



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)/
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT) em implantação
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA EM REDE
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

OCIONE PEREIRA DOS SANTOS

**UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN
SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

CATALÃO – GO

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE FÍSICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

OCIONE PEREIRA DOS SANTOS

3. Título do trabalho

UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

https://sei.ufg.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=3893726&infra_sistema=1... 1/2

14/03/2023 13:54

SEI/UFG - 3593254 - Termo de Ciência e de Autorização (TECA)



Documento assinado eletronicamente por **OCIONE PEREIRA DOS SANTOS, Discente**, em 13/03/2023, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio Santiago Espinoza Ortiz, Professor do Magistério Superior**, em 14/03/2023, às 13:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0,

informando o código verificador **3593254** e o código CRC **9153DEE9**.

OCIONE PEREIRA DOS SANTOS

**UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN
SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede, do Instituto de Física, da Universidade Federal de Goiás (UFG) / Universidade Federal de Catalão (UFCAT) em implantação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Educação Básica. Linha de pesquisa: Física no Ensino Médio.

Orientador: Professor Doutor Júlio Santiago Espinoza Ortiz

CATALÃO – GO

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Santos, Ocione Pereira dos
Uma Metodologia de Ensino para Entropia de Boltzmann
Subsidiada pela Teoria da Aprendizagem Significativa / Ocione
Pereira dos Santos. - 2023.
188, CLXXXVIII f.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Santiago Espinoza Ortiz.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Instituto
de Física, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
em Rede, Catalão, 2023.
Apêndice.

1. Entropia. 2. Aprendizagem Significativa. 3. História da
Termodinâmica. 4. Atividade Experimental. I. Ortiz, Júlio Santiago
Espinoza, orient. II. Título.

CDU 53



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE FÍSICA
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 01 da sessão de Defesa de Dissertação de **OCIONE PEREIRA DOS SANTOS**, que confere o título de **Mestre em Ensino de Física**, na área de concentração Física na Educação Básica.

Aos doze dias do mês de janeiro de dois mil e vinte três, a partir das 10:00 horas na Sala 267 - Bloco M, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA**” nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação stricto sensu em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses(BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho(UFG), outra no corpo do texto(UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Julio Santiago Espinoza Ortiz (PPGEF/UFCAT)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Eberth de Almeida Corrêa (Departamento de Física/UnB-Gama)**, membro titular externo; Professor Doutor **Denis Rezende de Jesus (PPGEF/UFCAT)**, membro titular interno. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato () **Aprovado** () **Reprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Julio Santiago Espinoza Ortiz**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos doze dias do mês de janeiro de dois mil e vinte três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Julio Santiago Espinoza Ortiz, Professor do Magistério Superior**, em 18/02/2023, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eberth de Almeida Corrêa, Usuário Externo**, em 28/02/2023, às 09:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Denis Rezende De Jesus, Professor do Magistério Superior**, em 28/02/2023, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3509356 e o código CRC C59F8287.

NOTA

Os programas de Pós-Graduação *stricto sensu* em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados a CAPES, continuam provisoriamente vinculados a Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha esposa Elisa
e aos meus filhos Natália e Marcelo
que sempre me apoiaram
durante a concretização deste sonho.*

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador professor Dr. Júlio Santiago Espinoza Ortiz, pelo seu comprometimento, sua prestatividade e por estar sempre à disposição quando solicitado, que com suas sugestões inteligentes e inovadoras prestou grandes contribuições a este trabalho.

À Sociedade Brasileira de Física (SBF) pela iniciativa, desenvolvimento e manutenção do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

À Deus e a minha esposa Elisa Ferreira da Costa Santos, aos meus filhos Natália e Marcelo, e a minha mãe Cândida Brito dos Santos por todo carinho e estímulo.

Ao professor Dr. Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha do Instituto de Física - UFG, que me orientou no meu trabalho de conclusão de curso da graduação em Licenciatura em Física, o qual serviu de norte para que o presente trabalho fosse idealizado.

Aos professores Isaque Alcântara, Mário e Matheus por todo apoio e, principalmente, por ceder parte de suas aulas da Trilha Ciência da Natureza do Colégio da Polícia Militar Mansões Paraíso da Cidade de Aparecida de Goiânia - GO, para que eu pudesse aplicar o Produto Educacional, bem como a toda equipe diretiva desta escola e aos alunos participantes desta pesquisa, pela dedicação e comprometimento.

Aos professores Dr. Denis Rezende de Jesus e Dr. Jalles Franco Ribeiro da Cunha do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (MNPEF) – da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás pelas contribuições prestadas a esta Dissertação durante o exame de qualificação.

Aos professores que ministraram as disciplinas no decorrer do curso, empenhados ao máximo pela qualificação dos seus trabalhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (MNPEF) – da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás pelo oferecimento das disciplinas e organização da grade curricular.

Aos colegas de graduação pela companhia durante todo tempo de curso, mesmo sendo de forma remota por causa da Pandemia Covid – 19, em especial ao meu companheiro de viagem nos poucos dias que fomos para Catalão, Danilo Carvalho.

Ao meu querido amigo Jeann Cássio Balduino Monteiro que desde a graduação forma comigo uma amizade de muita parceria e, principalmente, pelo suporte que me deu neste trabalho e nas disciplinas do curso.

RESUMO

UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Ocione Pereira dos Santos

Orientador:

Prof. Dr. Júlio Santiago Espinoza Ortiz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (MNPEF) – da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Tomando conhecimento da forma como a entropia é abordada nos principais livros textos do ensino médio e das dificuldades que professores de Física desse nível de ensino enfrentam ao tentar fazer a transposição didática deste conceito, neste trabalho propomos uma sequência didática envolvendo a História da Ciência e a Atividade Experimental, baseada nos fundamentos da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e no Modelo de Gowin, procurando uma alternativa à construção e o entendimento do conceito de entropia que auxilie tanto aos professores quanto aos alunos. Toda essa estratégia didática se materializou por meio de um Produto Educacional que foi aplicado aos alunos da Trilha Ciência da Natureza do 2º Ano do Novo Ensino Médio do Colégio Estadual da Polícia Militar da Cidade de Aparecida de Goiânia – GO, onde inicialmente uma breve História da Termodinâmica foi apresentada, em seguida de forma mais conceitual, abrangente e com o auxílio de métodos matemáticos, os principais tópicos desta ciência foram abordados e, finalmente, usando argumentos estatísticos, foi desenvolvida uma atividade prática. Por fim no procedimento de coleta de dados foi utilizado questionários avaliativos. E de posse desses dados, por meio de tabelas e gráficos, os resultados foram analisados e as conclusões apresentadas.

Palavras-chave: Entropia, Aprendizagem Significativa, História da Termodinâmica e Atividade Experimental.

Catalão – GO,

Agosto de 2023

ABSTRACT

A TEACHING METHODOLOGY FOR BOLTZMANN ENTROPY SUBSIDIED BY THE THEORY OF SIGNIFICANT LEARNING

Ocione Pereira dos Santos

Advisor:

Prof. Dr. Júlio Santiago Espinoza Ortiz

Master's Thesis presented to the Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (MNPEF) – da Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás, as part of the requirements for obtaining the title of Mestre em Ensino de Física.

Knowing the way entropy is approached in the main high school textbooks and the difficulties that Physics teachers at this level of education face when trying to make the didactic transposition of this concept, in this work we propose a didactic sequence involving the History of Science and the Experimental Activity, based on the foundations of Ausubel's Theory of Meaningful Learning and on the Gowin Model, looking for an alternative to the construction and understanding of the concept of entropy that helps both teachers and students. All this didactic strategy was materialized through an Educational Product that was applied to the students of the Nature Science Trail of the 2nd Year of the New High School of the State College of the Military Police of the City of Aparecida de Goiânia - GO, where initially a brief History of the Thermodynamics was presented, then in a more conceptual and comprehensive way and with the help of mathematical methods, the main topics of this science were approached and, finally, using statistical arguments, a practical activity was developed. Finally, in the data collection procedure, evaluative questionnaires were used. And with this data, through tables and graphs, the results were analyzed and the conclusions presented.

Keywords: Entropy, Meaningful Learning, History of Thermodynamics and Experimental Activity.

Catalão – GO,

August of 2023

SUMÁRIO

Introdução.....	9
Capítulo 1: Termodinâmica: Fundamentação teórica.....	11
1.1 Entropia: Fundamentação teórica.....	12
Capítulo 2: Revisão da literatura.....	14
2.1 Uso da história da ciência como estratégia didática.....	14
2.2 Atividade experimental como estratégia didática.....	15
2.3 Trabalhos que abordaram o conceito de entropia.....	17
Capítulo 3: Fundamentação teórica.....	19
3.1 Teoria da Aprendizagem Significativa.....	19
3.2 A Teoria da Aprendizagem Significativa no que diz respeito ao ensino de Física.....	26
3.3 Modelo de Gowin e seu processo de ensino e aprendizagem.....	27
Capítulo 4: Sequência didática para inserção do conceito de entropia.....	30
4.1 Abordagem histórica.....	30
4.2 Abordagem conceitual – Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica.....	36
4.2.12 Abordagem estatística do conceito de entropia.....	52
4.2.13 Entropia na Teoria da Informação.....	61
4.2.14 Entropia nos fenômenos sociais.....	63
4.2.15 Princípio da degradação da energia: Uma consequência da entropia.....	64
4.2.16 Seta do tempo.....	66
4.3 Abordagem experimental.....	66
Capítulo 5: Metodologia e análise dos resultados.....	68
5.1 Produto Educacional: Definição, materiais utilizados e aplicação.....	68
5.2 Análise das informações coletadas pelo questionários pré-teste.....	74
5.3 Abordagens histórica, conceitual e atividade experimental.....	78
5.4 Análise das informações coletadas pelo questionários pós-teste.....	85
5.5 Classificação dos resultados obtidos.....	90
5.6 Total dos pares de valores obtidos pelos alunos no lançamento dos dois Dados.....	92
Capítulo 6: Considerações finais.....	94
Referências bibliográficas.....	97
Apêndice A: Questionário pré – teste.....	101
Apêndice B: Questões pré e pós – lançamentos dos dados.....	105
Apêndice C: Tabela 01.....	108
Apêndice D: Tabela 02.....	109
Apêndice E: Questionário pós-teste.....	110
Apêndice F: Produto Educacional.....	114

INTRODUÇÃO

Desde cedo, ainda como aluno, antes da graduação, percebi a importância da Termodinâmica na formação do estudante do Ensino Médio. Foi movido por esta inquietação que no ano de 2009 iniciei o curso de Licenciatura em Física na Universidade Federal de Goiás, local em que, com a orientação do Prof. Dr. Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha, pude elaborar meu Trabalho de Conclusão de Curso versando sobre o Ensino do Conceito de Entropia no Ensino Médio, e usando como estratégia de didática a História da Ciência. Entretanto, minha abordagem se concentrou na definição do conceito de entropia feita por Clausius.

Com o intuito de aprofundar ainda mais neste projeto, no início do ano de 2020 ingressei no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), onde tive a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos em relação aos conceitos da Termodinâmica Estatística nas aulas ministradas pelo Prof. Dr. Julio Santiago E. Ortiz, que, de forma muito prestativa, prontificou-se a me orientar no desenvolvimento do presente projeto, que segue o mesmo objetivo do primeiro, mas numa versão mais abrangente, e contando com uma sequência didática que envolve, além da História da Termodinâmica, uma Atividade Experimental que teve como objetivo fazer a inserção do conceito de entropia no Ensino Médio, contudo, desta vez, fazemos uma abordagem Estatística deste conceito. O foco aqui consistiu em fazer, de forma simples, por meio de uso de noções básicas de métodos estatísticos, a introdução do conceito de entropia de Boltzmann no Ensino Médio, que muitas vezes, quando não é deixado de ser abordado por completo nos livros didáticos desta etapa da educação básica brasileira, é tratado de forma muito superficial, dificultando, assim, a assimilação pelos alunos desse conhecimento específico tão primordial para compreensão do mundo a sua volta, principalmente, nos dias atuais onde tanto se fala em crises ambientais reveladas por meios de suas faces mais sensíveis ao ser humano, que são as crises hídrica e energética.

Entretanto, conforme a Teoria da Aprendizagem Significativa, é necessário que os alunos tenham conhecimentos prévios para que eles possam aprender significativamente, motivo pelo qual pensando em melhorar a qualidade desses conhecimentos que esses alunos provavelmente tenham adquiridos durante, principalmente, o período de formação de conceitos como veremos no capítulo que trata desta teoria de aprendizagem, foi feita durante a aplicação do Produto Educacional, que traz nossa sequência didática, a inserção dos organizadores prévios, por meio do ensino dos conceitos iniciais da termodinâmica em paralelo com a apresentação da História da Termodinâmica, passando pela entropia de Clausius, para somente depois ensinar a esses estudantes a entropia de Boltzmann.

É nesse contexto que definimos a problematização deste projeto que busca responder os seguintes questionamentos: Qual seria a contribuição da História da Ciência e da Atividade Experimental no processo de ensino aprendizagem do conceito de entropia estatístico no ensino médio? E como planejar uma estratégia didática de apresentação de conteúdos de tal forma a fazer com que os estudantes compreendam de maneira satisfatória o conceito de entropia estatístico?

Questionamentos esses que nos remetem ao objetivo geral que é usar a História da Ciência e a Atividade Experimental subsidiadas pela aprendizagem significativa de Ausubel e pelo modelo de Gowin como recursos didáticos facilitadores e complementares no ensino do conceito de entropia estatístico, e aos objetivos específicos que são: Facilitar o entendimento do conceito de entropia estatístico, tentar desfazer concepções distorcidas do conceito de entropia e elaborar um Texto Didático como Produto Educacional usando como estratégias didáticas a História da Ciência e a Atividade Experimental respectivamente para o ensino da entropia estatística.

Com esse objetivo, este trabalho traz no capítulo 1 as fundamentações teóricas da termodinâmica e da entropia. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica envolvendo a História da Ciência, a Atividade Experimental e o conceito de Entropia. No capítulo 3 discorremos sobre a fundamentação teórica em relação a aprendizagem significativa de Ausubel e do modelo de Gowin. No capítulo 4 é apresentada a sequência didática. Já no capítulo 5, a metodologia de aplicação do produto educacional e a análise dos resultados são expostas. E por fim, no capítulo 6, temos as considerações finais.

CAPÍTULO 1: TERMODINÂMICA - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tratando-se da Termodinâmica, uma expressão formada por duas palavras de origens gregas – *therme* e *dynamics* – que significam, respectivamente, calor e potência, esta representa um ramo da Física Térmica considerada de difícil definição, tendo em vista a complexidade dos fenômenos por ela estudada.

Para Tipler (1976) a termodinâmica tem como finalidade estudar *os “processos de transferência de energia entre corpos macroscópicos e que envolvem a temperatura”*.

Em seu livro “Física Básica”, o autor H. Moysés Nussenveig (2002), trata a termodinâmica como um campo da Física que: *“lida com fenômenos associados aos conceitos de temperatura e calor”*.

Já os autores Resnick & Halliday (2016) descrevem a termodinâmica como:

Um dos principais ramos da física e da engenharia é a termodinâmica, o estudo da energia térmica (também conhecida como energia interna) dos sistemas. Um dos conceitos centrais da termodinâmica é a temperatura. (RESNICK & HALLIDAY, 2016).

A partir do exposto por esses estudiosos, percebe-se que a termodinâmica trata dos fenômenos envolvendo trocas de energia em forma de calor, de trabalho e a relação desses conceitos com a temperatura de um determinado sistema. O que nos revela a importância desta ciência para o avanço da tecnologia de um modo geral e, portanto, para o desenvolvimento da sociedade. Essa relação termodinâmica com aplicação tecnológica, pode ser percebida em Young & Freedman (2003), quando descrevem a este ramo da física da seguinte forma:

Toda vez que você dirige um carro, liga um ar condicionado ou usa um eletrodoméstico, você está usufruindo dos benefícios práticos da termodinâmica, o estudo das relações envolvendo calor, trabalho mecânico e outros aspectos da energia ou conversão entre tipos de energia. (YOUNG & FREEDMAN, 2003).

Esta visão da termodinâmica defendida pelos autores supracitados está de acordo com o que preconiza a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), aprovada pelo Congresso Nacional Brasileiro no ano de 2018 e que foi previsto para ser implantando no ensino básico a partir do ano de 2021, onde no chamado Novo Ensino Médio, na parte que trata da Ciência da Natureza e suas Tecnologias, composta pelas disciplinas Física, Biologia e Química, propõe-se um aprofundamento nas temáticas Matéria e Energia, Vida e Evolução e Terra e Universo.

Dando ainda mais destaque aos fenômenos termodinâmicos, a BNCC aduz que o estudante do Ensino Médio conseguirá obter um conhecimento científico satisfatório se ele adquirir ao final desta etapa de sua formação, as seguintes Competências e

Habilidades:

Competência Específica 01: Analisar fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas interações e relações entre matéria e energia, para propor ações individuais e coletivas que aperfeiçoem processos produtivos, minimizem impactos socioambientais e melhorem as condições de vida em âmbito local, regional e global. (BNCC, P.554, 2018)

Habilidade (EM13CNT102): Realizar previsões, avaliar intervenções e/ou construir protótipos de sistemas térmicos que visem à sustentabilidade, considerando sua composição e os efeitos das variáveis termodinâmicas sobre seu funcionamento, considerando também o uso de tecnologias digitais que auxiliem no cálculo de estimativas e no apoio à construção dos protótipos. (BNCC, P.554, 2018)

Foi assim, com esse propósito que este trabalho foi pensado e desenvolvido. Dessa forma, espera-se que ele possa subsidiar tanto ao aluno quanto ao professor do ensino médio no processo de ensino e aprendizagem dos conceitos relacionados com a termodinâmica, em especial o conceito de entropia sob a ótica da mecânica estatística.

1.1 ENTROPIA: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ensino do conceito de entropia tanto no ensino médio quanto no ensino superior sempre foi considerado problemático por vários professores e diversos autores. Há variadas discussões em torno das dificuldades do ensino da termodinâmica de uma maneira geral, da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia de forma específica (SANTOS, 2008).

De todos os conceitos difíceis da Física Clássica – a aceleração, energia, campo elétrico – o mais difícil é entropia. Até mesmo Von Neuman afirmou que “ninguém realmente sabe o que é entropia”. (STYLER, 2000).

A entropia é o assunto mais temido na química universitária básica – por estudantes devido a sua complexidade, e por professores porque os estudantes falham em entender seus princípios básicos (LAMBERT, 2006).

Observamos, ainda, em vários trabalhos como Nussenzveig (2002), Lambert (2006) e em Oliveira & Dechhoum (2003) que existem, também, dificuldades no entendimento e na formulação deste conceito.

A conexão entre a 2ª lei e a irreversibilidade é um dos problemas mais profundos da Física. (NUSENVEIG, 2002).

A segunda lei da termodinâmica é uma das construções intelectuais mais intrigantes de todos os tempos. Desde sua primeira formulação no século XIX, tem sido fonte de discussões acaloradas entre cientistas das mais variadas origens, nos mais variados ramos da ciência. Apesar de seu foco ser os sistemas microscópicos, algumas vezes têm sido

abusivamente aplicada até mesmo a fenômenos sociais, gerando interpretações que poderíamos classificar, no mínimo, como perigosas. (OLIVEIRA e DECHHOUM, 2003).

Entropia não é desordem nem tem nada a ver com coisas misturadas, como cadeiras desarrumadas e cartas embaralhadas. (LAMBERT, 2006).

Nestes trabalhos encontramos vários aspectos que dificultam o ensino do conceito de entropia e da segunda lei da termodinâmica. A conexão entre a segunda lei e a irreversibilidade dos processos naturais, o problema da relação entre entropia com os sistemas microscópicos e a desordem que é muito mencionada pelos professores em sala de aula e também muito comum em textos de divulgação científica, a conexão da entropia com os fenômenos sociais. Nesta coleção de desafios didáticos e interpretações polêmicas do conceito de entropia, percebemos uma carência muito grande em se definir uma estratégia didática apropriada para lidar com este tema. É necessário definir claramente a melhor forma estratégica de se introduzir a segunda lei e o conceito de entropia. Observando se utilizamos o modelo termodinâmico ou o cinético molecular como ponto de partida, se a abordagem contextualizadora é a mais apropriada, ou mesmo, se devemos simplesmente definir estes conceitos e deixar que determinados problemas, inerentes a estes, sejam respondidos posteriormente em um curso mais avançado.

Diante dessas dificuldades este trabalho propõe um tratamento didático com o objetivo de facilitar o ensino do conceito de entropia. Nesta abordagem fizemos uso da História da Ciência, de Atividade Experimental e de uma Abordagem Conceitual mais abrangente e imparcial dos principais tópicos da termodinâmica como sequência didática, para a inserção do conceito de entropia no ensino médio, na sua vertente estatística.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA

2.1 USO DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA COMO ESTRATÉGIA DIDÁTICA

Preocupado com o ensino de ciências no ensino médio, através de uma linguagem e metodologia que seja acessível ao aluno nesse nível, tem-se feito uso de várias estratégias de ensino, dentre elas, o uso da História da Ciência. Alguns autores, como Pagliarini (2007), defendem o uso deste recurso didático no ensino médio. Este autor, ao fazer uma análise da História e Filosofia da Ciência presente em livros didáticos de Física para esse nível de ensino, constatou que a mesma muitas vezes aparece nestes livros de forma distorcida.

Esta complexa ciência chamada Física possui uma rica história e está imersa em um contexto dinâmico e amplo, sendo assim, um ensino que visa uma apreensão de conhecimento sobre ela vai além da apresentação de simples conceitos, formulas, nomes e datas. (PAGLIARI, 2007).

A análise de livros didáticos de Física do ensino médio encontrou narrativas históricas distorcidas (caracterizando a pseudo – história), a presença de mitos científicos, além de diversos erros na maioria das coleções didáticas analisadas. Além disso, muitas delas ainda apresentaram ideias erradas, do ponto de vista epistemológico, sobre a natureza da ciência. (PAGLIARINI, 2007).

