesar dos alunos já terem estudado o conceito cerca de 69% deles continuaram a utilizar o termo desordem para definir a entropia. Do total de alunos que não associaram a entropia ao termo desordem, algumas respostas foram particularmente interessantes ao se fazer o comparativo com as respostas no questionário anterior, apresentadas a seguir no quadro 4.

Quadro 4 – Respostas das questões 3 (1º questionário) e 1 (2º questionário) (O que você entende pelo conceito de entropia?).

Aluno	Questionário 1	Questionário 2
D _T 6	“É um processo espontâneo. Está relacionado a desordem”.	“É a organização das moléculas em microestados e em diferentes níveis energéticos”.
D _T 7	“A entropia está relacionada com a desordem de algum sistema”.	“Que é o grau de dispersão de energia e matéria em um sistema”.
D _T 9	“De forma sucinta, é um estado de desordem”.	“Entropia está relacionada a probabilidade de quantas maneiras as partículas podem se distribuir em níveis energéticos”.
D _N 10	“Que significava o desequilíbrio/desordem o quanto o sistema está caótico em relação a sua vizinhança”.	“Como sendo a dispersão de energia e matéria em um sistema com ΔU constante. Em que, pode-se classificar um processo em espontâneo ou não”.

Fonte: O autor (2020).

Observando as respostas dos discentes vemos que todos eles utilizavam o termo desordem para conceituar a entropia no primeiro questionário. Contudo, após estudarem o conteúdo na disciplina de Físico-química I percebe-se uma mudança na concepção desses estudantes acerca do conceito. Isso indica que a abordagem feita em sala de aula pode ter sido importante para os alunos compreenderem o conceito em outra perspectiva não associando mais a entropia ao termo desordem e sim a aspectos relacionados a dispersão de energia, probabilidade e microestados. Foi possível identificar a presença das categoria 4 e 5 para o aluno D_T6, categoria 3 para os aluno D_T7 e D_N10 e a categoria 5 para o estudante D_T9.

Ainda assim, os alunos não conseguiram associar os termos presentes nas categorias mostradas no quadro 3 de forma coerente ou significá-los. Isso pode ter acontecido, pelo fato dos alunos não levarem em consideração os aspectos microscópicos atrelados ao conceito do

ponto de vista da termodinâmica estatística, pelo foco da disciplina ser mais voltada a termodinâmica clássica. Outro motivo, pode estar associado ao fato da abordagem envolvendo aspectos estatísticos ser algo novo, que os alunos não estão familiarizados, o que pode ter dificultado o entendimento do conceito de forma aprofundada.

Fazendo agora a análise da segunda questão:

“Você consegue relacionar o fenômeno da entropia com algum processo do seu cotidiano?”,

que também foi repetida do questionário anterior, observou-se que os alunos mantiveram, na grande maioria, respostas relacionando a entropia com processos do seu cotidiano como: derretimento do gelo, expansão de um gás, expansão do universo, fervura da água etc. No entanto, alguns estudantes fizeram menção a exemplos que se relacionam diretamente a analogias envolvendo a desordem ou bagunça de objetos macroscópicos, como está descrito a seguir:

“Sim. Com a lua e o sol, considerando que a temperatura é um fator, o sol se encontra em maior desordem nesse aspecto, ou seja, maior entropia.” (D_T3)

“Desordem. Ao entrar em uma sala, onde as carteiras estão desordenadas, por exemplo.” (D_T9)

“Um quarto desarrumando, uma expansão dentro de uma garrafa.” (D_N1)

Como se pode ver a partir das respostas de D_T9 e D_N1, a entropia foi diretamente associada à desordem e também à bagunça ao relacionar com objetos macroscópicos presentes em um quarto ou uma sala. Essas afirmações reforçam que a abordagem voltada para a termodinâmica clássica utilizando exemplos de analogias com objetos do cotidiano, passa a ideia de que o conceito de entropia pode ser compreendido apenas em termos dos aspectos macroscópicos, gerando com isso uma falta de conhecimento sobre os aspectos microscópicos da matéria ou ainda uma dificuldade em interpretar e interligar os conceitos de macroestado e microestado.

Nesse sentido, discutiu-se a terceira questão, com o intuito de apresentar uma situação na qual um quarto se encontrava bagunçado e saber dos alunos se seria uma analogia coerente para se utilizar como forma de exemplificar a entropia. Sendo assim, indagou-se:

“Comumente, são utilizadas analogias para exemplificar a entropia. Considerando que o quarto mostrado abaixo é o seu sistema o que você diria sobre a entropia desse sistema? É uma analogia plausível? Se sim, por quê? Se não, qual analogia melhor se encaixaria para exemplificar o fenômeno da entropia? Justifique.



Fonte: <https://tribunadoceara.com.br/blogs/divagando/cotidiano/por-que-guardar/>

O resultado mostrou que apenas um discente afirmou que a analogia era incoerente, conforme descrito a seguir. Todos os demais afirmaram ser uma analogia plausível por relacionar diretamente ao conceito de entropia ao associá-lo à desordem ou bagunça do quarto.

“A entropia em muitos livros é considerada/definida como ordem e desordem, no entanto, essa analogia não seria adequada, pois o sentido de desordem, significa a dispersão da energia e matéria naquele processo não indicando que está mais desorganizado.” (D_N10)

A partir da resposta acima percebe-se que o discente buscou associar a desordem a dispersão de energia e matéria, mas não ficou muito claro o que ele quis dizer. O fato da analogia não ser plausível pode ser relacionado tanto pelo aspecto da termodinâmica clássica, a partir da equação 2, como da termodinâmica estatística através das associações entre os microestados e os níveis de energia.

Portanto, espalhar objetos por um quarto não é uma analogia coerente para exemplificar o conceito de entropia, visto que, não existe qualquer efeito em termos de calor reversível, pois ao tocarmos um dado material como uma folha de papel, por exemplo, o calor passado é disperso no próprio ambiente de forma natural. Além disso, não existe nenhum tipo

de modificação em termos do número de microestados já que os objetos são os mesmos e não existem mais níveis de energia disponíveis para serem ocupados. Uma analogia mais plausível e coerente foi mencionada na revisão de literatura, em termos do número de microestados e dos níveis de energia acessíveis.

Nas questões posteriores o objetivo foi identificar o entendimento dos alunos acerca de exemplos de sistemas físico-químicos microscópicos envolvendo os conceitos de macro e microestados que são essenciais para se definir a entropia do ponto de vista da termodinâmica estatística. Sendo assim foram feitas as seguintes perguntas na questão 4:

- “A) De maneira simples, o que você entende por um estado termodinâmico de um sistema?
B) Como você relacionaria a resposta anterior aos conceitos de macro e microestados?”*

O intuito da questão foi identificar se os pesquisados eram capazes de relacionar o estado termodinâmico de um dado sistema com o nível de descrição e detalhamento que o sistema pode ser investigado. Dois alunos não responderam a questão. Os demais responderam o item A de modo incompatível com uma possível definição, e além disso muitos não conseguiram relacionar a resposta anterior aos conceitos de macro e microestados, que pode estar relacionado ao fato de não terem sido abordados com mais aprofundamento em sala de aula ou pela falta de embasamento dos alunos. Diante disso, destacamos apenas as seguintes respostas:

“ A) Estado termodinâmico tem relação com as propriedades termodinâmicas caracterizadas por pressão, volume, temperatura... de um ponto do gráfico. B) Para o macroestado conseguimos perceber essas propriedades a olho nu e no micro estamos falando de partículas.” (D_N1)

“A) Estado termodinâmico de um sistema é como se encontram os aspectos termodinâmicos, como entalpia, entropia, energia interna em um dado momento.” (D_N2, o item B não foi respondido)

D_N1 conseguiu relacionar o estado termodinâmico com as propriedades termodinâmicas e ainda relacionar essas propriedades com o macroestado. Ao afirmar que “no micro estamos falando de partículas” não foi possível entender sua colocação, mas provavelmente o aluno pretendia se referir a um nível mais detalhado de descrição. O

pesquisado D_{N2} relacionou o estado termodinâmico a algumas das funções de estado estudadas na disciplina de Físico-química I, o que não está totalmente correto.