Os próprios Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) deixam claro a importância de se ver a Física como uma construção humana e histórica.

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos, como o modelo geocêntrico, substituído pelo heliocêntrico, à teoria do calórico pelo conceito de calor como energia, ou a sucessão dos vários modelos explicativos para a luz. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram (BRASIL, 2000, p.27).

De acordo com Matthews (1995), o Ensino de Física ocorre dentro de um contexto sócio-político-econômico.

“[...] podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem, a saber, o que significam [...]” (MATTEWS, 1995).

São inúmeros os trabalhos desenvolvidos no Brasil utilizando a História da Ciência no Ensino de Física. Em Castro (1993), foi analisado a pertinência, a relevância

e os efeitos do uso dessa estratégia didática na formação do professor de ciências e na aprendizagem dos conteúdos científicos.

No trabalho de Peduzzi (2005) foi feito uma discussão deste recurso no ensino da Teoria da Relatividade Restrita mostrando uma acentuada receptividade dos alunos em relação às atividades desenvolvidas e mudanças significativas em certas concepções de ciências vigentes.

Silva & Martins (2003) desenvolveram uma pesquisa em que defenderam o uso da História da Ciência em sala de aula para ensinar a Teoria das Cores de Newton.

Portanto, assim como os autores apresentados acima, valorizamos e defendemos o uso desta estratégia didática que é a História da Ciência no Ensino de Física como uma estratégia que possa contribuir de forma significativa para uma formação mais completa do aluno do ensino médio.

2.2 ATIVIDADE EXPERIMENTAL COMO ESTRATÉGIA DIDÁTICA

O uso de atividade experimental no ensino da física faz com que o aluno dê mais sentido e mais significado ao conhecimento abordado. Isso não é nada incomum tendo em vista que grande parte dos conceitos desta eminente ciência, foram testados e, portanto, construídos a partir de métodos experimentais, e que muitos deles, se tornam mais claros e compreensíveis quando faz-se uso desta estratégia didática.

Foi com essa preocupação que a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) tratou da necessidade do uso de experimentos no processo de ensino e aprendizagem das Ciências da Natureza.

a dimensão investigativa das Ciências da Natureza deve ser enfatizada no Ensino Médio, aproximando os estudantes dos procedimentos e instrumentos de investigação, tais como: identificar problemas, formular questões, identificar informações ou variáveis relevantes, propor e testar hipóteses, elaborar argumentos e explicações, escolher e utilizar instrumentos de medida, planejar e realizar atividades experimentais e pesquisas de campo, relatar, avaliar e comunicar conclusões e desenvolver ações de intervenção, a partir da análise de dados e informações sobre as temáticas da área. (BNCC, p. 550, 2018)

A BNCC sugere, ainda, que o ensino de ciência feito dessa forma, contribui para o protagonismo dos estudantes na aprendizagem e na aplicação de processos, práticas e procedimentos, a partir dos quais os conhecimentos científico e tecnológico são produzidos, além de estimular a curiosidade e a criatividade na elaboração de procedimentos e na busca de soluções de natureza teórica e/ou experimental.

Galiuzzi & Gonçalves (2001) para demonstrarem a importância do uso de experimentos na Física, citam Kerr (1963), autor este que descreve dez motivos para a

utilização de atividades experimentais como estratégia didática no ensino dos conceitos físicos. Para Kerr (1963) ensinar física por meio de atividades práticas é importante porque, dentre outras coisas, esse recurso é capaz de:

- 1- Estimular a observação acurada e o registro cuidadoso dos dados;
- 2- Promover métodos de pensamento científico simples e de senso comum;
- 3- Desenvolver habilidades manipulativas;
- 4- Treinar em resolução de problemas;
- 5- Adaptar as exigências das escolas;
- 6- Esclarecer a teoria e promover a sua compreensão;
- 7- Verificar fatos e princípios estudados anteriormente;
- 8- Vivenciar o processo de encontrar fatos por meio da investigação, chegando a seus princípios;
- 9- Motivar e manter o interesse na matéria;
- 10- Tornar os fenômenos mais reais por meio da experiência.

De acordo com esses autores a utilização de atividade experimental no ensino da Física enriquece o processo de ensino aprendizagem porque estimula o aluno por meio da prática e da observação, o que significa que o estudante deixa de lado aquele ensino tradicional, maçante e cansativo, focado exclusivamente em lousa e giz/pincel e repetição de fórmulas, o que faz da física uma disciplina desinteressante e de difícil entendimento, contribuindo, dessa forma, para que o aluno se afaste dela.

Com a mesma concepção que os autores supracitados, tem-se Hodson (1996), o qual lista cinco motivos para justificar o uso de atividade experimental em sala de aula, para ele, com essa metodologia de ensino é possível:

- 1- Motivar, estimulando o interesse e o prazer de investigar;
- 2- Treinar destrezas laboratoriais;
- 3- Enfatizar a aprendizagem do conhecimento científico;
- 4- Percepcionar o método científico e adquirir perícia na sua utilização;
- 5- Desenvolver certas “atitudes científicas” como abertura de espírito e objetividade.

É importante ressaltar que o professor exerce um papel de destaque no planejamento e na condução da atividade experimental. Para tanto, espera-se que este profissional seja uma pessoa capacitada e, portanto, preparada para, dentre outras coisas, analisar o melhor momento do processo de ensino e aprendizagem para a inserção de tal recurso didático, além de estar disponível para acompanhar cada passo da atividade. Caso

isso não aconteça, ele correrá o risco de transformar aquele momento tão especial, em uma situação de desestímulo, uma vez que um aluno mal instruído pode danificar um aparelho, pode desviar sua atenção e, contribuir assim, para o não atingimento do aprendizado que é o objetivo esperado. Com essa preocupação, Gaspar (1997), destaca:

Uma atividade experimental realizada isoladamente por um grupo de alunos, por mais desafiadora e motivadora que seja, não terá nenhum significado se não houver alguém do grupo ou com ele interagindo que conheça e possa expor o seu modelo explicativo aos demais. Só quem conhece a fundamentação teórica de uma experiência pode realizá-la de forma significativa e fazer com que ela possa promover a aquisição do conhecimento para a qual foi proposta e apresentada. (GASPAR, apud, MEDEIRO, 2020).

Assim, com esse objetivo que este projeto foi idealizado onde foi elaborado uma sequência didática que prepara o aluno para o desenvolvimento da atividade experimental. Primeiramente, esta foi abordada dentro de um contexto histórico para que o estudante pudesse entender como o conhecimento que será estudado na etapa seguinte foi construído. Somente após a apresentação dos conhecimentos propostos – entropia e seus desdobramentos – que foi realizada a atividade experimental e, sob supervisão, do educador pesquisador.

Na literatura brasileira pode-se encontrar diversos trabalhos pedagógicos que utilizaram a atividade experimental como principal recurso didático no ensino da Física.

Em Cruz (2014), foi utilizado experimentos de Física com matérias de baixo custo no ensino de conceitos da Óptica Geométrica.

Medeiros (2020), fez uso de experimentação em sala de aula para ensinar os conceitos da Hidrostática.

Giordan (1999) em um artigo discute o papel da experimentação no ensino de ciências.

Vale destacar, também, a dissertação de mestrado de Matskuma (2012), onde o autor relata a criação de um site com várias animações envolvendo experimentos de Física para o Ensino Médio.

Dessa forma, assim como os autores citados acima, acreditamos no uso desta estratégia didática que é a Atividade Experimental como uma ferramenta facilitadora para o ensino do conceito de entropia em sua versão estatística.

2.3 TRABALHOS QUE ABORDARAM O CONCEITO DE ENTROPIA

Na literatura existe uma carência de trabalhos muito grande relacionados com o conceito de entropia. Percebe-se que somente nos livros textos de Física voltados para cursos superiores de ciências exatas, esse tema possui um destaque mais relevante, uma

vez que nos materiais didáticos do ensino médio, muitas vezes nem sequer é abordado.

Apesar disso, fazendo algumas pesquisas mais aprofundadas, é possível encontrar alguns trabalhos relacionados ao tema.

Em Covolan (2003), foi desenvolvido uma pesquisa envolvendo o ensino do conceito de entropia no ensino médio a partir de concepções prévias dos estudantes e da História da Ciência.

O estudante Moura (2016), em sua dissertação de mestrado, apresentou uma proposta para o ensino da Segunda Lei da Termodinâmica, baseado no conceito estatístico de entropia.

Silva (2020), por meio de sua dissertação de mestrado criou uma proposta metodológica para inserção de elementos de estatística como organizadores prévios em conceitos básicos de termodinâmicas, sugerindo inclusive, o uso dessa metodologia para o ensino do conceito de entropia.

Por fim em Grégio (2016), foi desenvolvido um trabalho em que por meio da apresentação dos conceitos da termodinâmica, foi montado um tutorial para o entendimento do conceito de entropia.

A partir do exposto neste tópico, percebe-se o tanto que o nosso projeto de pesquisa é inovador, pois além de aprofundar o estudo dos principais conceitos da Física Térmica, apresenta uma metodologia de ensino focada nos recursos didáticos História da Ciência e Atividade Experimental para inserção do conceito estatístico de entropia no novo Ensino Médio brasileiro.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Atualmente a Educação Básica brasileira está passando por uma profunda reformulação. Isso se deve, principalmente, ao fato de que não é mais possível manter um processo de ensino e aprendizagem tradicional baseado em práticas pedagógicas mecânicas, onde o aluno é orientado a repetir determinado conhecimento até que o memorize, sem fazer qualquer questionamento ou relação com os conhecimentos de outras áreas do saber ou até mesmo com conhecimentos práticos que estão presentes em seu cotidiano.

Com o intuito de romper com esse método de ensino arcaico, em 14 de dezembro de 2018, o então Ministro da Educação, Rosssieli Soares, homologou o documento da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a etapa do Ensino Médio. Documento este que tem o intuito de fazer uma transformação considerável nos métodos de ensino existente atualmente.

Dentre outras coisas a BNCC pretende implantar uma metodologia de ensino no qual o aluno se torne o ator principal do processo de ensino e aprendizagem. Onde o aluno deixe de ocupar uma posição passiva para passar a ocupar uma posição relevante, no sentido de ele próprio buscar com maior independência o conhecimento proposto pelo professor, valorizando sempre seu conhecimento prévio adquirido até inclusive aquele que foi adquirido mesmo antes do acesso à escola. Conhecimento prévio este que possui forte vínculo com a estrutura cognitiva do aluno, conforme sugere a Teoria de Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel.

Diante disso, este trabalho está fundamentado sobre as bases da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Paul Ausubel e também pelo modelo de Dixie Bob Gowin, porém norteado pelos estudos realizados sobre o assunto, do eminente pesquisador e professor Marco Antônio Moreira, um dos maiores pesquisadores do Brasil sobre temas relacionados ao ensino de Física focado na Teoria da Aprendizagem Significativa.

A Teoria da Aprendizagem Significativa, uma ramificação da teoria cognitivista, se caracteriza pela interação entre conhecimentos prévios e conhecimentos novos, contudo, essa interação é não literal e não-arbitrária, reforçando assim, a necessidade de termos que criar alguma ferramenta pedagógica, no caso em questão, um produto, que tenha como função, possibilitar essa interação não mecânica entre o conhecimento prévio e o conhecimento novo a ser ensinado ao aluno.

3.1.1 TIPOS GERAIS DE APRENDIZAGEM

Conforme Moreira (1999) existem três tipos gerais de aprendizagem: a aprendizagem cognitiva que acontece quando o conhecimento é fixado na mente do aprendiz resultando no que ele chama de armazenamento organizado ou, de modo mais formal, na estrutura cognitiva do ser que aprende. A aprendizagem afetiva que está relacionada com as sensações internas do indivíduo como dor, alegria, ansiedade, etc. Por fim a aprendizagem psicomotora que ocorre por meio de respostas musculares obtidas com treino e prática.

Desse modo percebe-se que a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel é predominantemente voltada para a aprendizagem cognitiva, fazendo dele um representante da Teoria Cognitivista, amplamente formulada e desenvolvida pelos teóricos da educação como Piaget, Wallon e Vigotsky.

3.1.2 APRENDIZAGEM COGNITIVA

Ausubel não desconsiderava os outros tipos de aprendizagem, entretanto, ele acreditava que a aprendizagem se consumava quando o conteúdo era organizado e integrado na estrutura cognitiva do ser que aprende. Mas como essa aprendizagem era construída? O próprio autor assegurava que ela acontecia pela interação entre os conhecimentos prévios e os conhecimentos novos, entretanto, essa interação é não literal e não-arbitrária, reforçando assim, a necessidade de termos que criar alguma ferramenta pedagógica, no caso em questão, um produto, que tenha como função possibilitar essa interação não mecânica entre o conhecimento prévio e o conhecimento novo a ser ensinado ao aluno.

Nesse contexto, surge o conceito de subsunçor, que é o conhecimento específico que o aprendiz possui, como afirma Ausubel (1978):

A essência do processo de aprendizagem significativa é que ideias simbolicamente expressas sejam relacionadas, de maneira substantiva (não literal) e não arbitrária, ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto de sua estrutura cognitiva especificamente relevante (isto é, um subsunçor) que pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição já significativa. (AUSUBEL, 1978, p.41)

Em relação ao assunto Moreira (2010) reforça que:

[...] à medida que o conhecimento prévio serve de base para a atribuição de significados à nova informação, ele também se modifica, ou seja, os subsunçores vão adquirindo novos significados, se tornando mais diferenciados, mais estáveis. São formados novos subsunçores que interagem entre si. Neste sentido a estrutura cognitiva está constantemente se reestruturando durante a aprendizagem significativa. O processo é dinâmico; o conhecimento vai sendo construído. (MOREIRA, 2010, p. 18)

O conhecimento prévio conhecido também como subsunçor na teoria da aprendizagem significativa, deve estar disponível na estrutura cognitiva do indivíduo, para que seja usado como ponto de ancoragem para a formação de novos conhecimentos, é o que adverte Moreira (1999):

O fator isolado que mais influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe (cabe o professor identificar isso e ensinar de acordo). Novas ideias e informações podem ser aprendidas e retidas, na medida em que conceitos relevantes e inclusivos estejam adequadamente claros e disponíveis na estrutura cognitiva do indivíduo e funcionem, dessa forma, como ponto de ancoragem às novas ideias e conceitos. (MOREIRA, 1999, p. 152)

Vale destacar que para essa teoria, quando mais o aprendiz sabe, mais ele aprende, entretanto, a aprendizagem acontece tanto no sentido de aquisição de novos conhecimentos, como também no sentido de aprimoramento daqueles conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva desse aprendiz e que servirão como pontos de ancoragem. Dessa forma, nesse processo acontecem duas aprendizagens simultâneas: aquisição de novos conhecimentos ao mesmo tempo em que ocorre o aprimoramento daqueles pré-existentes, usados como ponto de ancoragem, os subsunçores, os quais na maioria das vezes, tratam-se de conhecimentos limitados, informais e, portanto, carregados de significados deturpados. E como foi retromencionado, a qualidade desse processo de ensino e aprendizagem, passa pela maestria do professor no de quis respeito a identificação desse conhecimento prévio, para que em seguida, ele possa usá-lo da melhor forma possível como um suporte para a inserção de novos conhecimentos, ao mesmo tempo em que desenvolve o seu aperfeiçoamento.

Usando como exemplo os conceitos da Física Térmica, o professor auxiliado por meios de ferramentas como questionários pré-testes, identifica na estrutura cognitiva do aluno subsunçores como temperatura e calor, que na maioria das vezes aparecerão carregados de concepções distorcidas, uma vez que eles foram construídos a partir das nossas sensações de quente e frio, entretanto, esses conhecimentos servirão como ponto de ancoragem para o ensino, por exemplo, dos conceitos de energia térmica e equilíbrio térmico ao mesmo tempo em que deve ocorrer uma formalização e, portanto, um aprimorando desses dois conceitos informais pré-existentes na estrutura cognitiva do aprendiz e, a partir daí, traçar um caminho mais significativo e robusto para este professor trabalhar com esses alunos outros tópicos como são a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, além claro, do conceito de entropia. Conceitos esses que estão associados a diversos outros subsunçores, que muitas vezes possuem significados opostos

aos subsunçores pretendidos, mas de igual modo importantes como vemos abaixo em Moreira (2012):

O subsunçor Conservação da Energia, poderá servir de ideia âncora para um outro novo conceito: a Conservação da Quantidade de Movimento, uma outra lei geral da Física. Analogamente, a conservação de outras grandezas físicas como momento angular e a carga elétrica adquirirão significados por interação com o subsunçor constituído pelas leis da conservação já significativas. Quer dizer, o subsunçor que inicialmente era apenas conservação da energia, agora é também conservação da quantidade de movimento, do momento angular, da carga elétrica, da corrente elétrica, e de outras grandezas físicas, permitindo inclusive dar significados à não-conservação de certas grandezas como é o caso da entropia. (MOREIRA, 2012, p. 3)

Entretanto como o conhecimento ou a informação é armazenado e organizado na estrutura cognitiva do ser que aprende? Consoante à presente teoria da aprendizagem, o conhecimento é organizado no cérebro humano obedecendo uma hierarquia conceitual, de tal forma que de acordo com Moreira (1999):

Ausubel vê o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo um organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilado) a conceitos mais gerais, mais inclusivos. *Estrutura cognitiva* significa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo. (MOREIRA, 1999, p. 153).

Percebe-se assim, que Ausubel aduz que os conhecimentos prévios são representados por conceitos gerais que servem como pilares para a absorção pelo aprendiz de conhecimentos mais específicos, os quais são organizados na estrutura cognitiva de forma hierárquica.

Em se tratando dos conceitos da Física, Moreira (1999) faz questão de destacar que:

Em Física, por exemplo, se os conceitos de força e campo já existem na estrutura cognitiva do aluno, eles servirão de subsunçores para novas informações referentes a certos tipos de força e campo como, por exemplo, a força e o campo eletromagnético. Entretanto, este processo de “ancoragem” da nova informação resulta em crescimento e modificação do conceito subsunçor. No exemplo dado, uma ideia intuitiva de força e campo serviria como subsunçor para novas informações referentes a forças e campo gravitacional, eletromagnético e nuclear, porém, na medida em que esses novos conceitos fossem aprendidos de maneira significativa, isso resultaria num crescimento e elaboração dos conceitos subsunçores iniciais, isto é, os conceitos de força e campo ficariam mais elaborados, mais inclusivos e mais capazes de servir de subsunçores para novas informações relativas a forças e campos, ou correlatas. (MOREIRA, 1999, p. 153).

3.1.3 APRENDIZAGEM MECÂNICA E A FORMAÇÃO DE CONCEITOS

Essa necessidade da existência de conhecimento prévio, para que ocorra a aprendizagem de novos conhecimentos na ótica da aprendizagem significativa de Ausubel, fez com que este autor se perguntasse, mas afinal, como é possível um ser desprovido de subsunçores adquirir conhecimento? A resposta foi dada com a definição introduzida por esse teórico através do que ele chamou de aprendizagem mecânica ou aprendizagem automática, o qual preceitua que a informação é armazenada na estrutura cognitiva do ser que aprende de forma arbitrária, com pouca ou nenhuma interação do conhecimento prévio com o conhecimento novo. Assim a aprendizagem ocorre de forma automática, sem nenhum referencial, e isso acontece, por exemplo, quando o professor de física de um cursinho preparatório para o vestibular, por meios de “macetes” ou de músicas, faz o aluno armazenar uma fórmula ou o conceito físico sem qualquer relação com o contexto em que o ensino acontece. Ou mesmo quando uma criança na educação infantil aprende as vogais e os pares de sílabas para posteriormente formar palavras.

Sendo assim, percebe-se que a aprendizagem mecânica é completamente oposta a aprendizagem significativa, contudo, segundo Ausubel, ela se torna extremamente útil para a construção dos primeiros conceitos subsunçores na estrutura cognitiva do aprendiz. Somente a partir disso, faz sentido falar em aprendizagem significativa, oportunidade em que se inicia o processo de ancoragem e conseqüentemente o armazenamento e a organização hierárquica na estrutura cognitiva de sucessivos conhecimentos de tal forma que quando mais o ser aprende, mais fácil se torna a aquisição de novos conceitos, imagens, proposições e significados. Em relação a necessidade da aprendizagem mecânica para o indivíduo aprender algo completamente novo, Moreira e Masini (1982), sugerem:

Uma resposta plausível é que a aprendizagem mecânica é sempre necessária quando um indivíduo adquire informações em uma área de conhecimento completamente nova para ele, isto é, a aprendizagem mecânica ocorre até que alguns elementos de conhecimento, relevantes a novas informações na mesma área, existam na estrutura cognitiva e possam servir de subsunções, ainda que poucos elaborados. (MOREIRA e MASINI, 1982, p. 10).

Para o caso particular das crianças pequenas, Ausubel argumenta que, além delas adquirirem conhecimentos iniciais por meio da aprendizagem mecânica, elas absorvem informações por meio de um processo que ele chamou de formação de conceitos. É nessa etapa, principalmente, que as crianças armazenam aqueles conceitos gerais e superficiais baseados no senso comum, porém de extrema importância para que as crianças que atinjam a idade escolar estejam preparadas para iniciarem a aprendizagem significativa.

Aqui é oportuno frisar que independentemente do tipo de aprendizagem que ocorra com o ser humano, seja ela mecânica, por descoberta ou por recepção, conforme concepção ausubeliana, só podemos falar em aprendizagem significativa quando o conhecimento instala-se na estrutura cognitiva desse ser de forma não arbitrária e não literal, e fazendo sempre uma interação entre a informação nova e o conceito subsunçor relevante existente naquela estrutura por meio do processo de ancoragem.

3.1.4 ORGANIZADORES PRÉVIOS COMO ESTRATÉGIA DIDÁTICA PARA CRIAÇÃO DE CONCEITOS SUBSUNÇORES

Ausubel recomendou o uso de organizadores prévios como âncora para a aprendizagem de novas informações e estas, a partir de então, passem a funcionar como conceitos subsunçores para a aquisição de novos conhecimentos. Sobre esse assunto, conforme Moreira (1999):

O uso de organizadores prévios é uma estratégia proposta por Ausubel para, deliberadamente, manipular a estrutura cognitiva, a fim de facilitar a aprendizagem significativa. Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido em si. (MOREIRA, 1999, p. 155).

Moreira (1999), acrescenta ainda que os organizadores prévios são pontes que unem o que o aprendiz sabe com o que ele deve saber, possibilitando dessa forma, que o material possa ser aprendido de forma significativa.

A partir do exposto nota-se que para uma aula de física, por exemplo, antes da inserção do conteúdo principal, o professor pode fazer uma avaliação diagnóstica para verificar a quantidade e a qualidade dos conceitos subsunçores presentes na estrutura cognitiva dos alunos, e a partir disso, se preciso for, ele pode por meio de usos de organizadores prévios, materiais introdutórios, preparar de forma mais robusta esse aluno para em momento posterior, desenvolver o ensino do conteúdo principal por meio da aprendizagem significativa ausubeliana. E para facilitar seu trabalho, sugere-se que esse professor recorra a literatura em busca de um produto pedagógico que tenha essa preocupação e, portanto, essa sequência didática.

3.1.5 CONDIÇÕES PARA QUE OCORRA A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

De acordo com Ausubel existem basicamente duas condições para que ocorra a aprendizagem significativa: a primeira depende do material e a segunda depende do aprendiz.

No que diz respeito ao material a ser aprendido, segundo Ausubel, ele deve ser relacionável ou incorporável à estrutura cognitiva do indivíduo de maneira substancial e

não literal, ou seja, tem que ser um material potencialmente significativo, mas isso fará sentido, somente se o aprendiz possuir em sua estrutura cognitiva os conhecimentos prévios relevantes.

Já em relação ao ator do processo de ensino e aprendizagem, Ausubel afirma que ele tem que manifestar a intenção de querer aprender significativamente o novo material. E que por mais que este material seja potencialmente significativo, se o aprendiz não apresentar disposição em querer aprender conforme os preceitos desta teoria, o processo não acontece, tendo em vista que pode acontecer que esse indivíduo apresente interesse apenas em aprender de forma mecânica, automática, priorizando assim, a aquisição de conhecimento por meio arbitrário, literal e por práticas memorísticas, ou seja, contribuindo assim para o desenvolvimento de uma aprendizagem, em que os conceitos são instalados na estrutura cognitiva, mas não permanecendo nesse local por muito tempo, porque foram construídos sem a existência de uma base sólida e substancial (não literal) como ocorre na aprendizagem significativa.

Sobre esse tema Moreira (1999) afirma:

Uma das condições para a ocorrência da aprendizagem significativa, portanto, é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal. Um material com essas características é dito potencialmente significativo. Esta condição implica não só que o material seja suficientemente não arbitrário em si, de modo que possa ser aprendido, mas também que o aprendiz tenha disponível em sua estrutura cognitiva os subsunçores adequados.

A outra condição é que o aprendiz manifeste uma disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo, a sua estrutura cognitiva. (MOREIRA, 1999, p. 156).

A partir do exposto, evidencia-se a importância do material utilizado no processo de ensino e aprendizagem pautado na presente teoria, o que estimula o educador a criar materiais potencialmente significativos voltados para o desenvolvimento de um aprendiz que se preocupe com o processo de interação e ancoragem do novo conhecimento.

Por outro lado, por mais que esse tipo de aprendizagem dependa consideravelmente da vontade do estudante, acredita-se que isso não seja um ponto tão negativo como pareça ser, uma vez que é perfeitamente possível o estudante ser estimulado a perceber o quão lucrativo e proveitoso é aprender por meio de métodos que fazem do conhecimento adquirido algo duradouro e de fácil resgate em caso de esquecimento, uma vez que foi construído por meio de conteúdo relacionável, baseado em uma determinada referência, conforme já relatado em várias passagens deste trabalho.

Além disso, o aluno mesmo fora da escola, a todo momento aprende e muitas vezes sem até mesmo perceber, interagindo por meio de ponto de ancoragem, o conhecimento novo com os conceitos subsunçores disponíveis em sua estrutura cognitiva. O que o professor deve fazer, então, é despertar esse interesse do aluno, usando as próprias experiências dele de aquisição de conhecimento, isso quando ele aprende de forma informal no mundo alheio ao ambiente escolar.

3.2 A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA NO QUE DIZ RESPEITO AO ENSINO DE FÍSICA

A teoria da aprendizagem significativa não sugere que seus preceitos e métodos sejam direcionados a processo de ensino de um determinado campo do saber de forma específica, contudo, nota-se que o foco desse trabalho é o ensino dos conceitos específicos da Física, motivo pelo qual durante a redação deste texto, por diversas vezes foram citados conceitos relacionados com esta nobre ciência, como exemplo a ser usado. Foi com essa preocupação que Ostermann e Cavalcanti (2010, p. 23), descreveram quatro etapas fundamentais para fazer uma abordagem desta teoria no ensino da Física, as quais seguem abaixo:

- 1- Determinar a estrutura conceitual e proposicional de matéria de ensino, organizando os conceitos e princípios hierarquicamente.
- 2- Identificar quais os subsunçores que os alunos deveriam ter em sua estrutura cognitiva, para uma aprendizagem significativa sobre determinado conteúdo a ser ensinado.
- 3- Determinar entre os subsunçores relevantes, os que estão disponíveis na estrutura cognitiva do aluno.
- 4- Ensinar utilizando recursos e princípios que facilitem a assimilação da matéria por parte do aluno e a organização de sua própria estrutura cognitiva nessa área de conhecimentos, através da aquisição de significados claros, estáveis e transferíveis.

Primeiramente percebe-se que Ostermann e Cavalcanti (2010, p. 23) nos mostram de forma breve e direta o papel do professor na preparação da metodologia de ensino inspirada na teoria da aprendizagem significativa. Depois, de acordo com o que já foi mencionado anteriormente, essas etapas que eles denominaram de fundamentais, indicam que devemos verificar se o aluno possui ou não conhecimentos prévios relevantes em sua estrutura cognitiva. Caso for constatado que ele é desprovido desses conceitos

subsunçores, cabe ao professor, por meio da aprendizagem mecânica, ou ainda, por meio da utilização de organizadores prévios, aprimorar os conhecimentos que o aprendiz adquiriu durante a etapa de formação de conceitos – conhecimentos adquiridos ao longo da vivência de mundo do estudante – e em seguida ensinar os novos conhecimentos de forma relacionável, substancial (não literal) e não arbitrário.

3.3 MODELO DE GOWIN E SEU PROCESSO DE ENSINO APRENDIZAGEM

Dixie Bob Gowin (1925-2016) foi professor, teórico e filósofo da educação, e se notabilizou por ter criado um instrumento para analisar a estrutura do processo de produção do conhecimento denominado Vê Epistemológico ou “Vê de Gowin”, do qual faz parte um outro projeto, conforme Moreira (1999), o Modelo de Gowin.

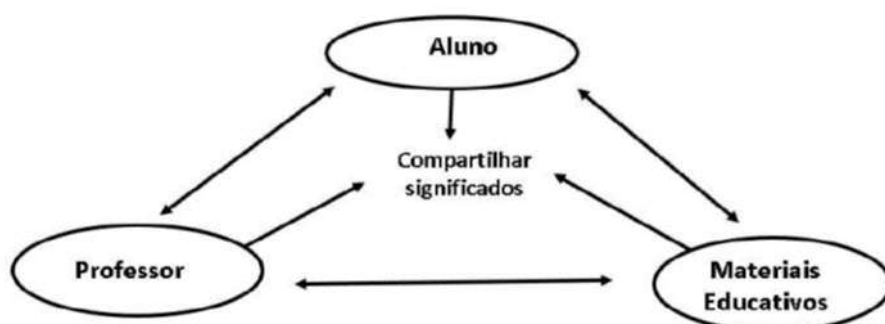


Figura 1: O modelo triádico de Gowin (MOREIRA, apud, MOREIRA, 1993)

A partir da análise da Teoria da Aprendizagem Significativa, em seu modelo, Gowin afirma que no processo de ensino aprendizagem deva existir uma relação triádica envolvendo: educador, material educativo e aluno. “Para ele, um episódio de ensino-aprendizagem se caracteriza por compartilhar significados entre alunos e professor, a respeito de conhecimentos veiculados por materiais educativos do currículo” (MOREIRA, 2017, p. 185). Contudo, conforme figura 1, é perfeitamente possível em certas situações dentro da relação triádica, ocorrerem relações diádicas formando os denominados pares de interação: professor – aluno, professor – materiais educativos, aluno – aluno e aluno – materiais educativos

Apesar disso, para esse modelo de ensino é preciso que haja troca de informações entre o professor e o aluno por intermédio de materiais educativos, numa relação triádica, de tal forma que o aluno consiga aprender e também a transmitir o conhecimento ensinado. E que este conhecimento só será considerado como adquirido pelo aluno, somente quando for atingido o nível que deve ser estipulado pelo professor. Nas palavras do autor, o ensino se consuma quando o significado do material que o aluno capta é o

mesmo significado que o professor pretende que esse material tenha para o aluno (Moreira, apud, Gowin, 1981, p.81).

Segundo Moreira (1999), o Modelo de Gowin estabelece que assim que acontece o compartilhamento de significados com o aluno, é ele quem decide se quer aprender significativamente ou não, algo que está em conformidade com a teoria da aprendizagem significativa ausubeliana, conforme já relatado neste trabalho. Sendo assim, se for do interesse do aprendiz, ele receberá a informação de forma relacionável e, portanto, não literal e não arbitrária. Já em relação aos significados, é uma tarefa do professor transmiti-los ao aluno, e sempre com a preocupação de ensinar novos significados concomitantes com o aprimoramento dos significados presentes e disponíveis nas estruturas cognitivas desse estudante, os quais muitas vezes foram adquiridos ao longo de sua experiência de vida, e essa transmissão de significados é feita por meio de materiais educativos.

Percebe-se, dessa forma, que Gowin atribui responsabilidades diferentes para professor e aluno nesse processo de ensino e aprendizagem. O professor tem que ter o compromisso de ensinar ao aluno os significados compartilhados e, portanto, aceitos pela comunidade intelectual, ao passo que o aluno, tem a função de verificar se aqueles significado absorvidos por ele, são de fato os significados transmitidos pelo professor. Somente depois de cumprido esse requisito, o compartilhamento de significados entre professor e aluno, este estará pronto para decidir se deseja aprender significativamente ou não. Sobre a responsabilidade do aluno nesse contexto, Moreira (1999) enfatiza:

O ensino requer reciprocidade de responsabilidades, porém, aprender significativamente é uma responsabilidade do aluno que não pode ser compartilhada pelo professor.

Para aprender significativamente, o aluno tem que manifestar uma disposição para relacionar, de maneira não arbitrária e não literal, à sua estrutura cognitiva, os significados que capta dos materiais, potencialmente significativos, do currículo. (MOREIRA, 1999, p. 179).

A partir do exposto, observa-se que o Modelo de Gowin destaca a importância de se utilizar um material educativo de qualidade, o qual norteará a interação professor-aluno no processo de ensino aprendizagem em sala de aula.

Neste trabalho a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e o Modelo de Gowin foram utilizados e analisados com o objetivo de fundamentar a criação de um Produto Pedagógico de qualidade com o intuito de facilitar o ensino do conceito de entropia no ensino médio, por meio de um Texto Didático que terá como função, ensinar este conceito a partir dos conhecimentos prévios existentes e disponíveis na estrutura cognitiva do aluno. Para tanto, seguindo os fundamentos desta teoria, o material será construído de tal forma que seja possível identificar por meio de questionários pré-testes,

os conceitos subsunçores ou os significados presentes na estrutura cognitiva dos alunos, e a partir daí, o professor por meio de diferentes atividades, da História da Ciência, de uma revisão de conteúdo, além de aprimorar esses conhecimentos, também criará organizadores prévios para suprirem aqueles conhecimentos não identificados na estrutura cognitiva desses estudantes, para em seguida fazer por meio de pontes ou pontos de ancoragem, uma relação substancial e não arbitrária, a inserção do conceito de entropia em sua abordagem estatística.

Espera-se que esse projeto possa subsidiar significativamente o trabalho do professor do ensino médio durante o processo de ensino e aprendizagem não só no que tange ao conceito de entropia, mas também de qualquer outro conceito da Física, contribuindo dessa forma, com o rompimento da atual e centenária metodologia de ensino existente nas escolas brasileira, onde é enaltecido o ensino de conteúdo por meio da aprendizagem puramente mecânica, com práticas repetidas de memorização de conceitos, fórmulas, proposições, imagens, fatos, etc. Aprendizagem esta em que os conceitos ensinados possuem pouca relação com os conhecimentos que o aprendiz já possui em sua estrutura cognitiva, tornando-os suscetíveis ao rápido esquecimento, e quando isso acontece, o nível de resgate, de recuperação, se torna bem difícil quando o estudante é instigado a lembrá-los.

CAPÍTULO 4: SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA INSERÇÃO DO CONCEITO DE ENTROPIA

Neste capítulo será exposta a sequência didática para introdução do conceito de entropia no Ensino Médio. Sequência essa que iniciará com a abordagem histórica da Termodinâmica, em seguida de forma mais conceitual, abrangente e com métodos matemático e estatístico, os principais tópicos desta ciência, em especial a entropia de Boltzmann, serão apresentados e, finalmente, faremos uma breve descrição de como foi desenvolvida a atividade experimental com os alunos do ensino médio. Sendo esta última, uma abordagem prática e, portanto, menos abstrata voltada a fornecer um maior sentido para os estudantes logo que eles finalizaram os estudos concernentes à parte histórica e conceitual.

Vale ressaltar que por meio do recurso didático História da Termodinâmica, o aluno terá a oportunidade de conhecer os obstáculos epistemológicos que ocorreram no desenvolvimento dessa ciência, possibilitando assim, que esse estudante desfaça aquela tradicional concepção de que os conceitos científicos parecem surgir de forma pronta, mecânica e automática, sem a existência prévias de reflexões e conflitos ideológicos e, inclusive, culturais.

4.1 ABORDAGEM HISTÓRICA

Utilizando como principais referenciais teóricos os autores Quadros (1996) e Pires (2011), além de fazer algumas adaptações do texto de Santos (2013), pertencente ao meu Trabalho de Conclusão de curso em Graduação em Física, foi montado aqui uma sequência histórica com os principais acontecimentos e descobertas da História da Termodinâmica até o surgimento da definição clássica do conceito de entropia.

- **Máquina de Heron**

Heron foi um inventor grego, que no século I d.C. construiu o primeiro dispositivo que funcionava através do vapor produzido pelo aquecimento da água. Esse vapor colocava em rotação uma esfera de metal que estava acoplada à máquina de Heron. Hoje, aos olhos da ciência moderna, esse dispositivo que é uma máquina térmica, ou seja, ela é um dispositivo com capacidade de transformar o calor, energia térmica, em trabalho mecânico. No entanto, essa máquina não foi usada para produzir energia mecânica em grandes escalas. Somente no século XVIII que foram construídas as primeiras máquinas térmicas capazes de produzir energia mecânica em escala industrial.

Figura 2 – Máquina de Heron (Eolípila)



Fonte: Wikipédia. Disponível em:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Eol%C3%ADpila#/media/Ficheiro:Aeolipile_illustration.png. Acesso em 05/09/2021

- **Bomba de Água de Savery**

Em 1698, mais de mil anos após a máquina de Heron, Thomas Savery inventou a primeira máquina a vapor de interesse industrial. A máquina de Savery era uma bomba d'água. Um enorme cilindro de metal era preenchido com vapor proveniente de um ebulidor. Uma válvula cortava o fornecimento do vapor, enquanto o cilindro era resfriado com uma corrente de água à temperatura ambiente. Este processo de resfriamento provocava a condensação do vapor do cilindro, formando vácuo em seu interior. A baixa pressão fazia com que a máquina retirasse a água de um poço de até dez metros de profundidade. Em seguida um novo ciclo era iniciado por outra descarga de vapor no cilindro, expulsando a água que restou.

Figura 3 – Bomba de Água de Savery



Fonte: Disponível em: <https://inscricao.unileste.catolica.edu.br/blog/primeiro-engenheiro-mecanico>

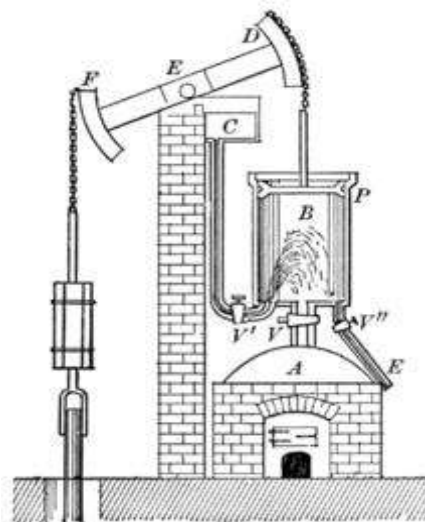
Acesso em: 05/09/2021

- **Motor a Vapor de Newcomen**

A mineração de carvão era feita em minas bastante profundas, frequentemente inundadas, exigindo uma forma eficiente de bombeamento da água, eficiência essa que a máquina de Savery não possuía. Essa exigência só foi atendida em 1712, quando o inglês Thomas Newcomen inventou uma bomba hidráulica capaz de realizar a tarefa. Esta máquina possuía um cilindro com um êmbolo móvel, acoplado a uma grande alavanca

com um contrapeso. A alavanca cedia ao contrapeso, puxava o êmbolo e forçava a entrada do vapor por sucção. Uma vez preenchido, o suprimento de vapor era interrompido e uma corrente de água resfriava o cilindro, condensando o vapor e produzindo o vácuo. O peso da atmosfera forçava então o êmbolo para baixo, eliminando a água do cilindro resultando no bombeamento da água da mina. Por causa do contrapeso, a alavanca erguia novamente o êmbolo, iniciando um novo ciclo.

Figura 4 – Motor a Vapor de Newcomen



Fonte: Wikipédia. Disponível em:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_a_vapor_de_Newcomen#/media/Ficheiro:Newcomen6325.png.

Acesso em: 06/09/2021

- **Joseph Black (1728 – 1799)**

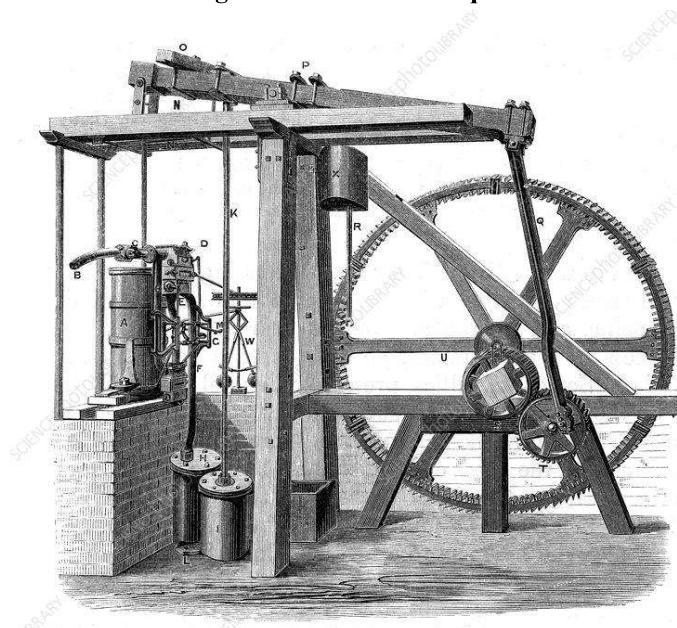
Joseph Black nasceu em Bordeaux, na França. Conceituado professor de química, medicina e anatomia da Universidade de Glasgow, estudando a fusão do gelo, descobriu, por volta de 1761, o fenômeno do calor latente. Ele fez a distinção entre temperatura e calor. Black demonstrou, ainda, que o calor latente seria a quantidade de calor que deveria ser fornecida às substâncias para que sofram mudança de fase, sem a alteração de sua temperatura.

- **Primeira Máquina de Watt (1736 - 1819)**

James Watt nasceu em Greenock, na Escócia, foi aluno de Joseph Black, estudou a máquina de Newcomen quando trabalhava como construtor de instrumento na Universidade de Glasgow, na Escócia. Propôs uma série de melhorias ao seu funcionamento, dentre as quais um condensador separado do cilindro principal, patenteada em 1769. Formou uma sociedade com o industrial Matthew Boulton, de 1774 a 1800, produzindo máquinas a vapor que logo substituíram as máquinas de Newcomen na extração de água das minas de carvão. Para alguns, foi à máquina de Watt que

ocasionou a Revolução Industrial. Foi James Watt que fixou o cavalo-vapor como unidade de medida para determinar a potência de uma máquina.

Figura 5 – Primeira Máquina de Watt



Fonte: <https://www.sciencephoto.com/media/997991/view/james-watt-s-prototype-steam-engine-old-bess-c1778> Acesso em: 06/09/2021

- **Lavoisier (1743 - 1794)**

No final do século XVIII, existiam duas hipóteses alternativas sobre a natureza do calor. A hipótese mais aceita considerava o calor como uma substância fluida indestrutível que dentre outras coisas escoaria de um corpo mais quente para um mais frio. Lavoisier deu a essa substância hipotética o nome de calórico. Ele defendia a ideia de que o calor podia ser transferido de um corpo a outro, mas a quantidade total de calórico se conservaria, ou seja, existiria uma conservação do calor.

- **Benjamin Thompson (1753 - 1814)**

Benjamin Thompson nasceu em Woburn, na colônia britânica de Massachusetts. Na Inglaterra recebeu o título de Conde de Rumford. Ao observar a perfuração de canos de canhões numa fábrica de armas em Munique, percebeu que enormes quantidades de calor eram geradas por atrito entre os retorneadores e os canos metálicos das armas. Era necessário mergulhar a peça num tanque com água, que aquecia a ponto de ferver. Este comportamento não podia ser explicado pela teoria do calórico. Se o calor constituísse um fluido, seria consumido muito depressa, mas o calor gerado pelo atrito continuava a ser liberado enquanto os canos estavam sendo perfurados. Na década de 1790, Rumford concluiu que o calor devia ser uma forma de movimento.