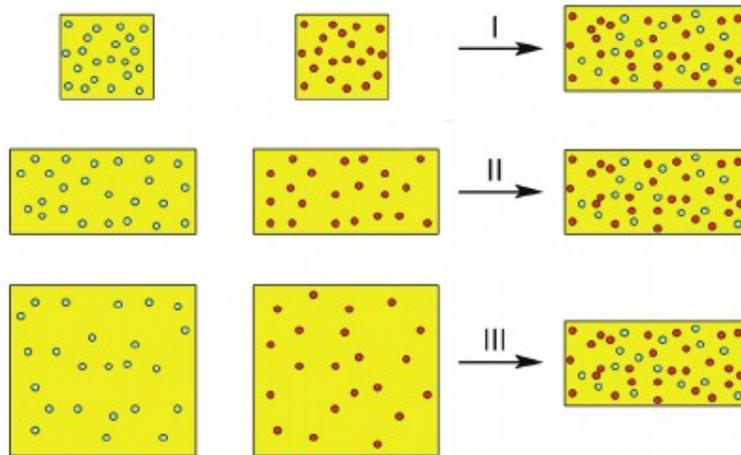
Um estado termodinâmico de um sistema está relacionado às propriedades macroscópicas mensuráveis como pressão, temperatura, volume etc., que podem ser medidas e observáveis a partir de investigações e experimentos. Contudo, o sistema só estará em um estado definido quando cada uma de suas propriedades tiver um valor definido. Neste sentido, em termos da físico-química a definição dos estados e observáveis de um sistema depende do nível ou da escala em que o sistema é considerado. Essa dependência de escala se reflete na distinção entre micro e macro estados, referindo-se a níveis mais baixos e mais altos de descrição (ATMANSPACHER, 2016, tradução nossa).

Dito isso, podemos tomar como um exemplo prático da especificação de macro e microestados uma bexiga de ar. Atuando sobre ela podemos dizer que temos propriedades macroscópicas como a pressão das moléculas de CO_2 no interior da bexiga, o volume da bexiga e ainda a temperatura do ambiente. Cada uma dessas condições em um dado estado no sistema representa um macroestado.

Baierlein (1999 apud, KOZLIAK, 2004, tradução nossa) define um microestado como sendo o estado do sistema em que a localização e momento de cada molécula e átomo são especificados com detalhes. Logo, para o caso descrito acima precisaríamos obter dados sobre a velocidade média individual de cada molécula dentro da bexiga de ar e seus momentos, em um dado instante de tempo, para definir um microestado.

Discorrendo agora sobre as questões 5 e 6, que envolveram sistemas microscópicos que demandavam de um conhecimento prévio acerca dos microestados e níveis de energia, uma interpretação qualitativa sobre cada processo físico-químico seria suficiente para respondê-las. Na questão 5, foi feita a seguinte indagação:

“Considerando o processo de mistura de dois gases ideais mostrado na figura abaixo, o que você tem a dizer sobre a entropia dos sistemas I, II e III no final do processo? Justifique.”



Fonte: Adaptado de Ben-Naim (2012).

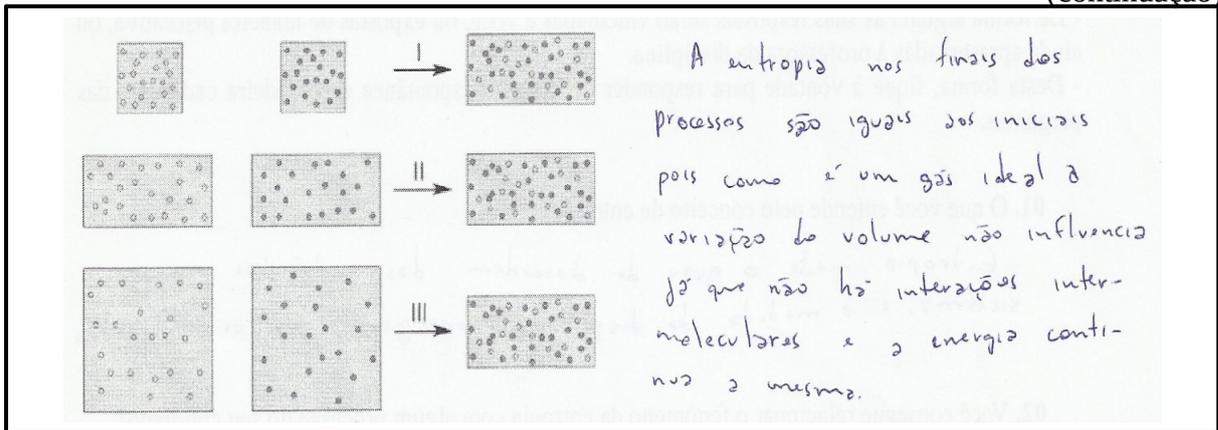
Observou-se que um dos alunos não respondeu a questão, outros afirmaram que as entropias são semelhantes, que não foi alterada nos processos e também houve a relação com aspectos atrelados a desordem, organização das partículas e velocidade de reação. A Figura 11 mostra as respostas dos alunos D_{T7} e D_{N2} , respectivamente, consideradas incorretas mas que trazem colocações interessantes, como pode ser visto a seguir.

Figura 11. Exemplos de respostas consideradas incorretas dos alunos D_{T7} (acima) e D_{N2} (abaixo) para a questão 5.

um aumento de entropia devido ao maior número de moléculas ou átomos em um sistema. Quanto mais átomos ou moléculas ocupam um determinado espaço, mais níveis de energia são disponíveis.

Fonte: Adaptado de Ben-Naim (2012).

(continuação)



Fonte: O autor (2020).

Como se pode ver o aluno D_T7 relaciona implicitamente o aumento de entropia nos três sistemas aos níveis de energia, distribuição estatística e probabilidade, destacando o fato de existir um número maior de moléculas que implicaria em uma maior quantidade de níveis de energia disponíveis. Contudo, como já foi falado no tópico 3.3 do referencial teórico, para que mais níveis de energia sejam disponíveis é necessária uma $T > 0$, na escala Kelvin, para que as partículas possam ocupar níveis de energia cada vez mais altos de acordo com a distribuição de Boltzmann.

O discente D_N2 bem coloca que por serem gases ideais não há interações intermoleculares atuando no processo, no entanto, a variação de volume irá influenciar na forma como a energia pode se dispersar pelos diferentes microestados. Conforme destaca Lambert (2002, tradução nossa) quando um gás se expande no vácuo, o número de microestados aumenta em qualquer pequena faixa de energia do volume original quando um volume maior está disponível. Para aquelas moléculas cuja energia está associada a esse intervalo de energia particular, isso resulta em uma maior dispersão de sua energia original porque agora ela pode ser espalhada para um número maior de microestados do que antes da expansão do gás. Por causa de tal aumento na dispersão de energia, a entropia do sistema aumenta.

Neste sentido, como os estados finais são iguais o fator determinante para analisar a entropia dos sistemas é o estado inicial em que os gases ideais se encontram. Como é sabido pelo Modelo dos gases ideais, não existem interações intermoleculares entre os gases e podemos considerar que eles ocupam sozinhos o recipiente.

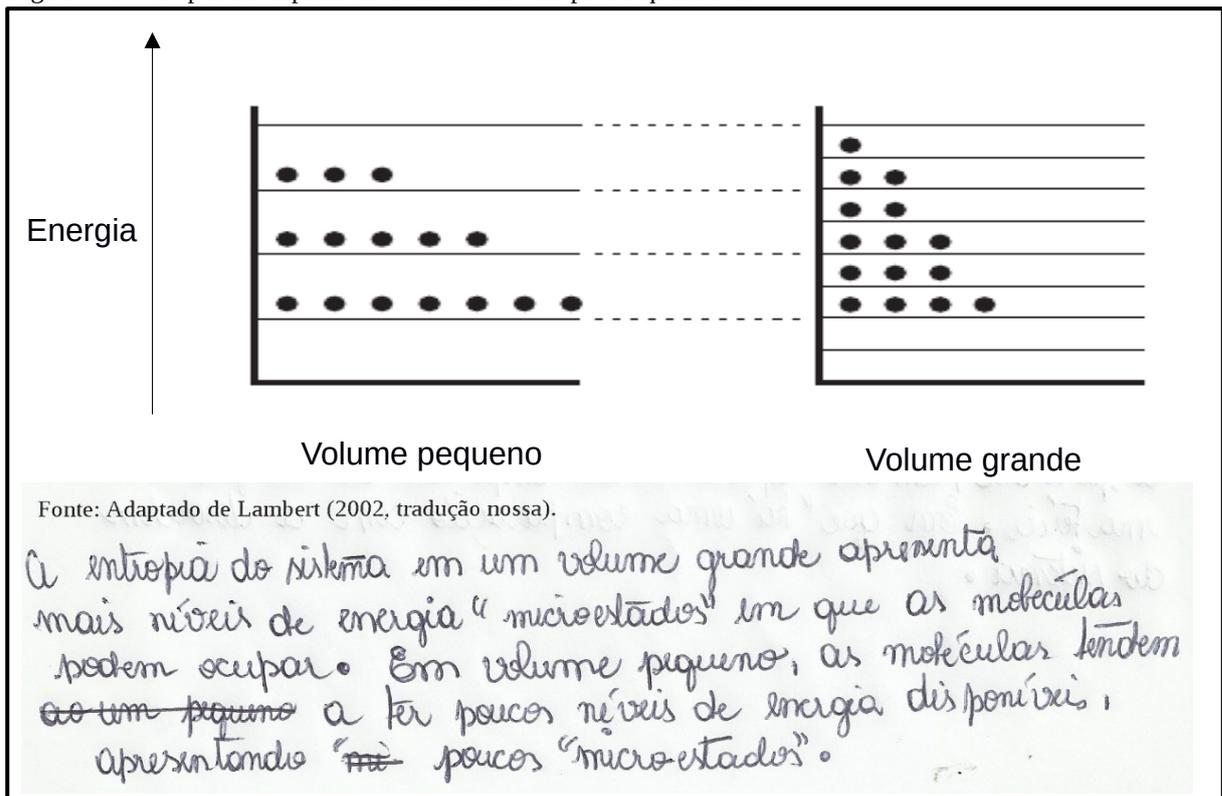
No sistema I os gases ocupam um volume menor e passam para uma condição de volume maior, logo, o aumento no número de microestados disponíveis acarreta em um

aumento na dispersão de energia por entre os níveis de energia. Já no sistema II o volume se mantém constante, logo não existe variação na entropia. Por fim, no sistema III os gases saem de um estado em que ocupam um volume maior para um estado em que o volume é menor, fazendo com que o número de microestados disponíveis seja menor e conseqüentemente a energia se torne menos dispersa nos níveis de energia, levando a uma diminuição da entropia. Uma interpretação similar poderia ser feita para responder a questão 6 cuja pergunta foi:

“A figura abaixo correlaciona a energia de um dado sistema com as possibilidades de ocupação do número médio de moléculas (representadas pelas esferas) nos diferentes níveis de energia. Diante disso, o que você pode dizer sobre a entropia do sistema.”

A partir da análise das respostas verificou-se que três alunos não conseguiram responder a pergunta. Apenas três outros alunos conseguiram estabelecer relações entre os níveis de energia, microestados e probabilidade. Todos eles da turma da tarde. Na Figura 12 é mostrada a resposta do aluno D_T7 que pode ser considerada correta.

Figura 12. Exemplo de resposta considerada correta para a questão 6.



Fonte: O autor (2020).

Percebe-se que o pesquisado fez associação as categorias 4 e 5, destacando o fato de em um volume maior mais níveis de energia estarem disponíveis para serem ocupados pelas moléculas. Outra duas respostas que merecem destaque são descritas abaixo:

“No volume menor ele (sistema) tem menos possibilidade de ocupação, menor entropia. No volume maior tem uma maior possibilidade de ocupação, maior entropia.” (D_{T2})

“Quanto maior o volume, mais energia será necessária para o sistema proporcionar as combinações necessárias para as moléculas, sendo assim uma maior entropia.”(D_{T3})

Vemos aqui que os discentes fizeram uma associação com a categoria 5, que está diretamente relacionado ao entendimento acerca dos microestados, visto que, diferentes combinações das moléculas em um mesmo nível de energia levam a diferentes microestados.

Em uma descrição mais detalhada sobre a questão, pode-se dizer que a representação das moléculas ocupando diferentes níveis de energia mostra que, para uma mesma energia, em um volume menor existem 4 níveis de energia disponíveis e no volume maior o dobro dessa quantidade. Como se pode ver no volume menor existe uma menor quantidade de níveis de energia para serem ocupados, logo, as moléculas se distribuem em um menor número de microestados. Já em uma volume maior, existem mais níveis de energia disponíveis, portanto, a energia se torna mais dispersa e conseqüentemente ocorre um aumento no número de microestados. Ainda que a energia seja a mesma nos dois processos, a possibilidade de ocupação de mais microestados e níveis de energia implica em um aumento na entropia do sistema.

Diante do que foi explanado na presente seção foi possível constatar que os alunos possuem algumas dificuldades de aprendizagem relacionadas aos aspectos microscópicos da matéria, principalmente no que diz respeito ao entendimento sobre os microestados e níveis de energia. Isso pode estar associado a própria natureza abstrata do conceito e a dificuldades de abstração adquiridas desde o ensino básico, ou ainda ao fato da disciplina de Físico-química I focar em uma abordagem voltada para a termodinâmica clássica, onde muitas vezes não é mencionado ou acrescentado a essa discussão elementos relacionados a termodinâmica estatística. E mesmo quando ocorre uma abordagem nesse sentido, talvez seja necessário que se estabeleça uma relação direta entre as propriedades macroscópicas estudadas e os aspectos microscópicos do conceito, de tal forma que favoreça uma associação

entre os macro e microestados e conseqüentemente uma melhor compreensão acerca do conceito de entropia por parte dos alunos.

5.4 Recursos didáticos como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem apresentadas pelos alunos

No presente tópicO descrevemos o resultado de um levantamento bibliográfico realizado na literatura com o intuito de elencar alguns recursos didáticos disponíveis que podem auxiliar os professores em sala de aula em uma abordagem voltada para a termodinâmica estatística, na tentativa de utilizá-los como potenciais minimizadores das dificuldades apresentadas pelos alunos. Esta investigação conjuntamente com as dificuldades de aprendizagem detectadas a partir da análise dos questionários auxiliou no desenvolvimento de uma seqüência didática, conforme consta no APÊNDICE C. A tabela 2, mostrada a seguir, resume alguns dos trabalhos que foram encontrados.

Tabela 2 – Publicações encontradas na literatura que apresentam recursos didáticos que podem ser utilizados em uma abordagem voltada para a termodinâmica estatística.

Título	Fonte	Ano de publicação
(P1) <i>Energy distributions in small populations: Pascal versus Boltzmann.</i>	Journal of Chemical Education	2010
(P2) Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no ensino médio.	Revista Brasileira de Ensino de Física	2013
(P3) Entropia estatística e o ensino da segunda lei da termodinâmica.	Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Ensino de Física - UFRJ	2016
(P4) As muitas interpretações da entropia e a Criação de um material didático para o ensino da interpretação probabilística da entropia.	Revista Química Nova na Escola	2018

Fonte: O autor (2020).