Figura 6 – Cano de Canhão



Fonte: https://www.ifsc.usp.br/~donoso/termodinamica/Historia_Termodinamica.pdf. Acesso em: 06/09/2021

- **Livro de Carnot (1796 – 1832)**

O físico e engenheiro militar Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832) nasceu em Paris e estudou na École Polytechnique. Em 1824 publicou seu único trabalho, o livro Reflexões Sobre a Potência Motriz do Fogo, em que propõe uma teoria sobre o funcionamento das máquinas térmicas, com a descrição de um ciclo ideal que mostra a maior eficiência determinada pela natureza, para uma máquina que opera retirando calor de uma fonte quente, gerando trabalho e rejeitando calor a uma fonte fria.

- **Julius Robert Von Mayer (1814 - 1878)**

Mayer nasceu em Heilbronn, na Alemanha, estudou medicina na Universidade de Tübingen. Em 1842 publicou um artigo na revista científica Annales de Chimie, no qual fornecia o equivalente mecânico do calor. Foi o primeiro a estabelecer o princípio de conservação da energia, mas não conseguiu convencer a comunidade acadêmica. Seus resultados tinham pouca evidência experimental, sendo por isso, considerados especulativos. Mayer em seus estudos utilizou o argumento, fundamentado pelo Conde Rumford que o calor é fruto da agitação dos constituintes da matéria.

- **William Thomson (1824 – 1907)**

William Thomson melhor conhecido como Lord Kelvin nasceu em Belfast, na Irlanda, estudou nas universidades de Glasgow e Cambridge. Em 1848 propôs uma escala

absoluta de temperatura (escala adotada hoje pelo Sistema Internacional de Unidades e tem seu nome). Foi o principal responsável pelo desenvolvimento formal dos trabalhos de Joule, sobre o equivalente mecânico de calor. Formulou juntamente com Clausius a segunda lei da termodinâmica, ou seja, a formulação do conceito de entropia.

- **Primeira lei da termodinâmica**

Formulada entre 1842 e 1847, esta tem como função definir o conceito de energia interna e o princípio da conservação da energia. Segundo alguns pesquisadores da história da termodinâmica a formulação da primeira lei se deu de forma desordenada e, dentre os vários cientistas que contribuíram com a sua dedução estavam Mayer, Joule, Helmholtz e Sadi Carnot.

- **Artigo de Joule**

James Prescott Joule (1818 - 1889) em seu artigo publicado em 1843 mostrou que o calor gerado na bobina de um eletroímã é proporcional ao quadrado da corrente elétrica que a percorre, demonstrando assim o estudo inicial do efeito Joule. Nesse mesmo trabalho Joule mostrou ainda por meio do motor elétrico uma relação entre o calor produzido pelas correntes elétricas e o trabalho gerado ou consumido, ou seja, demonstrou que uma caloria é equivalente a 4,8 joules, porém esses resultados ainda eram considerados duvidosos e não eram muito adequados como provas empíricas da existência de uma relação constante entre trabalho e calor. Apesar da importância do trabalho de Joule, seu artigo não despertou interesse da comunidade científica, porque as suas experiências eram muito difíceis de serem interpretadas e reproduzidas.

- **Entropia de Clausius**

Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822 - 1888) em um trabalho publicado em 1850 propôs uma conciliação entre a universalidade da primeira lei da termodinâmica e a separação natural existente entre processos reversíveis e irreversíveis. O resultado dessa conciliação foi à distinção definitiva feita por ele dos conceitos de calórico e de calor, deduzindo dessa forma uma nova grandeza física que deu o nome de entropia, grandeza esta que seria o chamado calórico.

4.1.1 DISCUSSÃO DE CLASIUS E KELVIN QUE OS CONDUZIRAM AOS SEUS RESPECTIVOS POSTULADOS DO CONCEITO DE ENTROPIA

- **Carnot**

Na Segunda Lei da Termodinâmica, Carnot mostrou que existem condições para

a conversão de calor em trabalho e o máximo rendimento de uma máquina térmica. Para desenvolver suas pesquisas, Carnot apoderou-se da concepção de um fluido ígneo, historicamente conhecido como calórico, sugerido por Lavoisier para a natureza do calor.

- **Joule e Mayer**

Mayer formulou o princípio da conservação da energia. Enquanto Joule determinou a quantidade de trabalho necessária para gerar uma quantidade determinada de calor, ou seja, a equivalência entre energia mecânica e calor. Nestes estudos ambos utilizaram o argumento formulado pelo Conde Rumford que estabelece que o calor é resultado da agitação das partículas que compõe a matéria.

- **Entropia de Clausius**

Uma vez que os trabalhos de Carnot foram apoiados na concepção da natureza do calor como calórico, fica fácil perceber que sua concepção da natureza do calor se opõe a concepção de Mayer e Joule. Essas ideias antagônicas culminaram com o surgimento de um cenário com duas possibilidades a ser escolhidas:

- Os princípios físicos utilizados por Carnot estão equivocados, pois se baseiam na concepção material do calor.
- Devemos concordar com os trabalhos de Carnot e rever a afirmação de Mayer e Joule sobre a natureza do calor.

Diante desse impasse conceitual, em um trabalho publicado em 1865 o polonês Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888) apresentou de fato a conciliação entre as posições antagônicas de Carnot e Mayer e Joule ao introduzir uma interpretação para o que Carnot chamava de calórico em seu ciclo.

Para fazer tal conciliação Clausius analisou o funcionamento de uma máquina térmica de Carnot utilizando tanto a concepção de calor de Mayer e Joule quanto à concepção de calórico de Carnot. Clausius verificou que para as duas formulações o conceito de trabalho estava bem definido matematicamente, identificando dessa forma o que Carnot chamava de calórico, ou seja, uma grandeza que a partir de então ele denominou como *entropia*, uma função de estado, que no ciclo de Carnot, flui do reservatório quente para o frio em um processo reversível: $S = \frac{Q}{T}$.

4.2 ABORDAGEM CONCEITUAL - ENTROPIA E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Nesta seção são apresentados os principais tópicos da Termodinâmica, iniciando com a definição dos conceitos iniciais como temperatura, energia térmica e calor, em

seguida serão definidos outros conceitos relevantes para um bom entendimento do conceito de entropia e, finalmente, esta grandeza será abordada usando tanto a visão Termodinâmica ($\Delta S = Q/T$) quanto a visão da Mecânica Estatística ($S = k \ln w$) conforme sequência apresentada nos tópicos seguintes.

4.2.1 Temperatura

Alguns autores como, por exemplo, Resnick & Halliday (2016) e Young & Freedman (2003), evitam fazer uma definição teórica do conceito de temperatura, em vez disso, eles preferem abordá-la usando a noção de “quente” e “frio” e recorrendo as escalas termométricas para demonstrarem por meio de uma visão macroscópica como que podemos perceber e calcular essa grandeza nas transformações termodinâmicas.

Diante disso e sem a intenção de querer fazer uma definição cabal e precisa, pode-se entender a temperatura como uma grandeza física escalar ou uma função de estado descritivo de um sistema que popularmente se associa às noções de “frio” e “quente”. Do ponto de vista microscópico é definido como sendo a medida da energia cinética associada ao movimento das partículas que compõem um dado sistema físico.

4.2.2 Energia térmica ou energia interna

É comum nos livros textos de Física Básica tanto do Ensino Superior quanto do Ensino Médio que o conceito de energia térmica seja definido sem nenhuma relação com o conceito de energia interna, aparentando assim serem conceitos distintos. Geralmente os autores tratam da energia térmica quando querem definir o conceito de calor, ao passo que abordam a energia interna com o intuito de enunciar a Primeira Lei da Termodinâmica, contudo, evitam associar um conceito ao outro, apesar de os definirem usando a mesma fundamentação.

Mas de acordo com Resnick & Halliday (2016) a energia térmica e a energia interna tratam do mesmo conceito físico, o qual representa a energia cinética e a energia potencial dos movimentos aleatórios dos átomos, moléculas e outras micropartículas existentes no interior de um determinado corpo, conforme segue abaixo:

Energia térmica é uma energia interna que consiste na energia cinética e na energia potencial associadas aos movimentos aleatórios dos átomos, moléculas e outros corpos microscópicos que existem no interior de um objeto. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Aqui é importante fazer uma relação do conceito de energia térmica com o conceito de temperatura, uma vez que suas definições são bastantes parecidas e, portanto, muitas vezes confundíveis. Pois bem, conforme descrito no tópico 4.2.1, a temperatura é o resultado da medida da energia cinética associada ao movimento de vibração aleatório

das partículas que compõem um dado sistema físico. Já a energia térmica é o resultado da somatória das energias cinética e potencial dessas partículas que constituem esse sistema, contudo, conforme veremos posteriormente, temperatura e energia térmica ou energia interna são conceitos dependentes, de tal forma que um corpo que possui alta temperatura, um corpo quente, possui grande quantidade de energia interna, assim como, um corpo que possui baixa temperatura, um corpo frio, tem pequena quantidade de energia térmica.

Uma outra forma de separar o conceito de temperatura do conceito de energia interna, ocorre quando associa-se a temperatura ao grau de agitação das partículas constituintes de um corpo, ao passo que a energia interna representa as energias cinética e potencial resultado da interação – agitação – dessas partículas.

4.2.3 Calor

O conceito de calor pode ser compreendido facilmente a partir de observações realizadas de fenômenos simples que acontecem rotineiramente em nosso dia a dia, como por exemplo, quando no momento em que estamos preparando nossa refeição, retiramos uma panela quente da chama do fogão e colocamos para esfriar em cima de uma mesa.

Neste exemplo, usando uma linguagem da física térmica mais formal, temos a panela que funciona como um sistema termodinâmico, a uma temperatura T_s e o meio em sua volta representado pelo o ambiente que está a uma temperatura T_a , onde nota-se que $T_s > T_a$, contudo, depois de um certo intervalo de tempo, a panela tem sua temperatura naturalmente reduzida, aproximando ou até mesmo se igualando a temperatura do ambiente, nos levando a fazer uma série de questionamentos a respeito desse processo. A explicação para tal fenômeno é que um corpo de maior temperatura sempre cede energia térmica para outro corpo de menor temperatura, colocado em sua vizinhança, quando ambos conformam um sistema isolado do meio externo. É essa energia em trânsito entre esses dois corpos que é denominada de calor.

Portanto, calor é uma energia de natureza térmica quando esta encontra-se em movimento entre corpos com diferentes temperaturas. O calor é positivo quando um corpo (sistema) ganha energia térmica, ao passo que o calor é negativo quando um corpo (sistema) perde energia térmica.

Aqui é importante destacar que o calor não é uma propriedade intrínseca do sistema. Ele só faz sentido quando representa a transferência de energia para fora ou para dentro do sistema, logo, não faz sentido falar que um corpo possui uma determinada quantidade calor, isso porque o calor está associado ao processo de transferência de energia e não ao acúmulo dela em um determinado sistema.

Existe uma preocupação muito grande entre os estudiosos em separar as

definições dos conceitos de calor e de temperatura. Com esse intuito Young & Freedman (2003), escreveram:

É extremamente importante que você saiba distinguir com clareza a diferença entre calor e temperatura. A temperatura depende do estado físico de um material e sua descrição quantitativa indica se o material está quente ou frio. Na física o termo “calor” sempre se refere a uma transferência de energia de um corpo ou sistema para outro em virtude de uma diferença de temperatura existente entre eles, nunca indica a quantidade de energia contida em um sistema particular. Podemos alterar a temperatura de um corpo fornecendo calor ou retirando calor do corpo, retirando ou fornecendo outras formas de energia, tal como a energia mecânica. (YOUNG & FREEDMAN, 2003)

4.2.4 Equilíbrio térmico e a lei zero da termodinâmica

Um sistema termodinâmico é definido como sendo uma quantidade de matéria contida dentro de um recipiente, podendo este último possuir paredes fixas ou móveis.

A natureza das paredes de um recipiente determina se o sistema termodinâmico está em isolamento térmico ou não. Para o caso do isolamento térmico as paredes são denominadas adiabáticas, caso contrário as paredes chamam-se não-adiabáticas ou diatérmicas.

Dois sistemas estão em contato térmico quando ambos estão separados por uma parede diatérmica. Sistema isolado é aquele contido num recipiente de paredes adiabáticas. Diz-se que um sistema isolado está em *equilíbrio térmico* quando as temperaturas dos corpos que constituem este sistema permanecerem constantes.

Se colocarmos dois sistemas isolados em contato térmico, eles passarão a ser um único sistema que evoluirá para um estado termodinâmico de equilíbrio térmico, atingindo, portanto, uma temperatura em comum. Dessa forma, diz-se que o sistema um está em equilíbrio térmico com o sistema dois.

Se separarmos o sistema um do sistema dois com uma parede adiabática e colocarmos ambos em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, verificaremos que apesar do sistema um não estar em contato térmico com o sistema dois, eles também estão em equilíbrio térmico entre si. Este fenômeno é conhecido como a *lei zero da termodinâmica* e pode ser enunciado da seguinte forma:

Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si. (NUSSENZVEIG, 2002).

Existe uma extensa gama de aplicação da lei zero em laboratórios de ensaios científicos ou de realização de exames médicos. Nestes locais, é muito comum o interesse em determinar, por meio de um termômetro, a temperatura de dois líquidos distribuídos

em dois recipientes distintos, para saber se eles estão ou não em equilíbrio térmico, mas isso sem colocar esses dois corpos em contato.

Vale ressaltar que consoante Resnick & Halliday (2016), a lei zero foi formulada apenas na década de 1930, oportunidade em que a primeira e a segunda leis da termodinâmica já haviam sido descobertas e numeradas. Contudo, como o conceito de temperatura é primordial para as duas leis, a lei que estabelece a temperatura como um conceito válido deve ter uma numeração menor, motivo pelo qual foi chamada de lei zero.

4.2.5 Conceito de trabalho

Dizemos que um gás de um sistema realiza trabalho quando ele é expandido ou comprimido. Quando um gás se expande, ele empurra a superfície móvel das suas fronteiras à medida que ele se desloca para fora. Logo um gás que se expande sempre realiza um trabalho positivo. Quando um gás sofre uma ação de compressão, as suas moléculas constituintes realizam um trabalho negativo sobre o agente que o comprime, dizemos que o trabalho é realizado sobre o sistema através de um agente externo.

De acordo com Young & Freedman (2003) o trabalho realizado por um gás durante uma variação de volume pode ser entendido através da análise das moléculas que o compõem.

Quando uma dessas moléculas colide com uma superfície fixa, ela exerce momentaneamente uma força sobre a superfície, mas não realiza trabalho porque a superfície não se move. Porém quando a superfície se move, tal como no caso de um pistão de um motor a gasolina, a molécula realiza um trabalho sobre a superfície durante a colisão. (YOUNG & FREEDMAN, 2003).

4.2.6 Primeira lei da termodinâmica

Quando um sistema muda de um estado inicial para um estado final tanto o trabalho w realizado como o calor Q transferido dependem da natureza do processo. Porém, de acordo com as evidências experimentais, a grandeza $Q - w$ permanece constante para todos os processos. Ela depende apenas dos estados inicial e final.

Esta característica indica que a grandeza $Q - w$ representa a variação de uma propriedade intrínseca do sistema chamada de energia interna ΔU . Esta é a primeira lei da termodinâmica, $\Delta U = Q - w$, que pode ser entendida como uma generalização do princípio da conservação da energia. Em suma, a energia de um sistema tende a aumentar se for acrescentada energia sobre a forma de calor e tende a diminuir se for perdida energia em forma de trabalho realizado pelo sistema.

4.2.7 Processos termodinâmicos

4.2.7.1 Processo reversível

Classificamos como processos reversíveis as transformações que podem ocorrer em ambos os sentidos, desde que, na volta, o sistema retorne ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram variações definitivas na vizinhança do sistema.

Podemos citar como exemplo as transformações puramente mecânicas, que se realizam sem atritos e sem que se produzam choques inelásticos.

Imagine a seguinte situação: um bloco com uma determinada massa está localizado no topo de um plano inclinado, em que na base desse plano existe uma mola tida como ideal. Se esse bloco se deslizar sem atrito plano abaixo, irá conseqüentemente, chocar-se elasticamente com a mola e voltará a subir pelo plano até alcançar novamente a posição inicial. Como a transformação ocorrida não produziu nenhuma modificação na sua vizinhança ou nos corpos circundantes podemos classificá-la como um processo reversível.

4.2.7.2 Processo irreversível

Um processo é dito irreversível quando o inverso desse processo só pode se efetuar como parte de um processo mais complexo, envolvendo modificações nos corpos circundantes. Em outras palavras, são aqueles que possuem uma direção preferencial no tempo, não podendo ser executado “de trás para frente”. Quando falamos de processos reversíveis, citamos o exemplo do bloco descendo em um plano inclinado sem nenhuma resistência ao movimento desse bloco. Se por outro lado, considerarmos as perdas de energia por atrito para fazer o bloco retornar à posição inicial, seria necessário o fornecimento de energia. Dessa forma, a descida se tornaria irreversível.

Para entender melhor nossa compreensão de processos irreversíveis analisaremos as seguintes situações: quando um mergulhador pula em uma piscina, sua energia cinética é convertida em calor, aquecendo a água. Fenômeno como este é classificado como processo irreversível, uma vez que o resfriamento súbito da água não devolveria o mergulhador ao trampolim. Outros exemplos bastante comuns de processos irreversíveis é o resfriamento de uma xícara de café, ou a queima de lenha na lareira. Nunca veremos a fumaça voltando pela chaminé enquanto a sala se resfria e a lenha se reconstituindo a partir das cinzas.

4.2.8 ENTROPIA

4.2.8.1 Processos irreversíveis e entropia

Do exposto no tópico anterior, verifica-se que os processos irreversíveis são unidirecionais, contudo, se esses processos retornassem aos seus estados iniciais espontaneamente, sob a ótica da Primeira Lei da Termodinâmica, que expressa o princípio

da conservação da energia, tais fenômenos não causariam nenhuma anormalidade aparente, tendo em vista que esta lei não impõe um sentido preferencial para a ocorrência dos fenômenos naturais. Em vez disso, ela apenas se preocupa com a energia total do sistema. Para a Primeira Lei, não importa se, por exemplo, o calor se desloca de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura ou se desloca no sentido inverso. O que importa é se a energia total desse sistema vai se transformar em outra forma de energia ou não.

Diante disso, percebe-se que não são as alterações da energia de um sistema fechado que estabelecem o sentido de ocorrência dos processos naturais, mas sim outra propriedade, que conforme Resnick & Halliday (2016), denomina-se variação da entropia ΔS do sistema, podendo ser postulado da seguinte forma:

Todos os processos irreversíveis em um sistema fechado são acompanhados por aumento da entropia. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Nos processos irreversíveis, se opondo ao conceito de energia, a entropia é uma grandeza não conservativa, aumentando em um sistema isolado, na medida em que tais processos evoluem, por esse motivo a variação da entropia é frequentemente associada a “seta do tempo”, conforme consta em Resnick e Halliday (2016).

A variação da entropia é às vezes chamada de “seta do tempo”. Assim, por exemplo, associamos a explosão de um milho de pipoca ao sentido positivo do tempo e ao aumento da entropia. O sentido negativo do tempo (um filme passado ao contrário) corresponde a uma pipoca se transformando em milho. Como esse processo resultaria em uma diminuição da entropia, ele jamais acontece. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

4.2.8.2 Definição da variação de entropia

Na figura 7 tem-se um sistema isolado representando a expansão livre de um gás, que é um processo irreversível e que, portanto, acontece com o aumento da variação da entropia. A figura indica o gás em seus estados inicial i e final f , e para cada situação pode-se associar uma temperatura, uma pressão e um volume, que são propriedades clássicas de estado de um sistema termodinâmico, assim como a energia. Essas grandezas são ditas de estado porque não dependem do processo de transformação, dependem apenas do estado atual do gás.

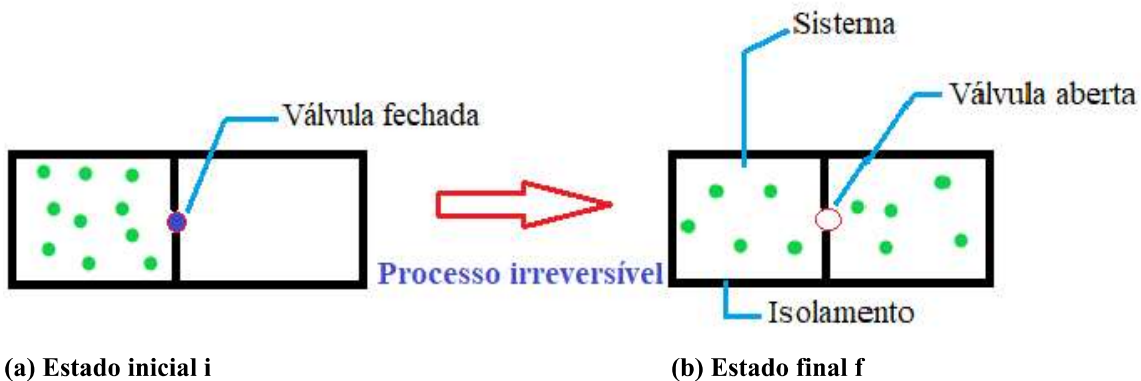


Figura 7: Gás em expansão livre, configurando um processo irreversível que evolui de (a) para (b).
Fonte: autor.

Nesse contexto, introduziremos o conceito de entropia S como sendo uma propriedade de estado, definindo-a por meio de sua variação $\Delta S = S_f - S_i$ relativa a um sistema que evolui através de um processo com estados inicial i e final f , e que de acordo com os autores Resnick & Halliday (2016), dada pela equação:

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Esta equação fornece uma definição do conceito de entropia em função da quantidade de calor Q que é a energia térmica transferida do sistema ou para o sistema durante o processo, e T representa a temperatura do sistema. É importante destacar que como a temperatura deve ser fornecida em kelvin, conforme o Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI), ela é sempre positiva, fazendo com que o sinal da variação da entropia ΔS , dependa apenas do sinal da quantidade de calor Q . E seguindo o que estabelece o SI, a unidade de entropia é joule por kelvin.