No P1 os autores utilizam um modelo de representação de pontos para simular a distribuição de energia em um sistema modelo constituído por poucas partículas. A partir desse sistema foi possível expandir para um número maior de partículas e elaborar uma gaussiana que vai de encontro ao que é esperado pela distribuição de Boltzmann (KUGEL; WEINER, 2010, tradução nossa).

Com relação às dificuldades apresentadas pelos alunos observadas em nossa pesquisa, percebeu-se no questionário 2 que os alunos não compreenderam o conceito de microestado, seja por não ter sido abordado em aula ou por não terem entendido o significado do termo, ainda que aparentemente se tenha mencionado em sala de aula. Diante disso, a partir da utilização do modelo mostrado na Figura 1 e descrito no referencial teórico, os alunos podem incrementar aspectos relacionados à probabilidade, tais como, permutação e produtório para prever o número de maneiras distintas em que a distribuição pode ser alcançada pela troca de partículas entre os níveis de energia. O somatório desse peso estatístico, W_i , fornece o número de microestados. Tomando como base um sistema ainda mais simples, considere o sistema modelo mostrado na Figura 13.

Figura 13. Distribuição de partículas em estados de energia para $N = 3$ e $E = 3$.

ϵ_j	Ω_1	Ω_2	Ω_3
3	•		
2		•	
1		•	•••
0	••	•	
W_i^{σ}	3	6	1

Fonte: Kugel e Weiner (2010).

O sistema acima possui 3 partículas, que representam o macroestado, e 3 unidades de energia. As partículas têm disponíveis quatro níveis de energia não degenerados com espaçamento integral, designados $\epsilon_0 = 0$, $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_2 = 2$ e $\epsilon_3 = 3$. São três diferentes distribuições para este sistema designadas por Ω_1 , Ω_2 e Ω_3 . Observe que cada distribuição tem $N = 3$ partículas com uma energia total de $E = 3$. Por exemplo, a distribuição Ω_1 tem uma partícula no estado ϵ_3 e duas no estado ϵ_0 . Nesta distribuição, toda a energia do sistema reside em uma partícula. A distribuição Ω_2 tem uma partícula em cada um dos três estados de energia mais baixos, ϵ_0 , ϵ_1 , e ϵ_2 . Finalmente, a distribuição Ω_3 tem todas as três partículas no estado ϵ_1 . A partir da equação (6) e ao trocar as partículas, é fácil ver que existem três

maneiras de atingir Ω_1 , seis maneiras de atingir Ω_2 e uma maneira de alcançar Ω_3 . Ou seja, $W_1 = 3$, $W_2 = 6$ e $W_3 = 1$. O somatório total, W_{total} , equivale ao número de microestados do sistema (KUGEL; WEINER, 2010, tradução nossa).

Esse tipo de abordagem pode ser feita com o professor desenhando no quadro branco ou entregando aos estudantes o quadro do sistema de notação de pontos sem os valores de W_i , para que eles possam descobrir os pesos estatísticos equivalentes a cada distribuição. Com isso, pode-se evitar equívocos como os apresentados pelo discente D_T7 que utilizou os termos níveis de energia e microestados como sinônimos, ao responder a questão 6 do segundo questionário.

Um outro recurso de baixo custo é apresentado em P2 e foi mencionado brevemente no tópico 3.3 da revisão de literatura. Nessa produção, os autores apresentam uma proposta de ensino de estatística da segunda lei para uso no ensino médio, ao utilizar uma garrafa PET, uma mangueira plástica flexível e bolas de gude para determinar os macro e microestados de um gás hipotético. Tal discussão surgiu a partir da situação-problema apresentada no tópico 3.4, no texto “*Cecília, o perfume e a segunda lei da termodinâmica*”.

Ainda que a proposta seja voltada para o ensino médio, é possível utilizá-la no ensino superior em cursos de Química ou Física, visto que, além de utilizar materiais de baixo custo e de fácil acesso, pode ser um recurso importante na construção dos conceitos de microestado e macroestado.

No experimento Souza *et al.* (2013, p. 4) destacam que,

[...] O comprimento da mangueira deve ser suficiente para conter 10 bolas de gude, de modo que possa ser inserido no gargalo cinco bolas pretas e cinco transparentes. [...] As bolas podem se mover livremente dentro da garrafa e o experimento consiste em trazer as bolas, pretas e transparentes, para dentro da mangueira, sacudindo a garrafa. Então, a ordem das bolas é observada.

Além do que foi destacado acima, deve-se supor algumas situações:

1. Bolas de gude pretas representam moléculas do gás e bolas de gude transparentes, espaços vazios entre moléculas;
2. Bolas de uma mesma cor são consideradas indistinguíveis entre elas. A distinção é, pois, apenas, entre bolas pretas e transparentes.
3. O sistema está, inicialmente, disposto de forma que as 5 bolas pretas estão em cima, na mangueira, e as 5 transparentes abaixo delas (Fig. 14A). Essa disposição é chamada “configuração padrão”.

4. A passagem do tempo é representada pelo ato de retornar as bolas à garrafa, sacudi-las e voltar com elas à mangueira. Assim, depois de algum tempo, o gás pode ser encontrado em qualquer configuração, como, por exemplo, na Figura 14B.

Figura 14. A) Configuração padrão. O gás ocupa um volume de 5 bolas, na parte superior da mangueira e B) uma possível configuração.



A)

B)

Fonte: Souza *et al.* (2013).

Sabendo disso, cada configuração diferente é um possível microestado do gás. As letras M e V são utilizadas para denotar uma bola preta (molécula) e uma bola transparente (espaço vazio), respectivamente. Logo, MMMVMMVVV e MVVVMMVMM representam microestados diferentes do gás e tanto bolas pretas como transparentes são indistinguíveis entre si. O macroestado será representado por um número atribuído a cada configuração; esse número será chamado macrovalor. Os macrovalores são comparados a estados macroscópicos de um gás, por exemplo, à energia correspondente a cada microestado molecular. Diferentes microestados podem estar associados a um mesmo macrovalor e, conseqüentemente, representarem o mesmo macroestado. Fazer essa comparação com o lançamento dos dois dados não-viciados e seus possíveis resultados pode ser interessante para uma melhor assimilação (SOUZA *et al.*, 2013). O macrovalor é definido da seguinte maneira:

A cada bola preta atribui-se 1 ponto multiplicado pela posição que a bola ocupa em relação à boca da mangueira; espaços vazios (bolas transparentes) não contribuem para o macrovalor. Assim, o macrovalor é a soma do número atribuído à posição de cada bola preta; por exemplo, o macrovalor do microestado MVVVVMMMM é

$10+4+3+2+1 = 20$. A configuração padrão tem macrovalor $10+9+8+7+6 = 40$; não é difícil concluir que esse é o maior possível macrovalor, pois é aquele em que as bolas pretas tem o maior número devido à posição delas no tubo (SOUZA *et al.*, 2013, p. 5).

Sendo assim, é possível obter diferentes configurações para os diversos microestados possíveis, conforme é apresentado na Tabela 3. Um estudo acerca da estatística dos micro e macroestados do gás também é feito pelos autores. Por exemplo, supondo que a partir da configuração padrão o gás evolva para outro estado qualquer, qual a probabilidade de que retorne à configuração padrão, aquela que maximiza o macrovalor?

O número total de microestados é

$$\frac{10!}{5!5!} = 252$$

em que o numerador é o número de permutações de 10 posições e o denominador é número de permutações de 5 bolas pretas. Se os microestados forem todos igualmente prováveis, a probabilidade de que o gás retorne ao microestado inicial será

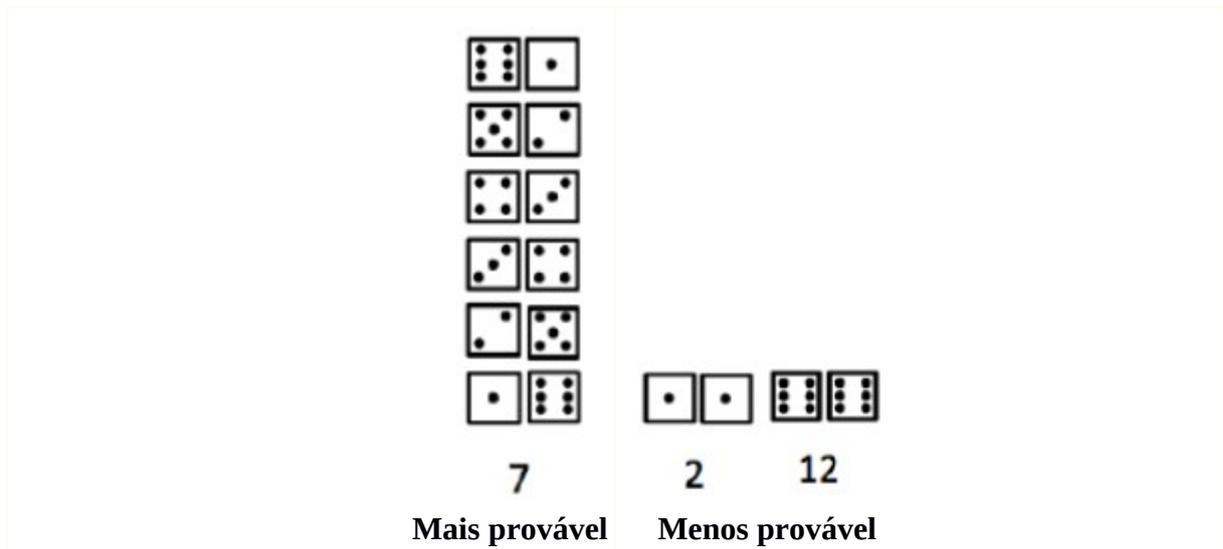
$$\frac{1}{252} \approx 0,0039 = 0,39\%$$

bem como será essa a probabilidade de ocorrer qualquer outro microestado, por exemplo, para o microestado MMVVVMMVM, que corresponde ao macrovalor $10+9+4+3+1 = 27$ existem outros 19 microestados possíveis logo temos

$$19 \times \frac{1}{252} \approx 0,075\% = 7,5\%$$

enquanto o macroestado correspondente ao macrovalor 40, associado a configuração inicial tem apenas 0,39% de ocorrer (SOUZA *et al.*, 2013).

Figura 15. Macroestado mais provável e microestados menos prováveis para o lançamento de dois dados.

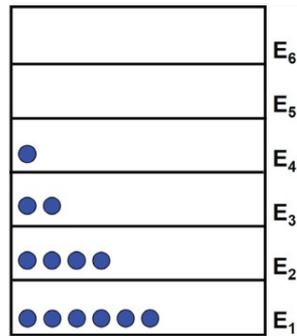


Fonte: Adaptado de Moura (2016).

A partir do uso dos recursos mencionados em P2 e P3, o professor pode solicitar que os alunos levem os materiais para a sala de aula para que juntos eles possam construir o aparato e brincar com as diversas possibilidades de combinação entre as bolas de gude, além de utilizar as possibilidades de resultados dos dados. Com esse tipo de material os conceitos de macro e microestado antes muito abstratos para os discentes e até desconhecidos, como no caso dos D_N , agora podem se tornar mais fáceis de assimilar. Dessa forma o comentário do aluno D_{N1} “[...] Para o macroestado conseguimos perceber essas propriedades a olho nu e no micro estamos falando de partículas”, poderia agora estabelecer uma relação direta entre os conceitos e formular uma resposta que deixasse mais claro o seu entendimento.

Por fim, no P4 é apresentado um material didático denominado “*Entropiômetro*” que pode ser utilizado para correlacionar a distribuição de moléculas entre os microestados e os níveis de energia com uma interpretação probabilística de entropia. Para isso, os autores elaboraram um material que se assemelha ao diagrama apresentado na Figura 16, que representa a distribuição das moléculas em determinados níveis de energia (CAVALCANTI *et al.*, 2018).

Figura 16. Distribuição das moléculas (esferas azuis) em diferentes níveis de energia.



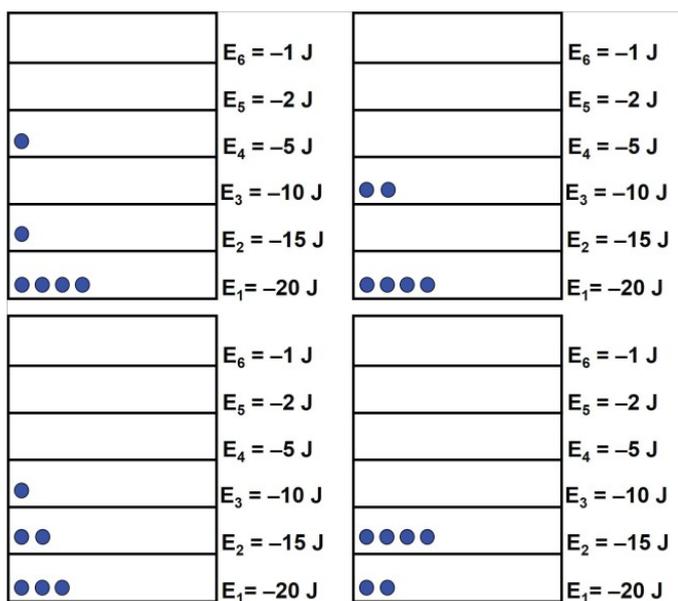
Fonte: Cavalcanti *et al.* (2018).

A energia total, E_T , pode ser descrita pela equação (16) levando-se em conta a quantidade de moléculas em cada nível i e a energia do nível, E_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6). Se cada esfera azul na Figura 17 representa 1 molécula, a energia total é dada por:

$$E_T = (6 \times E_1) + (4 \times E_2) + (2 \times E_3) + (1 \times E_4) \quad (16)$$

Conforme destacam os autores, podemos relacionar a energia cinética média, apresentada na equação (15), à distribuição das moléculas em seus diferentes níveis de energia. Supondo-se que um determinado recipiente contém 6 moléculas, e que sua energia é determinada como sendo -100 J (valor escolhido por razões pedagógicas, não representando com exatidão as energia de moléculas individuais, que se apresentam na ordem de 10^{-23} J), utilizando um diagrama de níveis de energia análogo ao apresentado na Figura 16, modificado apenas pela adição de valores hipotéticos de energia (em Joules), pode-se realizar a distribuição das 6 moléculas conforme mostra a Figura 17, considerando que cada um dos níveis apresentados é igualmente provável. Aplicando a equação (16), é fácil perceber que qualquer uma das maneiras de distribuir as moléculas (apresentadas na Figura 16) resulta em uma energia de -100 J. Cada uma destas maneiras de obter a energia total é chamada de microestado. Conclui-se que, nessa situação, 4 microestados diferentes conduzem à energia total observada (CAVALCANTI *et al.*, 2018).

Figura 17. Quatro possíveis microestados que levam à energia total de -100 J.



Fonte: Cavalcanti *et al.* (2018).

Para a construção do aparato experimental os autores utilizaram materiais de baixo custo, tais como: papelão, papel autoadesivo, pistola para aplicação de cola quente com os respectivos bastões e bolas de gude. A atividade proposta foi voltada para estudantes de graduação, sendo aplicada justamente em uma turma de Físico-química I, do curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – Campus Sousa, no primeiro semestre de 2017.

Em uma das atividades pediu-se que dois grupos de estudantes, denominados por G1 e G2, distribuíssem da maneira que pudessem visualizar 8 bolas de gude nos níveis de energia, objetivando obter uma energia de -130 kJ, conforme é mostrado na Figura 18.

Figura 18. “Entropiômetro” e algumas maneiras de organizar as moléculas de modo a obter a energia total de -130 kJ utilizando 5 níveis (acima, G1) e 8 níveis (abaixo, G2).