Apesar de definirmos entropia partindo do princípio que ela é uma propriedade de estado, assim como a temperatura, o volume e a pressão, a eq. 4.1 se torna problemática quando aplicada a processo irreversível como na expansão livre de um gás. Isso porque de consoante Resnick e Halliday (2016):

Enquanto o gás se expande para ocupar todo o recipiente, a pressão, a temperatura e o volume do gás flutuam de forma imprevisível. Em outras palavras, as três variáveis não passam por uma série de valores de equilíbrio bem definidos nos estágios intermediários da mudança do sistema do estado de equilíbrio inicial i para o estado de equilíbrio final f . Assim não podemos plotar uma trajetória pressão-volume da expansão livre no diagrama P - V e, mais importante, não podemos escrever uma relação entre Q e T que nos permita realizar a integração da equação. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

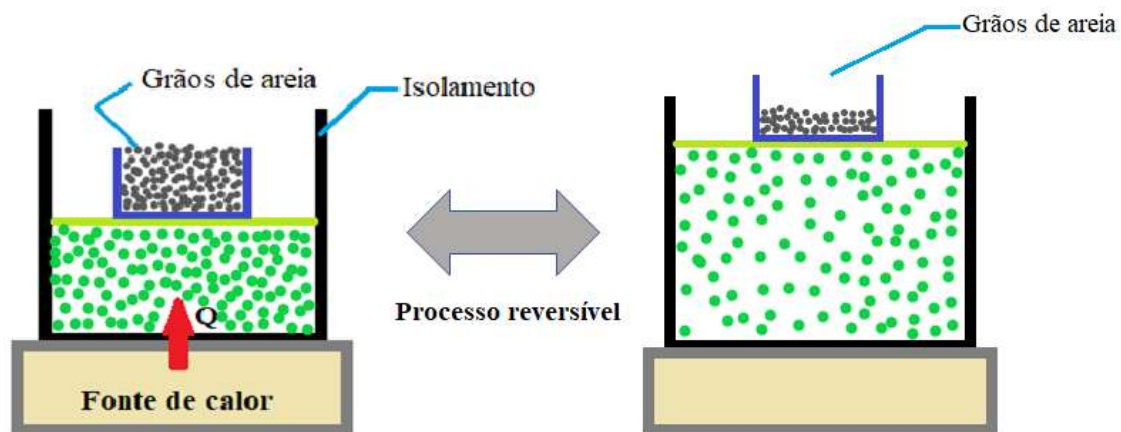
Mas se considerarmos que a entropia é de fato uma função de estado, a variação da entropia entre os estados inicial i e final f , depende apenas desses extremos, não

dependendo do caminho pelo qual o processo ocorreu. Isso posto, é perfeitamente possível substituir a expansão livre irreversível do gás da figura 7 por um processo reversível que passa pelos mesmos estados retromencionados (*i* e *f*). Dessa forma, neste novo processo é possível plotar uma trajetória no diagrama P - V , e a eq. 4.1 se torna coerente na determinação da variação da entropia em função da energia trocada pelo sistema e a temperatura desse sistema.

Ainda discorrendo sobre a expansão livre de um gás, vale ressaltar que nesta transformação a temperatura não varia, tendo em vista que conforme a figura 7 o processo ocorre sem trocas de calor com o ambiente – sistema isolado constituindo assim uma transformação adiabática – e pela definição desse tipo de expansão o gás não realiza trabalho, porque suas moléculas não possuem resistência enquanto toma o espaço vazio e, claro, consoante a Primeira Lei da Termodinâmica a energia interna do sistema não se altera, revelando assim uma transformação isotérmica.

Feito essas considerações, a eq. 4.1 se torna mais simples, tendo em vista que numa expansão isotérmica reversível a temperatura é constante.

A figura 8 traz a representação de uma expansão isotérmica reversível. Nela temos uma amostra de gás envolvida em um cilindro com paredes adiabáticas colocado em cima de um suporte que funciona como uma fonte de calor Q mantida a temperatura constante T , justamente para a temperatura do gás não sofrer alteração. Na parte superior desse cilindro existe um êmbolo móvel, com suas extremidades que ficam em contato com as paredes do cilindro, livre de atrito, para possibilitar que ele se mova livremente, e sobre esse êmbolo existe uma porção de grãos de areia. Podemos fazer expandir esse gás do estado inicial *i* para o estado final *f*, retirando a areia de cima do êmbolo por meio da remoção de forma lenta de um grão por vez, e aguardar o estabelecimento da nova situação de equilíbrio de mesma temperatura, mas com uma nova pressão e volume. Assim é possível garantir que os estados intermediários do gás permanecem em equilíbrio e o diagrama P - V desta transformação possa ser construído conforme a figura 9.



(a) Estado inicial i

(b) Estado final f

Figura 8: Transformação isotérmica reversível de um gás ideal. Fonte: Autor.

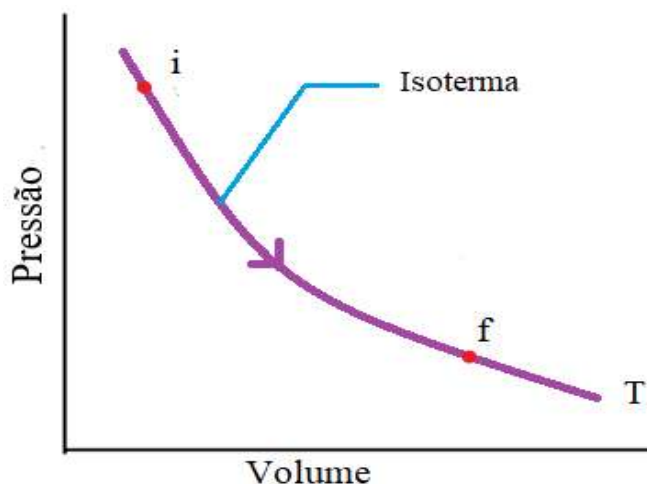


Figura 9: Diagrama P-V para a transformação isotérmica reversível. Fonte: Autor.

Vale reforçar que a expansão isotérmica representado acima é fisicamente diferente da expansão livre irreversível, contudo, como já foi dito, esses dois processos se tornam equivalentes quando observados apenas os estados inicial e final que são os mesmos nas duas transformações e, portando, fornecem a mesma variação de entropia. Nesse prisma temos em Tipler (1976), que:

É importante compreender, todavia, que somente para um processo reversível a integral $\int dQ/T$ é independente do processo. Num processo irreversível, a variação da entropia do sistema não será dada pela integral $\int dQ/T$. Não obstante, uma vez que entropia é uma função de estado, podemos determinar a variação de entropia do sistema que efetua um processo irreversível do estado 1 para o estado 2, considerando qualquer processo reversível que comece e acabe nestes estados e fazendo o cálculo de $\int dQ/T$.” (TIPLER, 1976)

A partir dessa abordagem, podemos reescrever a eq. 4.1 para uma expansão

isotérmica, da seguinte forma:

$$\Delta S = S_F - S_i = \frac{1}{T} \int_i^f dQ \quad \text{Eq. 4.2}$$

Mas a $\int dQ = Q$, onde Q representa a energia total transferida em forma de calor durante o processo, dessa forma a variação de entropia para o processo isotérmico, fica como segue:

$$\Delta S = S_F - S_i = \frac{Q}{T} \quad \text{Eq. 4.3}$$

Como já foi apresentado anteriormente, para que a temperatura T do gás seja constante durante a expansão isotérmica da figura 8, uma quantidade de calor Q deve ser transferida da fonte de calor para o gás. Com isso, Q é positivo e, conseqüentemente, a entropia desse gás aumenta tanto durante o processo isotérmico como também durante a expansão livre da figura 7.

Sobre essa abordagem, na mesma perspectiva de Tipler (1976), supramencionado, temos em Resnick e Halliday (2016) onde dizem:

Para determinar a variação de entropia que ocorre em um processo irreversível, substituímos esse processo por um processo reversível que envolve os mesmos estados inicial e final e calculamos a variação de entropia para esse processo reversível. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

4.2.8.3 Definindo entropia como função de estado

No tópico anterior consideramos a entropia como função de estado, nos mesmos moldes que as grandezas clássicas da termodinâmica como temperatura, volume, energia e pressão, contudo, essa propriedade da entropia só é melhor comprovada por meio de atividade experimental. Apesar disso, tal característica desse conceito pode ser demonstrada matematicamente quando consideramos um gás ideal passando por um processo reversível qualquer, com modo de execução similar ao processo descrito na figura 8. Naquele sistema, se considerarmos que há uma interação com o ambiente, para cada grão de areia que retiramos do êmbolo (expansão) ou colocamos no êmbolo (compressão), podemos associar uma energia absorvida ou cedida pelo gás na forma de calor dQ , um trabalho realizado pelo gás dW e uma variação da energia interna dU . Que de acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, obtemos:

$$dU = dQ - dw$$

Em Resnick e Halliday (2016) dW é definido como sendo $p dV$, a pressão p é dada por nRT/V (consequência da Lei Geral dos Gases Ideais) e a energia interna dU é escrita em função de $n C_V dT$, o que nos possibilita reescrever a equação anterior como segue abaixo:

$$dQ = p dV + n C_V dT$$

A partir do exposto, substituindo a Lei dos Gases Ideias em p , e dividindo os dois membros por T , chegaremos a seguinte equação:

$$\frac{dQ}{T} = nR \frac{dV}{V} + nC_V \frac{dT}{T}$$

Agora devemos integrar os termos dessa equação nos limites de estado inicial arbitrário i e estado final arbitrário f , como apresentado a seguir:

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = \int_i^f nR \frac{dV}{V} + \int_i^f nC_V \frac{dT}{T}$$

Da eq. 4.1, verifica-se que o primeiro membro dessa função é a variação da entropia ΔS , se fizermos essa devida substituição e integrarmos os termos do segundo membro, chegaremos a equação que segue abaixo:

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_V \ln \frac{T_f}{T_i} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Aqui cabe destacar mais uma vez que esta equação foi deduzida levando em consideração um processo reversível qualquer. Dessa forma, ela é válida para qualquer processo reversível que leve o gás do estado inicial i para o estado final f .

Além disso, a eq. 4.4 nos demonstra que a variação da entropia ΔS depende apenas das propriedades dos estados inicial (V_i e T_i) e final (V_f e T_f), não dependendo, assim, dos processos intermediários das transformações gasosas.

4.2.9 ENTROPIA E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Para enunciarmos a Segunda Lei da Termodinâmica, vamos analisar o comportamento da entropia se retornarmos para o estado inicial o gás representado na figura 8 (b). Para isso, sendo o processo reversível, devemos devolver lentamente cada grão de areia retirado daquele êmbolo, até que o volume anterior do gás seja atingido, figura 8 (a). Isso implica que para que a temperatura seja mantida constante, nesse processo inverso e reversível, energia na forma de calor deve ser retirada do gás. Com isso, Q se torna negativo, e conforme a eq. 4.3, a entropia do gás diminui, violando assim aparentemente o enunciado da entropia, o qual diz que a entropia sempre aumenta. Entretanto, isso não é verdade quando levamos em consideração que essa nova

transformação não representa um sistema irreversível isolado conforme impõe o enunciado formal da entropia.

Dessa forma, para eliminarmos essa suposta contradição em torno do conceito da entropia, precisamos ampliar o sistema incluindo o ambiente com a qual ele interage de forma que esse novo universo se torne isolado. O novo sistema deve levar em consideração além do gás, também a fonte de calor.

Considerando o valor absoluto da quantidade de calor $|Q|$, temos para o gás que perde calor, uma variação de entropia igual a $\Delta S(\text{gás}) = -\frac{|Q|}{T}$ e para a fonte que ganha a mesma quantidade de calor, uma variação de entropia de $\Delta S(\text{fonte}) = +\frac{|Q|}{T}$. Finalmente para determinar a entropia desse novo sistema fechado, precisamos somar essas duas quantidades, o que resulta em um valor igual a zero.

A partir disso, podemos ampliar o enunciado da entropia de tal forma que ela seja compatível tanto com os processos reversíveis quanto com os processos irreversíveis. Nesse contexto, Resnick e Halliday (2016), expuseram:

Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta se o processo for irreversível e permanece constante se o processo for reversível.

Embora a entropia possa diminuir em uma parte de um sistema fechado, sempre existe um aumento igual ou maior em outra parte do sistema, de modo que a entropia do sistema como um todo jamais diminui. Essa afirmação constitui uma das formas de enunciar a **Segunda Lei da Termodinâmica**. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

De acordo com os autores citados acima, esse enunciado mais geral do conceito de entropia representa uma das formas de se enunciar a Segunda Lei da Termodinâmica e que pode ser escrita matematicamente por meio da seguinte equação:

$$\Delta s \geq 0 \quad \text{Eq. 4.5}$$

Essa equação traz o sinal de desigualdade para descrever os processos irreversíveis e o sinal de igualdade para indicar a variação da entropia nos processos reversíveis, todavia, ela só é válida para sistemas isolados.

É importante lembrar que processos reversíveis são processos idealizados, não existindo em fenômenos reais, tendo em vista que dificilmente teremos um sistema fechado livre de qualquer interferência externa, como por exemplo, isento da influência de atrito. Dessa forma, na prática, no nosso dia a dia, mesmo em ambientes fechados, os processos são sempre irreversíveis, de modo que a entropia sempre aumenta, evoluindo para um valor máximo.

4.2.10 MÁQUINA TÉRMICA E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Neste tópico será feita uma abordagem diferente para apresentarmos uma outra forma de enunciar a Segunda Lei da Termodinâmica. Para tanto analisaremos os processos de funcionamento de uma máquina térmica, definida como sendo um dispositivo composto por duas fontes térmicas de temperatura diferentes, denominadas fonte quente e fonte fria, que funciona em ciclos, entre essas duas fontes, tendo como atividade fim realizar trabalho útil a partir do calor fornecido à fonte quente.

As máquinas térmicas sempre utilizam um produto conhecido como substância trabalhante que tem como função absorver calor Q_1 da fonte quente de temperatura T_1 e depois realizar trabalho útil W por meio da utilização de parte dessa energia, sendo que a outra fração dessa energia é liberada necessariamente na fonte fria T_2 na forma de calor Q_2 , conforme a figura 10. Como exemplo de substância trabalhante, temos na máquina a vapor a mistura de água fervente e o vapor de água. Já nos motores dos veículos, a substância de trabalho ou fluido operante, muitas vezes, é representado pela mistura ar e gasolina.

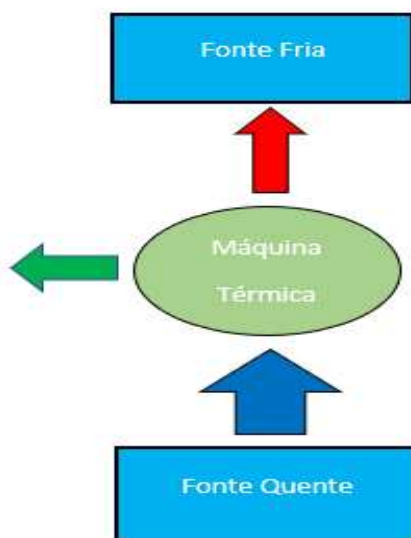


Figura 10: Diagrama esquemático de uma máquina térmica. Fonte: Autor.

A condição para que uma máquina térmica realize trabalho continuamente é que a substância trabalhante opere em ciclos, repetindo esse movimento de retorno ao estado inicial periodicamente. É nessa conjuntura que surge o enunciado de Kelvin e Planck para a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo os quais:

É impossível que uma máquina qualquer, que operando em ciclo, receba calor de uma fonte e execute uma quantidade equivalente de trabalho sem produzir nenhum outro efeito nas suas vizinhanças. (TIPLER, 1976)

Esse enunciado nos revela que em uma máquina térmica, parte da energia recebida da fonte quente Q_1 em forma de calor deve ser liberada para a fonte fria Q_2 , restando

apenas uma fração dessa energia para a realização de trabalho útil W , assim como representado na figura 10. Se parte dessa energia não fosse liberada para a fonte fria, não seria possível esta máquina existir, como podemos notar quando analisamos o rendimento desta máquina.

Se utilizarmos a Primeira Lei da Termodinâmica para relacionar essas três grandezas térmicas, teremos:

$$w = |Q_1| - |Q_2| \quad \text{Eq. 4.6}$$

Podemos também determinar o rendimento n dessa máquina fazendo a razão entre o trabalho útil W e a energia em forma de calor Q_1 recebida pela substância trabalhante da fonte quente, de acordo com o que segue abaixo:

$$n = \frac{w}{|Q_1|} \quad \text{Eq. 4.7}$$

E substituindo a eq. 4.6 na eq. 4.7, obtemos o rendimento de uma máquina térmica em função de Q_1 e Q_2 como descrito a seguir:

$$n = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad \text{Eq. 4.8}$$

Essa equação revela que como Q_1 é sempre maior que Q_2 , uma vez que este último é uma parte de Q_1 , o rendimento n assumirá valores menores que um (1), demonstrando assim, a impossibilidade de uma máquina térmica atingir rendimento igual a 100%, o que está coerente com o que prevê a Segunda Lei da Termodinâmica.

4.2.11 TEOREMA DE CARNOT

Como vimos, a Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que nenhuma máquina térmica pode ter rendimento de 100%. A partir disso, surge a pergunta: Qual o limite de eficiência para uma dada máquina térmica?

Em seu livro publicado em 1824 o físico e engenheiro militar Nicolas Léonard Sadi Carnot demonstrou que é impossível uma máquina térmica trabalhar em ciclos sem perdas. Carnot foi mais adiante, demonstrou também qual deve ser a máxima eficiência imposta pela natureza para uma máquina que opera ganhando calor Q_1 de uma fonte quente gerando trabalho W e rejeitando calor a uma fonte fria Q_2 .

Ao estudar a eficiência de sua máquina, Carnot demonstrou em um ciclo composto por duas adiabáticas e duas isotermas, como representado na figura 11, que a máxima eficiência de uma máquina depende apenas das temperaturas dos dois reservatórios, propôs ainda que esta eficiência independe da substância de trabalho.

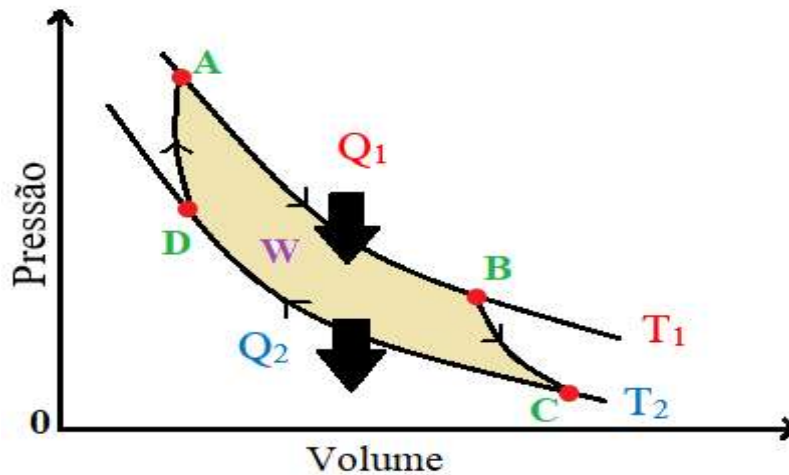


Figura 11: Ciclo de Carnot para um gás ideal. Fonte: Autor

Para demonstrar essas deduções de Carnot, recorreremos a figura 11, que representa o ciclo de Carnot para uma máquina ideal que usa o gás perfeito como substância trabalhante, portanto, trata-se de um processo reversível, livre de dissipação de calor por atrito ou de interferência de qualquer turbulência externa.

Analisando o ciclo da figura em questão, temos:

- Em **AB**: o gás se expande isotermicamente com temperatura T_1 , recebendo o calor Q_1 da fonte quente.
- Em **BC**: o gás se expande adiabaticamente até que sua temperatura reduza para T_2 referente a fonte fria.
- Em **CD**: o gás é comprimido isotermicamente com temperatura T_2 , liberando o calor Q_2 para a fonte fria.
- Em **DA**: o gás é comprimido adiabaticamente, voltando ao seu estado inicial de temperatura T_1 referente a fonte quente.

Se calcularmos a área interna da região que envolve a curva $ABCD$, obtemos o trabalho realizado em cada ciclo, mas como a variação da energia interna é igual a zero, uma vez que para um ciclo, as temperaturas inicial e final são iguais, podemos aplicar a Primeira Lei da Termodinâmica nessa transformação cíclica, conforme descrita pela eq. 5.6.

$$w = |Q_1| - |Q_2| \quad \text{Eq. 4.6}$$

Podemos também escrever uma equação para a variação da entropia no ciclo de Carnot, todavia, em BC e DA , a variação da entropia é nula, uma vez que não ocorre trocas de calor, por tratarem de processos adiabáticos. Fazendo essas considerações, temos para o presente ciclo:

$$\Delta s = \Delta s_{AB} + \Delta s_{CD} = \frac{|Q_1|}{T_1} - \frac{|Q_2|}{T_2} \quad \text{Eq. 4.9}$$

O sinal negativo dessa equação é necessário, porque no percurso CD a substância de trabalho perde energia na forma de calor Q_2 , o que provoca uma redução na entropia, em contra partida há um aumento de entropia no intervalo AD , tendo em vista o ganho de energia térmica em forma de calor Q_1 , de tal forma que de acordo com o que já era previsto, como a entropia é propriedade de estado, sua variação para o ciclo completo é igual a zero. Assim podemos reescrever a eq. 4.9, da seguinte forma:

$$\frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$

Ou ainda, rearranjando os termos dessa equação, obtemos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad \text{Eq. 4.10}$$

Se combinarmos a eq. 4.8 com a eq. 4.10, chegamos a uma expressão que fornece a eficiência térmica e da máquina de Carnot, dada por:

$$e = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Eq. 4.11}$$

É importante ressaltar que essas temperaturas devem ser usadas na unidade padrão do sistema internacional de unidades de medida, ou seja, em kelvins. E como $T_1 > T_2$, a eficiência da máquina de Carnot será sempre positiva e menor que 1, revelando-nos que por mais que trata-se de uma máquina ideal, seu rendimento nunca será igual a 100%. Sobre esse assunto, temos em Resnick e Halliday (2016):

Só seria possível trabalhar com 100% de eficiência (ou seja, com $e = 1$) se $T_f = 0$ ou $T_q = \infty$, condição impossível de conseguir na prática. Na verdade, a experiência levou à seguinte versão alternativa da segunda lei da termodinâmica, que, em última análise, equivale a dizer que *nenhuma máquina térmica é perfeita*: Não existe uma série de processos cujo único resultado seja a conversão total em trabalho da energia contida em uma fonte de calor. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Diante do exposto, o Teorema de Carnot pode ser enunciado da seguinte forma:

- Nenhuma máquina térmica que opere entre uma fonte quente e uma fonte fria pode ter um rendimento superior ao de uma máquina de Carnot.
- Todas as máquinas de Carnot que operem entre duas fontes terão a mesma eficiência.

4.2.12 ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO CONCEITO DE ENTROPIA

4.2.12.1 A conexão entre entropia e a desordem de um sistema

Como foi relatado na abordagem histórica, em 1865 Clausius definiu o conceito de entropia como uma grandeza que aumenta com a dissipação e atinge seu valor mais alto quando todo o potencial do sistema de realizar trabalho está esgotado. Foi exposto, também, que esta definição implica que, em um processo reversível a variação de entropia é nula e em um processo irreversível a entropia sempre aumenta.

Dessa forma, considerando o universo como um sistema fechado, em 1865 Clausius lançou a Primeira e a Segunda Lei da termodinâmica. Ao enunciar a primeira lei afirmou que a energia total do universo é constante, enquanto no enunciado da segunda lei, afirmou que a entropia total do universo tende a um valor máximo.

De acordo com alguns autores como, por exemplo, Resnick & Halliday (2016) e Young & Freedman (2003), o conceito de entropia está associado à desordem de um sistema.

Mexa o café de uma xícara com uma colher [...] esse processo espontâneo resulta no aumento de entropia. Também resulta no aumento de desordem atômica, sendo o movimento de rotação inicial das moléculas do café um estado relativamente ordenado. (RESNICK & HALLIDAY, 2016).

A energia interna de um sistema pode ser calculada, pelo menos em princípio, somando – se todas as energias cinéticas das partículas constituintes e todas as energias potenciais da interação entre as partículas. Isso denomina – se um cálculo *microscópico* da energia interna. Podemos também fazer um cálculo microscópico da entropia S de um sistema. Contudo, diferentemente da energia, a entropia não é algo que pertence a cada partícula individual ou a pares de partículas do sistema. Em vez disto, a entropia é uma medida da desordem do sistema como um todo. (YOUNG & FREEDMAN, 2003).

Essa desordem molecular ou das partículas constituintes do sistema como um todo, como sugerem os autores acima, foi definido quantitativamente na Termodinâmica Estatística por Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) por volta de 1866. Segundo Silvia (1995) essa definição de Boltzmann se deve ao fato de que, no final do século XIX, a teoria mecânica do calor recebeu novo impulso com os trabalhos de Maxwell (1831 – 1871) sobre a distribuição de velocidades das moléculas de um gás assim como os trabalhos do próprio Boltzmann sobre a introdução da teoria das probabilidades e da entropia no estudo da teoria cinética dos gases.

A essência do trabalho de Maxwell se concentrava na descrição do estado de equilíbrio termodinâmico de um sistema. Em 1860 ele propôs que após uma série de colisões, a energia cinética das partículas tende a se igualar.

Apoderando-se das ideias desenvolvidas por Clausius e Maxwell, Boltzmann escreveu:

Como resultado das colisões, muitas moléculas adquirirão maiores velocidades, e outras obterão menores velocidades, até que finalmente é estabelecida uma distribuição de velocidades entre as moléculas, tal que não seja alterada por novas colisões. (BOLTZMANN, apud. PEREIRA JR., 1997).

A partir daí a Segunda Lei da Termodinâmica passa a ter uma interpretação de Boltzmann. Nessa nova interpretação Boltzmann demonstrou que nos movimentos espontâneos de energia como na conversão de energia mecânica em calor ou na refrigeração de corpos aquecidos, as moléculas dos sistemas envolvidos tendiam para uma distribuição probabilística de suas energias. Para ele essa distribuição desordenada, era a mais provável, enquanto que a distribuição ordenada ou organizada, possuía menor probabilidade de ocorrência. Dessa forma, Boltzmann chegou à conclusão que o crescimento espontâneo da entropia de um sistema poderia ser relacionado com o aumento da distribuição das energias moleculares do mesmo.

Para Gilbert (1982) a interpretação de Boltzmann corresponde a admitir que os estados de maior entropia são os mais prováveis e que, também, os estados mais prováveis são os de maior desordem, logo pode-se concluir que os sistemas evoluem no sentido de maior desordem ao mesmo tempo em que sua entropia aumenta.

Como demonstramos a primeira formulação do conceito de entropia não fazia conexões com estados microscópicos. Sua definição foi desenvolvida exclusivamente em cima de sistemas macroscópicos. Agora sabemos que foi Boltzmann quem fez sua relação com a escala microscópica. Apesar desse feito, e uma vez que a entropia de um sistema aumenta quando este recebe calor de sua vizinhança, para muitos como Covolan (2003), a grande realização de Boltzmann foi mostrar que as duas definições, aparentemente distintas, são equivalentes. Quando um sistema recebe calor, aumenta a agitação de suas partículas constituintes e, conseqüentemente, aumenta sua desordem microscópica.

Nos tópicos seguintes, de forma bem acessível e, portanto, didática, faremos uma abordagem do conceito de entropia na perspectiva da mecânica estatística, ou seja, apresentaremos a equação da entropia de Boltzmann, explicitando sua aplicação durante a expansão livre de um gás ideal. Para tanto, se faz necessário para melhor clareza, antes definirmos os conceitos estatísticos de macroestado, microestado e multiplicidade.

4.2.12.2 Macroestado, Microestado e Multiplicidade

Para introduzirmos os conceitos de macroestado (o mesmo que configuração), microestado e multiplicidade, vamos analisar os resultados possíveis obtidos no lançamento de dois dados de seis lados não viciados.

Se lançarmos um único dado de seis faces, teremos seis resultados possíveis e equiprováveis, ou seja, os valores 1, 2, 3, 4, 5 e 6, têm as mesmas chances de ocorrerem. Por outro lado, se lançarmos dois dados ao mesmo tempo, esse universo aumenta significativamente de tal forma que teremos 36 (6 x 6) resultados diferentes possíveis e com a mesma probabilidade de ocorrer, conforme descrito na tabela 1. Contudo, quando fazemos a soma de cada resultado obtido, como apresentado na tabela 2, percebe-se que temos 11 valores possíveis nesse espaço amostral. Valores esses que vão de 2 a 12, os quais não possuem a mesma probabilidade de ocorrência, isso porque, conforme a tabela 3, temos diferentes formas de se obter uma determinada soma, de tal modo que nesse espaço amostral, existe mais possibilidade de se chegar a uma determinada soma do que em outra.

		DADO 1					
		1	2	3	4	5	6
DADO 2	1	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)
	2	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)
	3	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)
	4	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)	(4,6)
	5	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)	(5,6)
	6	(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)	(6,6)

Tabela 1: Resultados possíveis no lançamento de dois dados. Fonte: Autor.

		DADO 1					
		1	2	3	4	5	6
DADO 2	1	2	3	4	5	6	7
	2	3	4	5	6	7	8
	3	4	5	6	7	8	9
	4	5	6	7	8	9	10
	5	6	7	8	9	10	11
	6	7	8	9	10	11	12

Tabela 2: Soma de cada par de resultados possíveis no lançamento de dois dados. Fonte: Autor.

Soma possíveis	Resultados possíveis no lançamento de dois dados
2	(1,1)
3	(1,2); (2,1)
4	(1,3); (2,2); (3,1)
5	(1,4); (2,3); (3,2); (4,1)
6	(1,5); (2,4); (3,3); (4,2); (5,1)
7	(1,6); (2,5); (3,4); (4,3); (5,2); (6,1)
8	(2,6); (3,5); (4,4); (5,3); (6,2)

9	(3,6); (4,5); (5,4); (6,3)
10	(4,6); (5,5); (6,4)
11	(5,6); (6,5)
12	(6,6)

Tabela 3: Classificação dos resultados possíveis para o lançamento de dois dados conforme o universo de soma possíveis. Fonte: Autor.

Quando observamos a tabela 3, verificamos que existem seis maneiras diferentes de se obter a soma 7, em contrapartida, existe apenas uma maneira de se obter a soma 2, dessa forma, dizemos que o evento soma 7 é muito mais provável que o evento soma 2.

Feito esta análise do espaço amostral do lançamento de dois dados não viciados, iniciaremos agora de forma bem didática uma discussão sobre os conceitos de macroestado (ou configuração), microestado e multiplicidade, que de acordo com Moura (2016), os conceitos de microestado e macroestado estão relacionados com o grau de detalhe com que se descreve um sistema. Sendo assim, podemos dizer que cada par de valores possíveis no lançamento de dois dados, como mostrado na tabela 1, representa o microestado, porque é a descrição mais detalhada possível daquele sistema. Já as somas possíveis, dentro do universo de 2 a 12, como consta na tabela 3, constitui o macroestado daquele sistema, que apesar de não individualizar os eventos como acontece no microestado, se torna bastante importante quando estamos preocupados apenas com a probabilidade de ocorrência de uma determinada soma.

Do exposto, percebe-se que um macroestado, também denominado configuração, de um sistema, é constituído por um ou mais microestado.

Na tabela 2, vemos que o macroestado soma 2 possui a mesma chance de ocorrer que o macroestado soma 12, sendo menos prováveis de ocorrer quando comparados com o macroestado soma 7. Isso se deve porque, como todos os microestados (pares de valores), são igualmente prováveis, um macroestado que tem maior número de microestados, é mais provável.

Do que foi apresentado verifica-se que um determinado microestado só pode ser bem entendido quando é localizado o resultado fornecido por cada dado individualmente, uma vez que o microestado (4,1) é diferente do microestado (1,4). E por mais que esses dois eventos em particular sejam semelhantes, eles não são iguais, porque foram fornecidos por dados distintos, logo, podemos dizer que esses pares são *eventos distinguíveis*, o mesmo não ocorre quando estamos lidando com uma amostra de gás em expansão livre como veremos posteriormente; fenômeno que não possibilita diferenciar as moléculas envolvidas, por isso constituem um *evento indistinguível*.

Quando se trata de um sistema físico composto por muitas partículas, como por

exemplo, numa amostra de gás, Moura (2016) escreve que os conceitos de microestado e macroestado estão relacionados com as grandezas físicas da seguinte forma:

Num sistema físico mais típico, como um objeto macroscópico composto por muitas partículas, o microestado especificaria a posição e a velocidade de cada partícula individualmente. Já o macroestado seria dado pelo volume, temperatura e outras grandezas macroscópicas necessárias para descrever a situação desse objeto. (MOURA, 2016)

Uma vez que conhecemos os conceitos de microestado e macroestado, fica fácil definir o conceito de multiplicidade W , o qual representa o número de microestados que compõem um macroestado. Anteriormente afirmamos que o macroestado soma 2 e soma 12 possui a mesma probabilidade de ocorrer, contudo, esses eventos são bem menos prováveis que a que a soma 7. Pois bem, além da explicação dada naquela oportunidade, podemos fazer uso da multiplicidade para justificar o comportamento de tais eventos, uma vez que a soma 2 e a soma 12, possuem multiplicidade $W = 1$ (são formadas por um microestado cada) e a soma 7, tem multiplicidade $W = 6$ (é composta por 6 microestados), ou seja, quanto maior a multiplicidade de um macroestado, mais chance ele tem de acontecer, tendo em vista que como foi relatado anteriormente, todos os microestados são equiprováveis, logo, evento com um maior número de microestado ou de maior multiplicidade é mais provável.

Depois de usarmos didaticamente o lançamento de dois dados não viciados, como um sistema físico, para inserção dos conceitos estatísticos de macroestado, microestado e multiplicidade, trataremos a partir do tópico seguinte da entropia de Boltzmann aplicada a expansão livre de um gás ideal, ou seja, faremos uma abordagem do conceito de entropia a partir dos princípios da mecânica estatística.

4.2.12.3 Entropia de Boltzmann

Depois de definirmos a entropia a partir dos princípios da termodinâmica, de agora em diante este conceito será abordado sob a ótica da mecânica estatística.

Vale ressaltar que, pela natureza deste projeto de pesquisa, concentraremos nossos esforços em definir apenas a entropia de Boltzmann em sua versão introdutória, não sendo objeto deste trabalho, apresentar as particularidades e as implicações matemáticas avançadas do universo da mecânica estatística relacionadas com o presente tema.

Iniciaremos nosso estudo, analisando a distribuição das moléculas de um gás entre dois compartimentos de uma caixa isolada, como representado na figura 12. Essa caixa traz uma amostra de gás ideal em expansão livre, onde temos quatro moléculas iguais ou indistinguíveis.

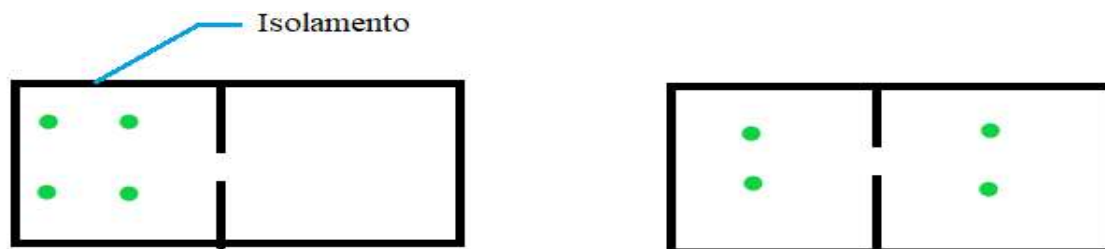


Figura 12: Quatro moléculas de gás ideal em expansão livre. Fonte: Autor

Se observamos apenas uma molécula notaremos que após um intervalo de tempo, ela ocupará ou o lado direito ou o lado esquerda da caixa, e como são dois compartimentos de mesma dimensão, ela possui 50% de chance de estar no compartimento da esquerda ou no compartimento da direita.

Se fosse possível fotografarmos o movimento dessas quatro moléculas, perceberíamos as mais diversas configurações, e dentro das quais teríamos diferentes formas dessas moléculas se posicionarem, como por exemplo:

Configuração I: 4 moléculas do lado esquerda e nenhuma do lado direito. Neste caso existe somente uma forma dessas moléculas se arranjam, como demonstrado na figura 13.

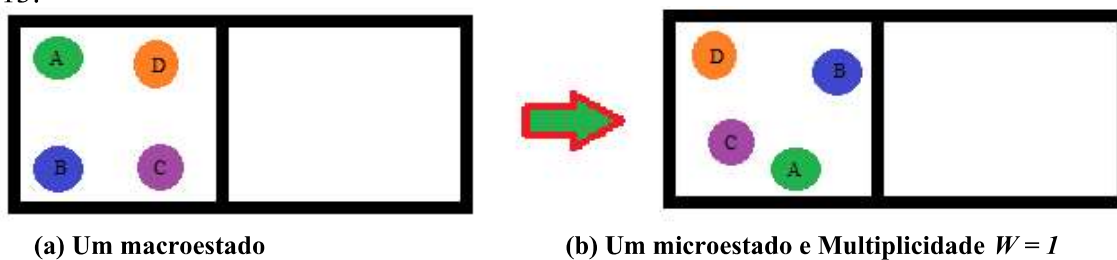


Figura 13: Relação entre macroestado e microestado para a situação em que foi considerada as quatro moléculas distribuídas em um único lado da caixa. Fonte: Autor.

Configuração II: 3 moléculas do lado esquerdo e 1 molécula do lado direito. Aqui teríamos diferentes arranjos para a mesma configuração, porque é possível a molécula que se encontra do lado da direita trocar de posição com cada moléculas da esquerda por três vezes, conforme representado na figura 14.

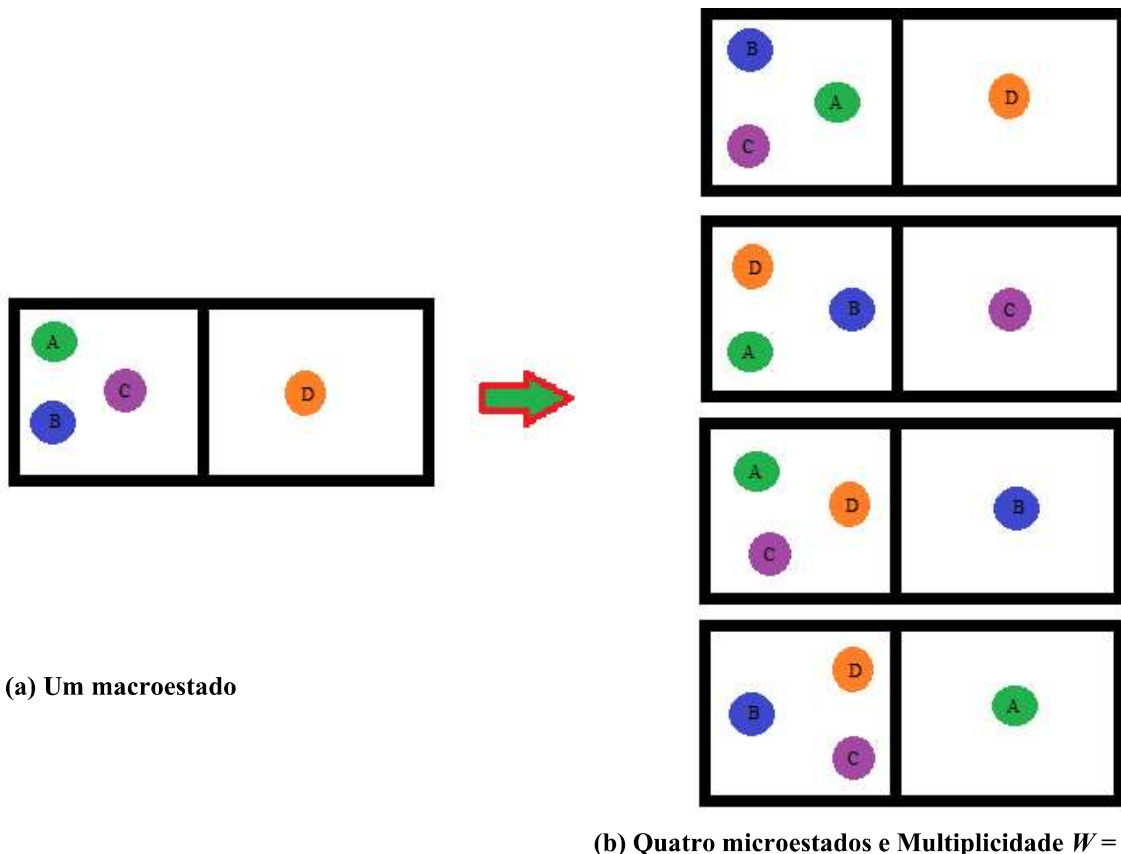


Figura 14: Relação entre macroestado e microestado para a situação em que foram consideradas três moléculas distribuídas do lado esquerdo e uma molécula do lado direito. Fonte: Autor.

Nesses exemplos a configuração do sistema representa o macroestado, e os diferentes arranjos dessas moléculas dentro dessa configuração, como descrito na figura 14, são os microestados, e o número desses microestados é a multiplicidade W da configuração.

Sendo assim, na figura 13, temos um macroestado e multiplicidade $W = 1$. Já figura 14, temos um macroestado com multiplicidade $W = 4$.

Do exposto, fica claro que a multiplicidade de um determinado sistema depende do número total de partículas e da quantidade de partículas distribuídas em cada compartimento de um recipiente. Desse modo, levando em consideração que a multiplicidade está relacionada também com as diferentes formas dessas moléculas se posicionarem de um lado ou do outro de um recipiente, podemos determinar a multiplicidade W para uma amostra de N partículas, distribuindo n dessas partículas em partes de um determinado recipiente, fazendo uso da análise combinatória por meio da equação abaixo, conforme sugere Resnick & Halliday (2016):

$$w = \frac{N!}{n_1!n_2!} \quad \text{Eq. 4.12}$$

Essa equação representa a multiplicidade W da configuração para N partículas

distribuídas em dois compartimentos de um sistema, conforme descrito nas figuras 13 e figura 14, contudo, ela pode ser reescrita para calcular a multiplicidade em ambientes subdivididos em vários compartimentos, basta que para isso, seja acrescentado em seu denominador o fatorial do número de partículas de cada compartimento correspondente.

Se aplicarmos a eq. 4.12 nas configurações I e II, figuras 13 e 14, notaríamos que a multiplicidade se tornaria maior para o caso em que $n_1 = n_2$, situação na qual essas moléculas estariam distribuídas igualmente entre os dois lados da caixa, representando a configuração mais provável, e conforme veremos matematicamente, a situação de entropia máxima. Isso ocorre porque de acordo com Resnick & Halliday (2016), a hipótese fundamental da mecânica estatística é que todos os *microestados são igualmente prováveis*.

Esses mesmos autores escreveram a equação de Boltzmann que fornece a relação entre a entropia S de uma configuração de um gás e a multiplicidade W dessa configuração da seguinte forma:

$$S = k \ln w \quad \text{Eq. 4.13}$$

Onde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann.