Fonte: Cavalcanti *et al.* (2018).

Com isso, de acordo com autores, os estudantes foram capazes de visualizar o fato de que níveis de energia mais próximos entre si (caixa vermelha) originam um número maior de maneiras de obter a mesma energia total.

No segundo questionário, o discente D_T7 relaciona a entropia ao grau de dispersão de energia do sistema, na questão 1 e na questão 5 associa o aumento de entropia ao fato de existir um número maior de moléculas no sistema que implicaria em uma maior quantidade de níveis de energia disponíveis. Já na questão 6 relaciona os níveis de energia aos microestados. O uso do “Entropiômetro” permite justamente conectar essas diferentes interpretações em termos dos microestados, níveis de energia e da dispersão de energia do sistema, visto que,

“[...] o aumento da entropia (e a tendência a espontaneidade) ocorre quanto maior for o número de maneiras de distribuir moléculas em seus diferentes níveis de energia. Esse entendimento da entropia relaciona-se muito bem com a noção de dispersão de energia [...], uma vez que um grande número de níveis sendo ocupados

claramente indicam uma energia total mais dispersa” (CAVALCANTI *et al.*, 2018, p. 169).

Uma outra informação não menos importante trazida pelos autores é a existência do portal Entropy Site (<http://entropysite.oxy.edu/>) que pode ser utilizado como fonte de pesquisa para os professores ao planejarem suas aulas. O site é totalmente dedicado a discutir e desmistificar o entendimento da entropia como uma medida do grau de desordem, além de trazer uma série de artigos publicados na literatura e materiais complementares em que o tema é abordado (CAVALCANTI *et al.*, 2018).

Diante do que foi explanado, a sequência didática apresentada no APÊNDICE C, visa assistir os(as) professores(as) que pretendem utilizar-se de uma abordagem de entropia voltada para a interpretação sob o ponto de vista de termodinâmica estatística. Os materiais didáticos existem e estão disponíveis na literatura para a comunidade científica cabe ao professor(a) empregá-los na sua metodologia para tornar o entendimento de um conceito tão importante, como o de entropia, mais prazeroso e acima de tudo menos desafiador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de pesquisa buscou investigar como a concepção dos estudantes de duas turmas de Físico-química I do curso de Química-licenciatura do Campus Agreste – UFPE acerca do nível microscópico da matéria pode influenciar no seu entendimento sobre o conceito de entropia.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica por trabalhos de conclusão de curso que abordassem o conceito e constatou-se que existe uma defasagem muito grande de trabalhos de conclusão de curso de química e física licenciaturas no Campus Agreste que abordam algum aspecto atrelado a entropia. Por tratar-se de um conceito tão importante que prediz informações a respeito da espontaneidade de um processo físico-químico os dados são preocupantes, inclusive do ponto de vista das concepções apresentadas pelos discentes investigados em nossa pesquisa e ressaltam a importância de se realizarem pesquisas sobre o tema na comunidade acadêmica.

A partir da análise dos questionários foi possível perceber que a utilização de analogias envolvendo objetos macroscópicos apenas reforçam a ideia da entropia em termos da desordem, fazendo com que os alunos adquiram uma concepção equivocada sobre o conceito. Além disso, os resultados mostraram que os alunos não conseguem relacionar o conceito de entropia com o nível microscópico da matéria, visto que, não compreendem o conceito de microestado e a grande maioria não faz associações com os níveis de energia, fatores que são essenciais para a construção do conceito de entropia sob a ótica da termodinâmica estatística.

Os resultados obtidos também auxiliaram na elaboração de uma sequência didática objetivando contemplar aspectos da termodinâmica estatística e análise combinatória a partir do uso de recursos didáticos disponíveis na literatura que podem ser utilizados pelos professores como potenciais minimizadores das dificuldades de aprendizagem observadas a partir da análise dos questionários.

Espera-se com essa proposição que os professores possam utilizar-se de metodologias que propiciem uma integração entre as abordagens do ponto de vista da termodinâmica clássica e estatística, recorrendo a analogias mais plausíveis, para favorecer a construção de um modelo conceitual de entropia coerente, enfatizando os aspectos históricos e microscópicos atrelados a este a partir do uso de recursos didáticos como os que foram mencionados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANGELI, C et al., Dependence of The Population on the Temperature in the Boltzmann Distribution: A Simple Relation Involving the Average Energy, **Journal of Chemical Education**, pp. A-F, November, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ed300886j>. Acesso em: 30 set. 2019.
- ATKINS, P.W.; PAULA, J. **Físico-química**, Vol. 2, 9 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- ATMANSPACHER, H. On Macrostates in Complex Multi-Scale Systems, **Journal Entropy**, 18, 426, pp. 1-22, November, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1099-4300/18/12/426>. Acesso em: 25 set. 2019.
- BAIN, K.; RODRIGUEZ, G.J.; TOWNS, M. H. Chemistry and Mathematics: Research and Frameworks To Explore Student Reasoning, **Journal of Chemical Education**, pp. A-K, August, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00523>. Acesso em: 25 set. 2019.
- BALL, D. W. **Físico-Química**, Vol 1, 1 ed, São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- BARDIN, L. **Análise do Conteúdo - Edição revista e ampliada**. Tradução: L. A. RETO; A. PINHEIRO. ---- São Paulo: Edições 70, 2011. (Obra original publicada em 1977)
- CAREGNATO, R.C.A.; MUTTI, R. Pesquisa qualitativa: análise do discurso *versus* análise de conteúdo. **Texto Contexto Enferm**, Florianópolis, 2006, Out-Dez; 15(4): 679-84.
- CARSON, E. M.; WATSON, J. R. Undergraduate students' understandings of entropy and Gibbs free energy. **University Chemistry Education**, v. 6, p. 4, 2002.
- 3
6
- CARUZO, A. C.; NEVES, K. F.; TEIXEIRA, R. R. P. A entropia e o triângulo de pascal, **Revista Tecnológica** 16: 11 - 25, 2007. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/4388>. Acesso em: 25 set. 2019.
- CASTELLAN, G.W. **Fundamentos de físico-química**, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CAVALCANTI, H. L. B. et al. As Muitas Interpretações da Entropia e a Criação de Um Material Didático Para o Ensino da Interpretação Probabilística da Entropia. **Química Nova na Escola**, v. 40, p. 169–177, 2018. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/artigos/06-CCD-71-17.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2019.
- COVOLAN, S.C.T.; SILVA, D. A entropia no ensino médio: utilizando concepções prévias dos estudantes e aspectos da evolução do conceito. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 1, p. 98-117, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v11n1/09.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- DAHMEN, S.R. A obra de Boltzmann em Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, 2006, p. 281 – 295. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v28n3/a05v28n3.pdf>. Acesso em: 22 de jun. 2019.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (org.). **Métodos de pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

GIL, A.C., **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª edição, Editora Atlas, São Paulo, 2002.

JUSTI, R., Modelos e Modelagem no Ensino de Química: Um olhar sobre aspectos essenciais pouco discutidos. *In*: MALDANER, O. A., SANTOS, L. P. (org.). **Ensino de química em foco**. – Ijuí: ED. Unijuí, 2010. – 368 p. – (Coleção educação em química).

JUSTI, R. ; MENDONÇA, P. C. C. Usando Analogias com Função Criativa: Uma nova estratégia para o ensino de química. **Educación Química**, v. 1, p. 24–29, 2008.

KOZLIAK, E. I. Introduction of Entropy via the Boltzmann Distribution in Undergraduate Physical Chemistry: A Molecular Approach, **Journal of Chemical Education**, v. 81, pp. 1595-1598, November 2004. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed081p1595>. Acesso em: 18 jun. 2019.

KOZLIAK, E. I.; LAMBERT, F. L. “Order-to-Disorder” for Entropy Change? Consider the Numbers! **The Chemical Educator**, n. January, p. 24–25, 2005.