Essa ilustre equação da entropia de Boltzmann é uma função logarítmica, porque tem o objetivo de harmonizar uma aparente contradição que acontece quando analisamos dois sistemas independentes. Neste caso a entropia apresenta propriedade aditiva, uma vez que a entropia total desses sistemas é a soma das entropias individuais. Já a probabilidade de ocorrência desses dois sistemas é o produto das probabilidades de cada sistema obtido individualmente. Para resolver esse imbróglio, em sua equação, Boltzmann utilizou a propriedade logaritma, que possibilita fazer a conexão entre uma grandeza com propriedade aditiva e uma grandeza com propriedade multiplicativa.

Com essa equação, Boltzmann demonstrou matematicamente que configuração ou macroestado de maior multiplicidade W , ou seja, mais provável, possui maior entropia S .

Se analisarmos as configurações I e II, figuras 13 e 14, notaríamos que a multiplicidade se tornaria maior para o caso em que $n_1 = n_2$, situação na qual essas moléculas estariam distribuídas igualmente entre os dois lados da caixa, representando a configuração mais provável, e conforme a equação de Boltzmann, teríamos ali uma situação de máxima entropia ou de máxima desordem, representando assim, a configuração em que o gás atinge o equilíbrio térmico.

Na eq. 4.13, para um número muito grande de W , como o obtido em uma amostra de gás em que N é da ordem de 10^{22} , faz-se necessário utilizar a aproximação de Stirling

desenvolvida pelo matemático escocês James Stirling, para evitar o fatorial de N , o qual neste caso, apresenta um grau de complexidade muito grande para ser calculado.

Com esse objetivo, tem-se abaixo a aproximação de Stirling, consoante Resnick & Halliday (2016):

$$\ln N! \approx N(\ln N) - N \quad \text{Eq. 4.14}$$

Após introduzirmos a definição da entropia nas visões da termodinâmica e da mecânica estatística, nos tópicos seguintes apresentaremos alguns fenômenos que são associados a este conceito e que muitas vezes são abordadas sem qualquer coerência física.

4.2.13 ENTROPIA NA TEORIA DA INFORMAÇÃO

Como foi mostrada anteriormente a definição do conceito de entropia de Boltzmann está relacionado com o grau de aleatoriedade de um sistema físico. O fato de Boltzmann ter feito esta definição em termos estatísticos (ou probabilístico), fez com que este conceito passasse a ser aplicado em diversas áreas do conhecimento, dentre elas está a Teoria da Informação.

Em 1948 o americano matemático e engenheiro eletricitista Claude Elwood Shannon (1916 – 2001) publicou um trabalho intitulado Teoria Matemática da Comunicação a respeito da quantificação da informação presente em uma mensagem. Neste trabalho, que posteriormente foi publicado em forma de livro (Pineda, 2006), Shannon associa a Quantidade de Informação ao conceito de entropia conforme interpretado pela Mecânica Estatística de Boltzmann.

Para entendermos melhor essa associação feita por Shannon, é preciso que antes, entendemos o processo de transmissão de uma mensagem.

Segundo Pineda (2006), que desenvolveu uma pesquisa sobre a entropia de Shannon, antes de se receber uma mensagem, é suposto que exista um conjunto finito de mensagens possíveis de serem recebidas, e que cada uma destas mensagens tenha uma certa probabilidade de ocorrência. Dessa forma, segundo o autor, a incerteza quanto à informação a ser recebida diminui quando a mensagem é recebida. E o quanto de incerteza que a mensagem recebida reduz está relacionada à probabilidade de sua ocorrência.

Antes de definir uma grandeza que mede a quantidade de informação, Pineda (2006) afirma que o recebimento de uma mensagem mais provável tem menos informação que uma mensagem menos provável. Para reforçar seu argumento ele utilizou o seguinte exemplo: num informe meteorológico que prevê para a cidade de Maceió um dia ensolarado possui menos informação do que a previsão de um dia de nevasca. Isso porque o recebimento da primeira mensagem não será novidade para qualquer pessoa que esteja

familiarizado com o clima do Nordeste Brasileiro, enquanto que o recebimento da segunda mensagem será tido como uma ocorrência rara (incomum).

No processo de comunicação de Shannon a mensagem é transmitida da seguinte forma: o emissor através de um canal de comunicação envia ao receptor uma mensagem codificada em símbolos. O processo de codificação envolve a tradução da informação em símbolos, retirados de um repertório previamente definido. Com base nesse raciocínio, Shannon propôs que a quantidade de informação deve ser entendida como a entropia de Boltzmann. Para ele, à medida que a ocorrência de um grupo de símbolos se torna mais provável que outros do repertório, a entropia decresce. A entropia é máxima quando a ocorrência de todos os símbolos é equiprovável (ou seja, a probabilidade de ocorrência de alguns grupos de símbolos é nula). Para o caso onde existe certeza sobre qual símbolo vai ser transmitido, a entropia é zero. Em outras palavras, a quantidade de informação decresce quando aumenta a probabilidade de ocorrência de certos símbolos. Quando há certeza sobre qual símbolo vai ser transmitido, a quantidade de informação será nula. Neste contexto o conceito de entropia passa a ser uma grandeza que mede a quantidade de informação de uma mensagem e está relacionada com a frequência dos símbolos empregados para codificá-la.

Comparando o conceito de entropia de Boltzmann com o de Shannon, percebe-se que o primeiro estudou os gases e definiu o conceito de entropia como sendo a medida da desordem molecular desses gases, e sua variação aumenta à medida que o movimento das moléculas se torna aleatória. O segundo estudou a informação e definiu o conceito de entropia como sendo a medida da quantidade de informação. E esta medida está associada à probabilidade de ocorrência dos símbolos. Empregando o mesmo raciocínio probabilístico de Boltzmann, Shannon definiu que a variação da sua entropia aumenta à medida que a ocorrência dos símbolos se torna menos aleatória (ou menos provável), ou seja, a probabilidade de ocorrência dos símbolos tende a zero.

De exposto e conforme Magossi & Paviotti (2019), Shannon, definiu a incerteza, ou a entropia (Letra H), de uma mensagem X sobre n valores com probabilidade p_i , para $i = 1, 2, \dots, n$, como descrito na equação abaixo:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad \text{Eq. 4.15}$$

Ou seja, podemos dizer que temos aí a equação de Boltzmann, eq. 4.13, adaptada para analisar os fenômenos probabilísticos envolvidos no processo de transmissão de uma

mensagem, mas como se trata de quantidade de informação que é inversamente proporcional a maior probabilidade de ocorrência, ela foi adaptada com o acréscimo do sinal negativo.

Percebe-se que tanto a eq. 4.13 (equação de Boltzmann) quanto a eq. 4.15 (equação de Shannon), nos mostram que fenômenos de maior probabilidade ou mais prováveis, possuem maiores entropia. Ou ainda, que a entropia aumenta sempre no sentido dos eventos mais prováveis. Motivo pelo qual a eq. 4.15 foi usada também, mas em módulo, na aplicação do produto.

4.2.14 ENTROPIA NOS FENÔMENOS SOCIAIS

Partindo da associação do conceito de entropia ao aumento da desordem de um sistema termodinâmico, muitos tentam relacionar este conceito com movimentos sociais ou a caos urbanos.

Um caso bem comum dessa relação é percebido quando as moléculas que formam um gás em um sistema são comparadas com automóveis como ônibus, caminhões, motos, trens, aviões, dentre outros. Em seguida são feitas as seguintes observações: à medida que aumenta a velocidades desses veículos e, conseqüentemente, as suas energias cinéticas, as mesmas são degradadas na forma de energia térmica, sonora, nas deformações por impacto, etc. Isso se deve ao aumento desses automóveis, em um sistema fechado, tais como rodovias, ferrovias e nas pistas aéreas, todas sendo cada vez mais utilizadas sem um correspondente aumento da infraestrutura. Como conseqüência disso, aumentam os acidentes, os atrasos nos aeroportos, a geração de calor e de stress.

Em outros casos, alguns identificam a desordem de Boltzmann com a desordem social, dizendo que o caos da sociedade tende sempre a crescer. Outros definem a entropia como uma medida da insatisfação do indivíduo e das massas, afirmando que a insatisfação da sociedade tende sempre a um máximo.

Uma outra aplicação incoerente do conceito de entropia se refere ao comportamento do ser humano. Este é um criador por natureza. Muito mais que um criador de máquinas e artefatos, é antes de qualquer coisa um criador de ideias. Algumas delas são aceitas, outras não. A cada nova ideia ou comportamento aceito ou entendido, a entropia avança um pouco mais em direção a seu máximo.

Como podemos perceber partindo do que foi apresentado acima, em todos os casos a aplicação do conceito de entropia possui definições distorcidas e precipitadas quando comparados com a definição estabelecida pela Mecânica Estatística.

Preocupado com a aplicação do conceito de entropia aos fenômenos sociais de forma errônea. Luiz Eleno (2011) alerta que na Mecânica Estatística o aumento da

desordem se refere ao aumento do número de possíveis estados equivalentes em que o sistema pode se encontrar. E esta interpretação do conceito de entropia não deve ser confundida com caos sociais, tão pouco com bagunça, corrupção ou afrouxamento moral. Em seu argumento ele reforça que ao aplicarmos o conceito de entropia as Ciências Humanas é preciso estar atento a este fato, pois o risco de recair numa falácia é grande.

4.2.15 PRINCÍPIO DA DEGRADAÇÃO DA ENERGIA: UMA CONSEQUÊNCIA DA ENTROPIA

Em termos matemáticos a entropia é dada também pela equação, $\Delta S = \frac{Q}{T}$, que mede a quantidade de calor por unidade de temperatura envolvida em um processo termodinâmico. Essa razão corresponde a quantidade de energia térmica por unidade de temperatura que é convertida em energia interna e que não serve para realizar trabalho, por exemplo. Quando um corpo recebe calor, uma quantidade $\frac{dQ}{T}$ indica o calor convertido em energia do sistema que não pode ser usada para outro fim, neste processo, que não seja $\Delta T > 0$.

Da primeira lei da termodinâmica, que é uma expressão da conservação da energia, sabemos que a mesma não pode nem ser criada e nem ser destruída.

Para a segunda lei, em outras palavras a entropia, além dessa característica da energia, a forma que ela assume nas diversas transformações de que participa acaba se “deteriorando” em formas menos úteis de energia, ou seja, quando a energia torna-se mais difusa acaba degenerando em dissipações.

Podemos entender melhor essa ideia fazendo a seguinte observação: podemos dizer que a energia “organizada”, concentrada e, portanto, energia de alta utilidade ou qualidade, acaba degenerando em energia “desorganizada”, com baixa utilidade ou qualidade. Uma vez que a água já fluiu sobre uma queda d’água, ela perdeu seu potencial para realizar trabalho útil. O mesmo acontece com a gasolina, em que a energia organizada se degrada quando queima dentro do motor de um carro. A energia útil degenera em forma não úteis, e é incapaz de realizar trabalho novamente, alimentando, por exemplo, um outro motor de automóvel. A perda de qualidade da energia ocorre a cada transformação que ela sofre.

Sobre esse assunto Nussenzveig (2002) e Young & Freedman (2003), escreveram:

O princípio do aumento da entropia mostra que a diferença está no aumento da entropia do universo no caso irreversível. Do ponto de vista prático, conforme vamos ver, isso corresponde em geral a um desperdício de energia que, em princípio, poderia ter sido utilizada. (NUSSENZEIG, 2002)

Considere a mistura de água quente com água fria. Poderíamos usar a água fria como os reservatórios quente e frio de uma máquina térmica. Enquanto retiramos calor da água quente e fornecemos calor para a água fria, podemos obter uma certa quantidade de trabalho. Porém, depois que a água se mistura e atinge o equilíbrio térmico, a oportunidade de se obter trabalho é perdida irreversivelmente. Depois do equilíbrio, a água quente não pode ser mais separada da água fria. Não existe nenhuma diminuição de energia quando a água quente se mistura com a água fria. O que foi perdido não foi a energia, mas sim a disponibilidade, ou seja, a oportunidade de se converter parte do calor da água quente em trabalho mecânico. Portanto, quando a entropia cresce, a energia para produção de trabalho torna-se menos disponível e o universo se torna mais caótico ou “aleatório”. (YOUNG & FREEDMAN, 2003)

Do exposto, fica evidente que durante as transformações naturais (processos irreversíveis), a energia se conserva, como previsto pela primeira lei da termodinâmica, contudo, a disponibilidade ou a qualidade dessa energia diminui, perdendo assim, seu potencial de realizar trabalho. O aumento da entropia por se tratar de um fenômeno irreversível, se perdermos a oportunidade de obtermos uma certa quantidade de trabalho no momento certo, já mais recuperaremos esse trabalho em situações futuras.

Se consideramos o universo como um sistema isolado, podemos dizer, sob a ótica da segunda lei da termodinâmica, que ele evolui no sentido de aumento da entropia, porque os processos naturais são irreversíveis e, por consequência, do esgotamento energético. Tal interpretação da segunda lei se torna bem pertinente, quando analisamos os problemas enfrentados pela sociedade no que diz respeito à crise energética frente aos problemas ambientais provocados, principalmente, pelas ações imprudentes do homem na exploração dos recursos naturais.

Talvez seja necessário desenvolver um trabalho de conscientização do homem focado no postulado da termodinâmica, onde fosse possível apresentar à sociedade a relação entre irreversibilidade e o esgotamento energético. Mostrar que o homem neste contexto atua como uma engrenagem aceleradora desse processo irreversível, conduzindo assim, o universo, neste caso de forma mais específico, o planeta Terra, a um lugar de disponibilidade de energia mínima ou de máxima entropia.

A divulgação do postulado da entropia se faz necessário ainda mais quando observamos o que diz o professor titular do DLO-FFLCHUSP, Dr. Mário Bruno Sproviero.

Com o problema da entropia ocorre um fenômeno curioso: apesar de ter a máxima importância, afetando diretamente - a curto, médio e longo prazo – a própria sobrevivência humana no planeta, tem sido bem pouco divulgado e assim praticamente ignorado pela opinião pública. Recentemente, foi publicado na Europa a tradução atualizada do clássico *Entropy* de Jeremy Rifkin, que apresenta a tendência

universal de todos os sistemas - incluídos os econômicos, sociais e ambientais - a passar de uma situação de ordem à crescente desordem. Portanto, deve ser discutido por toda a sociedade, em todos os seus setores e não apenas em círculos especializados de cientistas. (SPROVIERO, 2001, apud. GRÉCIO, 2016)

4.2.16 SETA DO TEMPO

Muitos autores associam os fenômenos irreversíveis ao sentido da passagem do tempo. Isso porque o tempo sempre irreversivelmente vai do passado para o futuro. Podemos observar isso na prática quando analisamos o crescimento de uma árvore ou o envelhecimento de uma pessoa, fatos estes que são impossíveis de ocorrer no sentido inverso.

Já sabemos que a única lei física que trata desse fenômeno, que distingue passado e futuro, é a segunda lei da termodinâmica. Se analisarmos a irreversibilidade sob a ótica da entropia de Boltzmann, veremos que a inversão da seta do tempo não é algo impossível, apenas improvável, porque possui chance mínima de ocorrer na prática, como por exemplo, na situação em que todas as moléculas de um gás presentes em uma caixa se distribuíssem espontaneamente de um único lado desse recipiente, figura 6. Isso não é impossível, contudo, tem probabilidade mínima de acontecer.

Essa tendência de associar a irreversibilidade a seta do tempo, pode ser percebido em Resnick & Halliday (2016), quando eles dizem:

Nos processos irreversíveis, a entropia de um sistema fechado aumenta. Graças a essa propriedade, a variação da entropia é às vezes chamada de “seta do tempo”. Assim, por exemplo, associamos a explosão de um milho de pipoca ao sentido positivo do tempo e ao aumento da entropia. O sentido negativo do tempo (um filme passado ao contrário) corresponde a uma pipoca se transformando em milho. Como esse processo resultaria em uma diminuição de entropia, ele jamais acontece. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Por mais que esses autores afirmam que a inversão da seta do tempo “jamais acontece”, porque se não a segunda lei da termodinâmica seria violada, pode-se assegurar que se analisarmos esta lei sob a perspectiva da mecânica estatística, por meio da equação da entropia de Boltzmann, concluiríamos surpreendentemente que existe uma probabilidade finita, embora muito pequena, de isso ocorrer, logo tal fato não é impossível de acontecer dentro dessa nova visão.

4.2.3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A Atividade Experimental consistiu na execução de uma experiência de lançamento simultâneo, pelos alunos, de dois dados não viciados, oportunidade em que as somas das faces foram anotadas em uma tabela.

Durante a execução da experiência, os alunos foram divididos em grupos de três e quatro participantes, onde cada grupo lançou por 36 vezes, dois dados não viciados, e

para cada lançamento, eles anotaram em uma tabela, o resultado da face 1 e da face 2, bem como a soma desses dois valores.

No capítulo 6 desta dissertação, onde consta a Metodologia e a Análise dos Resultados, foi feita uma descrição minuciosa de toda a abordagem experimental, bem como a análise e os objetivos dessa estratégia didática.

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo descreveremos o resultado da aplicação da nossa estratégia didática, a qual é composta por vários atos pedagógicos que compilados revelam-nos o objeto principal deste trabalho, o Produto Educacional.

É importante reforçar que a sequência didática exposta neste capítulo representa um projeto que nasceu durante minha graduação em física, oportunidade em que percebi a necessidade de se desenvolver uma metodologia de ensino que facilitasse a abordagem do conceito de entropia no ensino médio, tendo em vista se tratar de um conceito de grande relevância para a formação intelectual do estudante, mas que muitas vezes pouco abordado nos livros didáticos do ensino médio e como consequência, nas aulas de física dessa etapa da educação básica.

Mas porque esse conceito tão relevante possui pouco destaque nas aulas de física? Acreditamos que uma boa justificativa para isso seria a escassez de material pedagógico que aborde esse tema. Se recorrermos aos livros didáticos do ensino médio e até mesmo a rede de internet perceberemos o quanto difícil é encontrar um material de qualidade que trate desse assunto. Além disso, ao estudarmos o conceito de entropia, tomamos ciência do grau de complexidade que envolve a compreensão deste tópico. Mesmo um profissional do ramo da física necessita de um esforço intelectual muito grande para conseguir compreender a definição e, principalmente, os desdobramentos do conceito de entropia.

Foi com o objetivo de contribuir com a mudança dessa realidade do ensino da entropia, que construímos um Produto Educacional voltado para o ensino médio que traz uma sequência didática, orientada pela Aprendizagem Significativa de Ausubel e o Modelo de Gowin, a qual envolve o tripé: História da Ciência, Abordagem Conceitual e Atividade Experimental, conforme descritos nos tópicos seguintes.

5.1 PRODUTO EDUCACIONAL: DEFINIÇÃO, MATERIAIS UTILIZADOS E APLICAÇÃO

O Produto Educacional que propomos neste trabalho traz uma metodologia de ensino bastante coerente com a realidade do professor da educação básica. Utiliza-se materiais com um custo bem acessível, além de necessitar de uma estrutura bastante simples para sua execução, podendo ser aplicado perfeitamente em uma sala de aula convencional.

Como materiais utilizamos papel A4 na impressão das tabelas e questionários, dados não viciados, embalagem retangular para bolo G 78, figura 15, dentro da qual os dados foram lançados, caneta esferográfica, um notebook e um Datashow para projeção

dos slides utilizados durante a abordagem histórica e conceitual.



Figura 15: Nesta figura temos uma embalagem retangular para bolo G 78 dentro da qual os dados foram lançados. Temos também uma caneta esferográfica azul, dois dados pintados com cores diferentes, algumas tabelas impressas em papel A4, além de alguns alunos posicionados durante a realização da atividade experimental. Fonte: Autor.

Como já exposto anteriormente, nosso Produto Educacional utilizou a História da Ciência e a Atividade Experimental como recursos didáticos facilitadores para o ensino do conceito de entropia. Percebeu-se que a História da Termodinâmica se tornou bastante interessante para inserção da entropia de Clausius, e esta, conforme já previa a teoria da aprendizagem significativa, atuando como conhecimento prévio na estrutura cognitiva do aluno, ajudou-o a compreender de forma significativa a entropia de Boltzmann, que teve a Atividade Experimental como principal ferramenta pedagógica motivadora dessa aprendizagem.

A aplicação do Produto Educacional aconteceu de 22/03/2022 a 31/03/2022, ou seja, foram necessárias duas semanas, contudo, envolvendo um quantitativo de 16 aulas de 50 minutos cada. Já o público alvo foram 23 alunos dos 2º anos do Novo Ensino Médio, do Colégio da Polícia Militar do Estado de Goiás unidade Mansões Paraíso situado na cidade de Aparecida de Goiânia – GO.

Vale destacar que o Novo Ensino Médio nos possibilitou atender uma das condições preconizados pela Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, que segundo a qual, para que a aprendizagem significativa aconteça é necessário que o aluno manifeste disposição para aprender. Que o aluno demonstre interesse em aprender aquele determinado conteúdo ensinado pelo professor. Nas palavras de Moreira (1999):

A outra condição é que o aprendiz manifeste uma disposição para

relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo, a sua estrutura cognitiva. (MOREIRA, 1999, p. 156).

Dentre as mudanças que o Novo Ensino Médio implantou nas escolas, está aquela em que o aluno tem a liberdade de escolher a área de conhecimento em que ele demonstra mais afinidade e, portanto, mais disposição em aprender. Aproveitando dessa oportunidade, este trabalho foi aplicado em uma turma de alunos denominada Trilha 01, que trabalha a temática Energia que nos Move, e pertencente a área do conhecimento Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da qual fazem parte as disciplinas de Física, Química e Biologia. Esses alunos tiveram a liberdade de escolher estudar o assunto da citada Trilha, e representam uma parte dos alunos pertencentes a seis turmas de 2º anos. Os demais estudantes dessas turmas foram distribuídos, conformes suas preferências em Trilhas de outros assuntos e até mesmo de outras áreas do conhecimento, como nas áreas de Ciências Humanas, Linguagens, Matemáticas e suas Tecnologias.

Dessa forma, em consonância com a teoria de aprendizagem que norteou este projeto, os alunos manifestaram interesse em aprender o assunto abordado, consoante será discutido em tópicos posteriores.

Em relação a aplicação do Produto Educacional, este envolveu sete etapas, seguindo a sequência didática apresentada no fluxograma da figura 21.