KUGEL, R. W.; WEINER, P. A. Energy Distributions in Small Populations: Pascal versus Boltzmann, **Journal of Chemical Education**, Vol. 87, N. 11, pp. 1200-1205, November, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ed1003838>. Acesso em: 25 set. 2019.

LAMBERT, F. L. Shuffled Cards, Messy Desks, and Disorderly Dorm Rooms - Examples of Entropy Increase? Nonsense!, *Journal of Chemical Education*, Vol. 76, Nº 10, pp. 1385-1387, October, 1999. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ed076p1385>. Acesso em: 30 set. 2019.

LIMA, N. C. G., **Análise dos equívocos relacionados ao processo de ensino e aprendizagem do conceito de entropia em curso de química do nível superior**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química-licenciatura) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

MCQUARRIE, D. A.; SIMON J. D. **Physical chemistry: a molecular approach**. University Science Books, 1997.

MOURA, M. **Entropia Estatística e o Ensino da Segunda Lei da Termodinâmica**. 2016. Dissertação (Mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Rio de Janeiro, 2016.

PESQUISA bibliográfica, análise documental e pesquisa participante/ação. Experimentando métodos. Universidade Federal Fluminense, Estudos de mídia, Niterói – RJ, 2012. Disponível em: <http://www.midia.uff.br/metodologia/?p=11>. Acesso em: 18 de mai. 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa**. 2. ed. Rio Grande do Sul, 2013.

SILVA, A. A., **As Várias Facetas do Termo Entropia. Será Difícil Entender Este Conceito?**2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física-licenciatura) –

Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2007.

SIRHAN, G. Learning Difficulties in Chemistry: An Overview, **Journal of Turkish Science Education**, Vol. 4, N. 2, pp. 2-20, September, 2007. Disponível em: <http://www.tused.org/internet/tufed/arsiv/v4/i2/metin/tusedv4i2s1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2019.

SOUZA, G. H. L., **Categorização de erros em atividades avaliativas sobre as leis termodinâmicas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química-licenciatura) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

SOUZA, P. V. S.; DIAS, P. M.C.; SANTOS, F. M. P. Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n2/22.pdf>. Acesso em: 17 out. 2019.

APÊNDICES



Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Campus Agreste – CA
Química-licenciatura



APÊNDICE A: Questionário acerca das concepções prévias dos discentes

Nome fictício: _____

Obrigado por responder o presente questionário, você está contribuindo com o desenvolvimento da ciência e ajudando na formação de aluno de graduação. Apenas para te lembrar:

- De forma alguma as suas respostas serão vinculadas a você, ou expostas de maneira pejorativa, ou ainda apresentadas à professora da disciplina.
- Desta forma, fique à vontade para responder de maneira espontânea e verdadeira cada uma das perguntas.

- 01.** É a primeira vez que você cursa a disciplina Físico Química I?
- 02.** Você já ouviu falar do conceito de entropia antes? Se sim, onde?
- 03.** O que você entende pelo conceito de entropia?
- 04.** Você consegue relacionar o fenômeno da entropia com algum processo do seu cotidiano?
- 05.** Você tem interesse em participar de uma oficina sobre o assunto, com carga horária de 30h?



Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Campus Agreste – CA
Química-licenciatura



APÊNDICE B: Questionário 2

Nome fictício: _____

Obrigado por responder o presente questionário, você está contribuindo com o desenvolvimento da ciência e ajudando na formação de aluno de graduação. Apenas para te lembrar:

- De forma alguma as suas respostas serão vinculadas a você, ou expostas de maneira pejorativa, ou ainda apresentadas à professora da disciplina.
- Desta forma, fique à vontade para responder de maneira espontânea e verdadeira cada uma das perguntas.

01. O que você entende pelo conceito de entropia?

02. Você consegue relacionar o fenômeno da entropia com algum processo do seu cotidiano?

03. Comumente, são utilizadas analogias para exemplificar a entropia. Considerando que o quarto mostrado abaixo é o seu sistema o que você diria sobre a entropia desse sistema? É uma analogia plausível? Se sim, por quê? Se não, qual analogia melhor se encaixaria para exemplificar o fenômeno da entropia? Justifique.

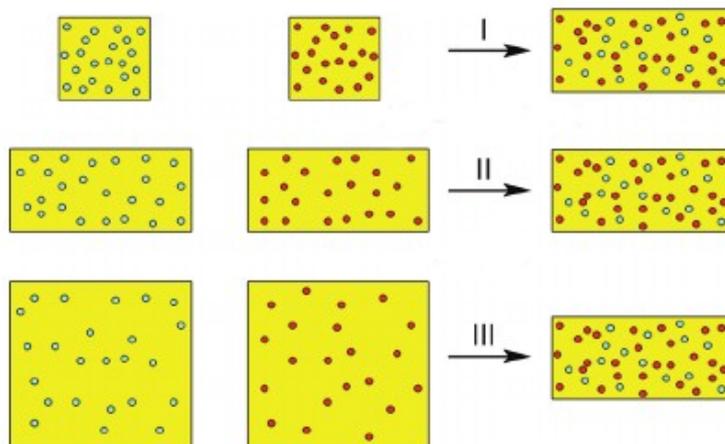


Fonte: <https://tribunadoceara.com.br/blogs/divagando/cotidiano/por-que-guardar/>

04. A) De maneira simples, o que você entende por um estado termodinâmico de um sistema?

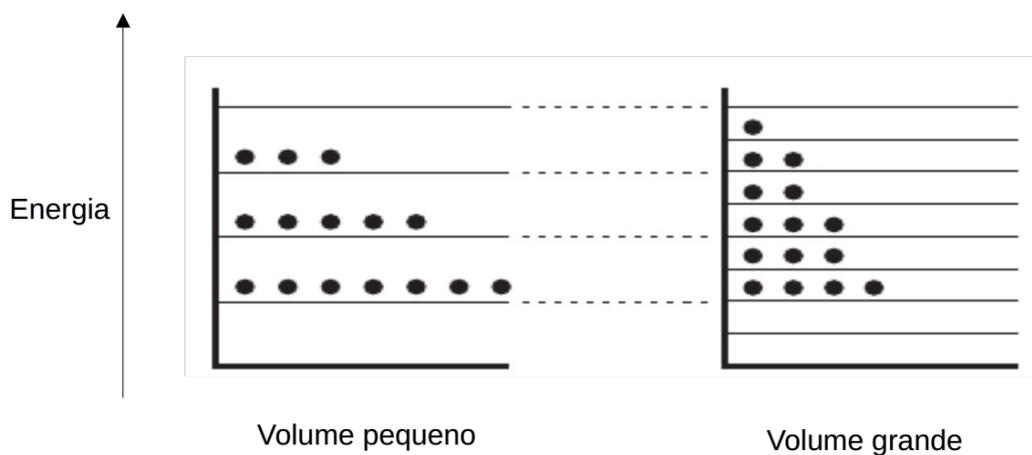
B) Como você relacionaria a resposta anterior aos conceitos de macroestados e microestados?

05. Considerando o processo de mistura de dois gases ideais mostrado na figura abaixo, o que você tem a dizer sobre a entropia dos sistemas I, II e III no final do processo? Justifique.



Fonte: Adaptado de Ben-Naim (2012).

06. A figura abaixo correlaciona a energia de um dado sistema com as possibilidades de ocupação do número médio de moléculas (representadas pelas esferas) nos diferentes níveis de energia. Diante disso, o que você pode dizer sobre a entropia do sistema.



Fonte: Adaptado de Lambert (2002, tradução nossa).



Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Campus Agreste – CA
Química-licenciatura



APÊNDICE C: Sequência Didática

1. Dados de identificação

Disciplina: Físico-química I

Tema: Entropia - Desmistificando conceitos

Proponente: Ítalo Macêdo Gonçalves

Duração: 500 min

2. Conhecimentos prévios

- As 3 Leis Fundamentais da Termodinâmica. Definições de sistema, tipos de sistema, tipos de fronteiras ou contornos, calor, trabalho, energia interna, entropia, funções de estado.
- Noções básicas de probabilidade, permutação e combinação.

3. Planejamentos das aulas

Planejamento das aulas nº. 01 – 10		
<p>Objetivo Geral: Introduzir o conceito de entropia do ponto de vista da termodinâmica clássica e estatística e propor uma abordagem que integre conhecimentos de física e matemática para a interpretação de fenômenos e situações-problema que envolvam a físico-química.</p>		
1º MOMENTO		
Atividade nº. 1	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Provocação dos participantes a partir da reflexão acerca de algumas citações de livros e teóricos da área que remetem ao conceito de entropia associadas ao termo “desordem” e exemplos de analogias comumente utilizadas.	Entropia e analogias no ensino de química.	20 min
Objetivo: Refletir sobre como o conceito de entropia é trazido em alguns livros didáticos e as principais analogias comumente utilizadas.		

Atividade nº. 2	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Exposição e discussão da linha do tempo com os principais marcos do desenvolvimento da termodinâmica.	<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas térmicas; • Princípio e ciclo de Carnot; • 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica. 	50 min
Objetivo: Conhecer os principais marcos do desenvolvimento da termodinâmica até se estabelecer como ciência.		
Atividade nº. 3	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Discorrer sobre os principais teóricos e aplicações das abordagens da termodinâmica clássica e estatística.	<ul style="list-style-type: none"> • 1ª, 2ª e 3ª Leis da Termodinâmica; • Entropia estatística. 	50 min
Objetivo: Distinguir entre as abordagens clássica e estatística da termodinâmica.		
Recursos didáticos	Projeter e quadro branco.	
Espaço físico	Sala de aula.	
Organização dos alunos nas atividades	Sentados em fileira.	
2º MOMENTO		
Atividade nº. 4	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Utilização de dados não-viciados e bexigas de ar para a construção dos conceitos de macro e microestados.	<ul style="list-style-type: none"> • Estados termodinâmicos de um sistema; • Macroestados; • Microestados 	60 min
Objetivo: Compreender os conceitos de macroestados e microestados.		
Recursos didáticos	Projeter, quadro branco, dados e bexigas de ar.	
Espaço físico	Sala de aula.	
Organização dos alunos nas atividades	Sentados em círculo.	
3º MOMENTO		
Atividade nº. 5	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Interpretação de situações-problema a partir do uso de aparatos experimentais que facilitarão o entendimento do conceito de entropia e sua natureza estatística.	<ul style="list-style-type: none"> • Microestados; • Níveis de energia e dispersão de energia; • Populações; • Natureza estatística da 2ª Lei da Termodinâmica. 	60 min
Objetivo: Observar a importância do uso de materiais lúdicos para o entendimento de conceitos abstratos.		
Recursos didáticos	Projeter, quadro branco e a utilização dos recursos destacados nas publicações da Tabela 3.	
Espaço físico	Sala de aula.	
Organização dos alunos nas atividades	Sentados em grupo.	
4º MOMENTO		
Atividade nº. 6	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Abordagem do conceito de entropia	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidade; • Permutação; 	

agregando conhecimentos de probabilidade e estatística.	<ul style="list-style-type: none"> • Combinação; • Distribuição estatística. 	70 min
Atividade nº. 7	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Inserção dos conceitos de população e níveis de energia introduzindo a distribuição de Boltzmann e a notação de pontos.	<ul style="list-style-type: none"> • População; • Níveis de energia; • Distribuição de Boltzmann. 	70 min
Objetivo: Correlacionar o conceito de entropia com a probabilidade de ocupação e as possíveis distribuições estatísticas através dos níveis acessíveis de energia de um dado sistema.		
Recursos didáticos	Projetor, quadro branco e a utilização dos recursos destacados nas publicações da Tabela 3.	
Espaço físico	Sala de aula.	
Organização dos alunos nas atividades	Sentados em grupo.	
5º MOMENTO		
Atividade nº. 8	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Fazer uso de exemplos físico-químicos envolvendo mudança de fase, expansão de um gás no vácuo e alteração de temperatura a partir da interpretação termodinâmica estatística do conceito.	Atividades 4-7.	50 min
Objetivo: Utilizar exemplos físico-químicos a partir dessa abordagem.		
Atividade nº. 9	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Ressignificação do conceito de entropia e análises de alguns exemplos químicos.	Atividades 5, 7 e 8.	50 min
Atividade nº. 10	Conteúdos Abordados	Tempo Didático
Reanalise da atividade nº 1 e proposição de novas analogias e reestruturação dos conceitos.	Atividades 5, 7 e 8.	20 min
Objetivos: Reconhecer que a probabilidade e a termodinâmica estatística são essenciais para o entendimento do conceito de entropia e estabelecer relação entre as analogias sobre entropia utilizando objetos macroscópicos e os aspectos atômico-moleculares.		
Recursos didáticos	Projetor, quadro branco e a utilização dos recursos destacados nas publicações da Tabela 3.	
Espaço físico	Sala de aula.	
Organização dos alunos nas atividades	Sentados em grupo.	

4. Técnica de avaliação

- Avaliações escritas com questões dissertativas (Reaplicação do questionário 2);
- Avaliações contínuas baseadas na participação do aluno;
- Resolução de situações-problema aplicadas à Físico-química, probabilidade e estatística.

5. Bibliografia básica

ATKINS, P.W.; PAULA, J. **Físico-química**, Vol. 2, 9 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.

BALL, D. W. **Físico-Química**, Vol 1, 1 ed, São Paulo: Cengage Learning, 2016.

CASTELLAN, G.W. **Fundamentos de físico-química**, Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MCQUARRIE, D. A.; SIMON J. D. **Physical chemistry: a molecular approach**. University Science Books, 1997.

6. Bibliografia complementar

ANGELI, C et al., Dependence of The Population on the Temperature in the Boltzmann Distribution: A Simple Relation Involving the Average Energy, **Journal of Chemical Education**, pp. A-F, November, 2013.

CAVALCANTI, H. L. B. et al. As Muitas Interpretações da Entropia e a Criação de Um Material Didático Para o Ensino da Interpretação Probabilística da Entropia. **Química Nova na Escola**, v. 40, p. 169–177, 2018.

JUSTI, R. ; MENDONÇA, P. C. C. Usando Analogias com Função Criativa: Uma nova estratégia para o ensino de química. **Educación Química**, v. 1, p. 24–29, 2008.

KOZLIAK, E. I. Introduction of Entropy via the Boltzmann Distribution in Undergraduate Physical Chemistry: A Molecular Approach, **Journal of Chemical Education**, v. 81, pp. 1595-1598, November 2004.

KUGEL, R. W.; WEINER, P. A. Energy Distributions in Small Populations: Pascal versus Boltzmann, **Journal of Chemical Education**, Vol. 87, N. 11, pp. 1200-1205, November, 2010.

LAMBERT, F. L. Entropy Is Simple, Qualitatively. **Journal of Chemical Education**, v. 79, n. 10, p. 1241, 2002.

LAMBERT, F. L. Shuffled Cards, Messy Desks, and Disorderly Dorm Rooms - Examples of Entropy Increase? Nonsense!, **Journal of Chemical Education**, Vol. 76, Nº 10, pp. 1385-1387, October, 1999.

LIMA, N. C. G., **Análise dos equívocos relacionados ao processo de ensino e aprendizagem do conceito de entropia em curso de química do nível superior**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química-licenciatura) – Universidade

Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

MOURA, M. **Entropia Estatística e o Ensino da Segunda Lei da Termodinâmica**. 2016. Dissertação (Mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Rio de Janeiro, 2016.

SOUZA, P. V. S.; CARDOZO DIAS, P. M.; DOS SANTOS, F. M. P. Ensinando a natureza estatística da segunda lei da termodinâmica no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, 2013.