Influenciados pela teoria da aprendizagem significa de Ausubel e pelo modelo de Gowin, na primeira etapa, em uma aula, por meio da aplicação de um questionário pré-teste - juntado no apêndice A - fizemos o diagnóstico dos conhecimentos prévios dos estudantes.

Após a aplicação do questionário pré-teste, nas duas aulas seguintes, partimos para a segunda etapa, onde fizemos a abordagem histórica por meio de aula expositiva usando um computador e um datashow, oportunidade em que os alunos puderam conhecer os principais acontecimentos da termodinâmica, desde as construções das primeiras máquinas térmicas, a formalização dos conceitos de temperatura, de calor, das leis da termodinâmica e do ciclo de Carnot, bem como dos conflitos que existiram em torno da formulação do conceito de entropia de Clausius.



Figura 16: Preparativos para início da segunda etapa da aplicação do produto. Fonte: Autor.

Na terceira etapa, foram necessárias seis aulas para fazermos a abordagem conceitual, porém bastante produtiva uma vez que já tínhamos conhecimento da qualidade dos conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Dessa forma, o processo de ensino e aprendizagem ficou bem mais interessante tanto para o professor quanto para os alunos.



Figura 17: Aula durante a terceira etapa da aplicação do produto. Fonte: Autor.

A quarta etapa, que aconteceu em uma aula, foi o momento de preparar os alunos para a atividade experimental, onde resolvemos questões de uma atividade teórica denominada “questões pré-lançamentos” – juntada no apêndice B –, que foi desenvolvida com o intuito de trabalhar com esses alunos os eventos probabilísticos presentes no

lançamento de um dado não viciado e no lançamento de dois dados simultâneos.

Depois disso, iniciamos a quinta etapa, com duração de uma aula, onde os 23 alunos foram divididos em seis grupos, cinco com quatro alunos e um com três alunos, os quais foram levados para o laboratório de ciências da escola, local em que os dois dados não viciados de cores diferentes, por ser tratar de eventos distinguíveis conforme já descrito em tópico anterior, foram lançados por 36 vezes e os pares de valores obtidos foram anotados por esses alunos na tabela 1 - juntado no apêndice C.

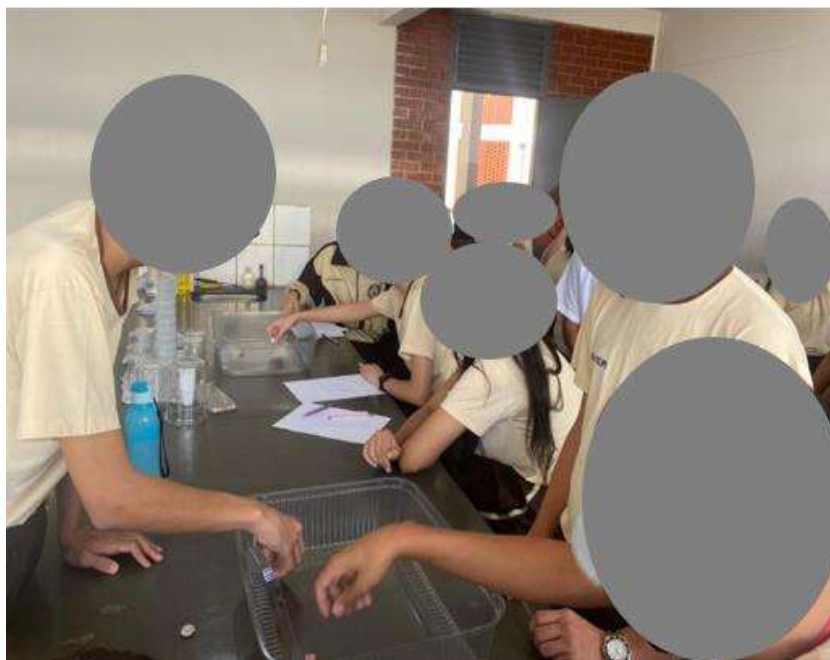


Figura 18: Realização da atividade experimental na quinta etapa. Fonte: Autor.

TABELA PARA EXPERIMENTAÇÃO

TABELA 01:
 Experimento: Lançamento de dados Grupo: F
 N° de integrantes: 4

36 Lançamentos de 2 dados simultâneos

N° de Lançamentos	Dado 01	Dado 02	Soma das Faces
1	1	1	2
2	1	2	3
3	1	3	4
4	1	4	5
5	1	5	6
6	1	6	7
7	2	1	3
8	2	2	4
9	2	3	5
10	2	4	6
11	2	5	7
12	2	6	8
13	3	1	4
14	3	2	5
15	3	3	6
16	3	4	7
17	3	5	8
18	3	6	9
19	4	1	5
20	4	2	6
21	4	3	7
22	4	4	8
23	4	5	9
24	4	6	10
25	5	1	6
26	5	2	7
27	5	3	8
28	5	4	9
29	5	5	10
30	5	6	11
31	6	1	7
32	6	2	8
33	6	3	9
34	6	4	10
35	6	5	11
36	6	6	12

Figura 19: Valores obtidos e registrados na tabela 1. Fonte: Autor.

Com essas informações registradas em planilha, foi possível na sexta etapa com duração de quatro aulas, os alunos resolverem algumas questões do questionário da atividade denominada “questões pós-lançamentos” – juntada no apêndice B, e a partir desse evento, a tabela mais importante da aplicação do produto foi preenchida, tabela 02 - juntada no apêndice D -, e, em seguida, as informações registradas nela foram amplamente debatidas com os alunos. Foi nesse momento que esses estudantes puderam visualizar de forma mais clara, os conceitos de microestado, macroestado, bem como a tendência natural de aumento da entropia nos eventos mais prováveis, conforme previsão de Boltzmann e de Shannon, e as discussões feitas durante as aulas expositivos relatadas na terceira etapa.

TABLE 02

Experimento: Lançamento de dados Grupo: B

Nº de integrantes: 06

Somas Possíveis Para 02 Dados (MACROESTADO)	Pares possíveis para Lançamentos (MICROESTADO)	Nº de Soma Possíveis Para 02 Dados (MÚLTIPLOS)	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica Máxima	Entropia (S _k = -ln W) Boltzmann	Entropia em função da Probabilidade (S = -p ln p) Shannon
2	(1,1)	1	1/36	1/36 = 2,7%	0	0,09
3	(1,2), (2,1)	2	2/36	2/36 = 1/18 = 5,5%	0	0,14
4	(1,3), (2,2), (3,1)	3	3/36	3/36 = 1/12 = 8,3%	0	0,19
5	(1,4), (2,3), (3,2), (4,1)	4	4/36	4/36 = 1/9 = 11,1%	1,1	0,23
6	(1,5), (2,4), (3,3), (4,2), (5,1)	5	5/36	5/36 = 13,8%	1,1	0,28
7	(1,6), (2,5), (3,4), (4,3), (5,2), (6,1)	6	6/36	6/36 = 1/6 = 16,6%	1,6	0,32
8	(2,6), (3,5), (4,4), (5,3), (6,2)	5	5/36	5/36 = 13,8%	1,1	0,28
9	(3,6), (4,5), (5,4), (6,3)	4	4/36	4/36 = 1/9 = 11,1%	1,1	0,23
10	(4,6), (5,5), (6,4)	3	3/36	3/36 = 1/12 = 8,3%	0	0,19
11	(5,6), (6,5)	2	2/36	2/36 = 1/18 = 5,5%	0	0,14
12	(6,6)	1	1/36	1/36 = 2,7%	0	0,09
Total de Lançamentos (Espaço amostral - Tabela 1)				36		

Figura 20: Valores registrados na tabela 02, com indicação da entropia máxima, na linha soma 7, destacada pelos alunos do grupo B. Fonte: Autor.

Depois de esgotados os debates em torno dos conceitos envolvidos na tabela 02, momento em que foram sanadas todas as dúvidas e curiosidades dos alunos, os quais se

apresentaram bastantes inquietos e deslumbrados, principalmente com os desdobramentos do conceito de entropia, finalmente concluímos a sétima etapa da aplicação do produto, que foi realizada em uma única aula, oportunidade em que os alunos puderam demonstrar seus conhecimentos adquiridos respondendo as questões do questionário pós-teste – juntado no apêndice E –.

Na figura 21 temos um fluxograma com a sequência didática da aplicação do produto educacional relatada neste tópico, conforme descrito acima.

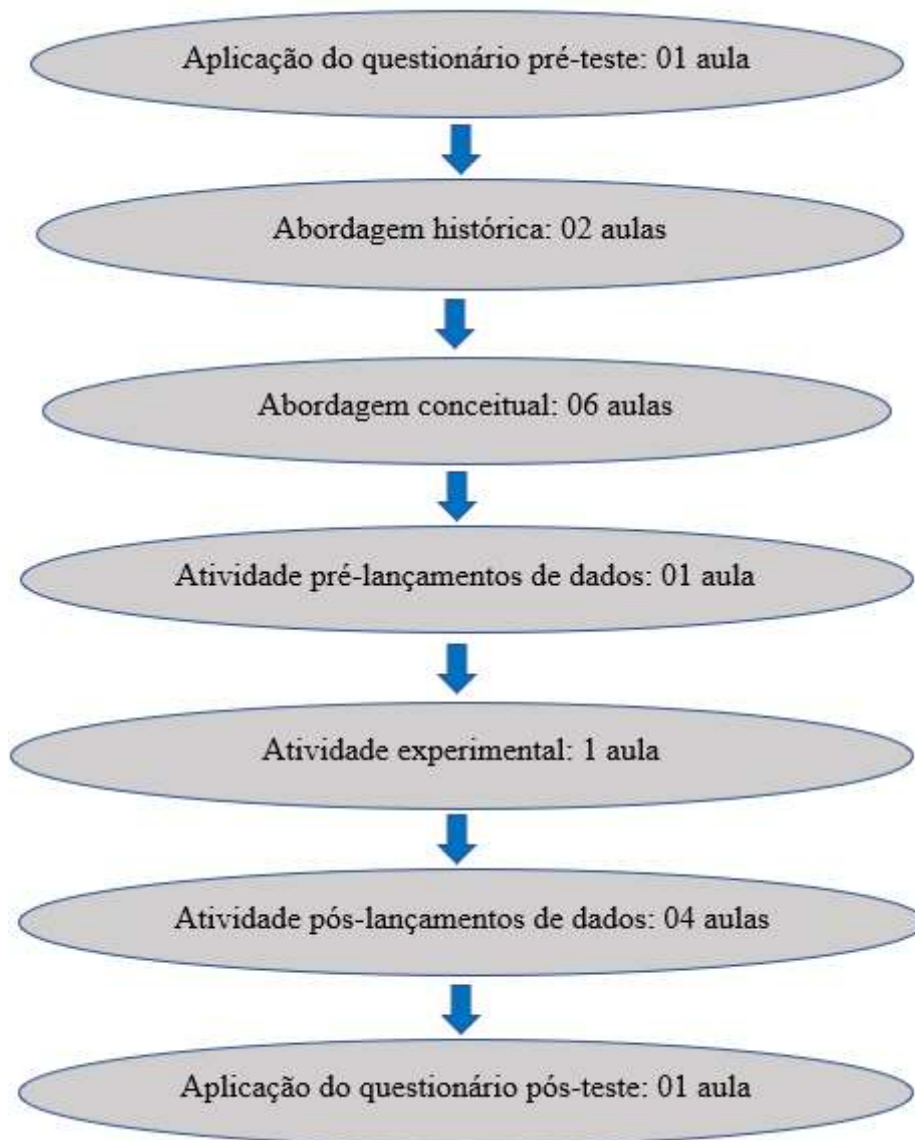


Figura 21: Fluxograma com a sequência didática da aplicação do produto educacional.
Fonte: Autor.

5.2 Análise das informações coletadas pelo questionários pré-teste

Em consonância com a Teoria da Aprendizagem Significativa, o referencial teórico que norteia este trabalho, o início da aplicação do Produto Educacional se deu com a verificação dos conhecimentos prévios dos alunos sobre alguns conceitos e

fenômenos da Termodinâmica. Para isto aplicamos um questionário pré-teste – juntado no apêndice A – composto por 13 questões, as quais foram elaboradas pelo próprio autor.

5.2.1 Objetivos das questões do questionário pré-teste e análise das respostas obtidas

Nesse questionário, a questão 1 tinha como objetivo verificar o conhecimento do aluno sobre o conceito de temperatura. Enquanto as questões 2 e 3 buscaram diagnosticar nesses alunos o que eles entendiam sobre o conceito de calor, e mais, se eles conseguiam perceber essa grandeza como sendo uma forma de energia em trânsito.

Por meio das respostas obtidas para essas questões foi possível verificar que esses alunos tratavam o conceito de calor e de temperatura como se fossem iguais, ambos representando as sensações que eles têm de quente e frio, o que demonstra que esses estudantes adquiriram essas concepções durante sua formação cotidiana baseada em conhecimento oriundo do senso comum, as quais são parecidas com os pensamentos de vários cientistas do século XVIII, conforme foram demonstradas na abordagem histórica (segunda etapa).

QUESTIONÁRIO PRÉ - TESTE

ESTE QUESTIONÁRIO TEM COMO OBJETIVO ENTENDER COMO VOCÊ PENSA CERTAS IDEIAS A RESPEITO DA FÍSICA TÉRMICA. ELE NÃO SERÁ USADO PARA AVALIAÇÃO. PROCURE RESPONDÊ-LO COM SUAS PALAVRAS. VOCÊ ESTARÁ NOS AJUDANDO A MELHORAR O ENSINO. MUITO OBRIGADO!

Turma: 1a. Mo. 1 Data: 22/09/2022

1. O que você entende por temperatura? Dê exemplos.
Temperatura é quando alguma coisa está quente ou fria, assim podendo ter temperatura de -30°C ou 30°C, um fogão é um bom exemplo pois nele você consegue aquecer e baixar a temperatura

2. Defina com suas próprias palavras o conceito de calor. Dê exemplos.
Calor é quando está quente, em alguns casos as pessoas transpiram ou se sentem abafadas, calor é quando você precisa de algo para abrigar você quando está muito quente, um exemplo é uma moedinha que quase sempre está quente

• Responda as questões 3, 4 e 5 escolhendo apenas uma das alternativas.

3. Associamos a existência de calor:

a) A qualquer corpo, pois todo corpo possui calor.
b) Apenas aqueles corpos que se encontram "quentes".
c) As situações nas quais há, necessariamente, transferência de calor.

Figura 22: Resposta obtida de um aluno às questões 1, 2 e 3. Fonte: Autor.

As questões 4, 5 e 6, objetivaram avaliar se os alunos eram capazes de diferenciar o conceito de temperatura e calor, observando que nem sempre o fornecimento de calor a um corpo implica na variação da sua temperatura. Pretenderam avaliar também a noção do aluno sobre equilíbrio térmico.

Questões como essas, demonstraram de forma bem simples que os conceitos de temperatura e de calor que os alunos tanto confundem são completamente distintos.

De acordo com as respostas apresentadas, percebemos que esses alunos possuíam uma boa noção de equilíbrio térmico. Porém, foi uma unanimidade entre eles acharem que o fornecimento de calor a um corpo implica sempre no aumento de sua temperatura. Talvez essa percepção existia porque para eles ainda não estava claro que temperatura e calor são conceitos que expressam fenômenos completamente distintos.

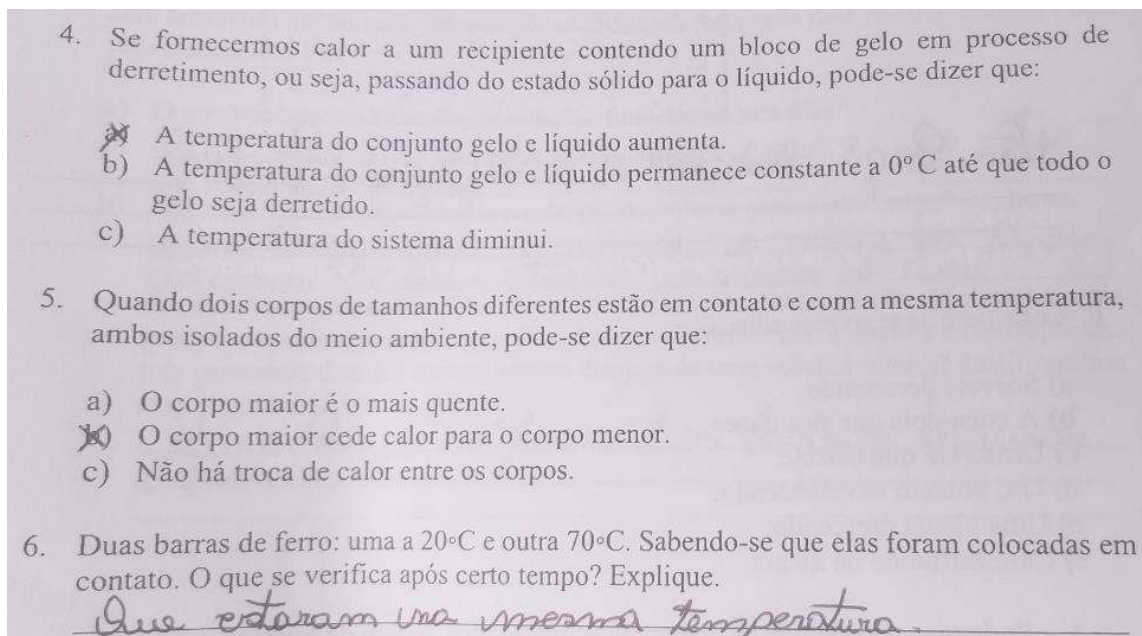


Figura 23: Resposta obtida de um aluno às questões 4, 5 e 6. Fonte: Autor.

Por outro lado, a questão 8 foi aplicada para verificar a compreensão desses alunos sobre o sentido preferencial dos processos espontâneos. E as questões 7, 9 e 10 objetivaram avaliar as noções prévias desses estudantes a respeito da impossibilidade de reversão espontânea após a ocorrência de um processo espontâneo.

De modo geral esses alunos demonstraram que possuíam uma boa noção do sentido correto de ocorrência do fenômeno abordado na questão 8. Suas respostas revelaram também que a maioria deles tinham uma percepção coerente acerca da impossibilidade de reverter um processo irreversível espontaneamente, conforme indagado nas questões 7, 9 e 10.

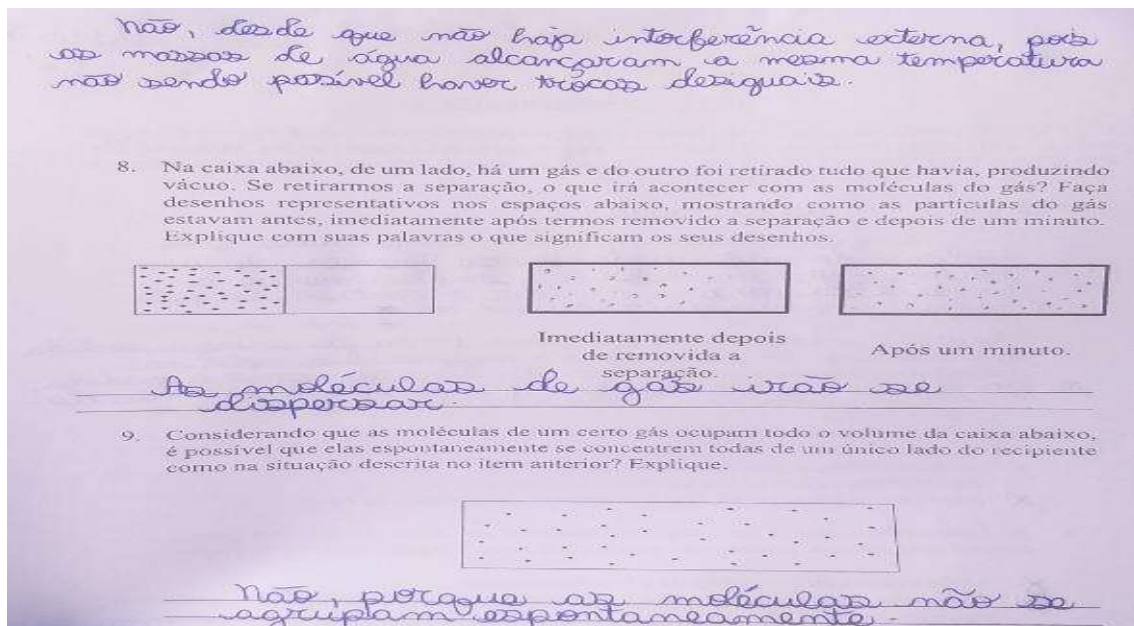


Figura 24: Resposta obtida de um aluno às questões 7, 8 e 9.

E voltado diretamente para o tema deste trabalho, tivemos as questões 11, 12 e 13, onde as questões 11 e 12 trataram de coletar os conhecimentos prévios desses alunos a respeito do que eles pensavam sobre a degradação da energia útil de um processo termodinâmico irreversível. E por fim, tivemos a questão 13 que além de coletar os conhecimentos prévios desses aprendizes a respeito da relação existente entre aumento da entropia e processo irreversível, objetivou estimular a curiosidade desses estudantes a respeito desse importante fenômeno da física térmica.

Analisando as respostas dadas à essas questões, foi possível perceber que esses alunos acreditavam fortemente que a energia do universo é finita, mas não conseguiram demonstrar nenhum conhecimento formal para justificar essa afirmação. Além disso, a grande maioria revelou acreditar na máquina perfeita, autônoma, autossuficiente em energia. Sobre essa concepção, alguns evitaram apresentar justificativas, já outros, argumentaram dizendo que atualmente não, mas no futuro próximo a tecnologia estará tão avançada que tal invento se tornará uma realidade.

Em relação a questão 13, esses aprendizes foram unânimes em dizer que naturalmente com o tempo o quarto ficará bagunçado, desorganizado, mas como já era esperado, eles evitaram associar o presente fato com o aumento da entropia, mas foi possível notar que esses alunos ficaram bastante curiosos e inquietos com o surgimento desse novo conceito.

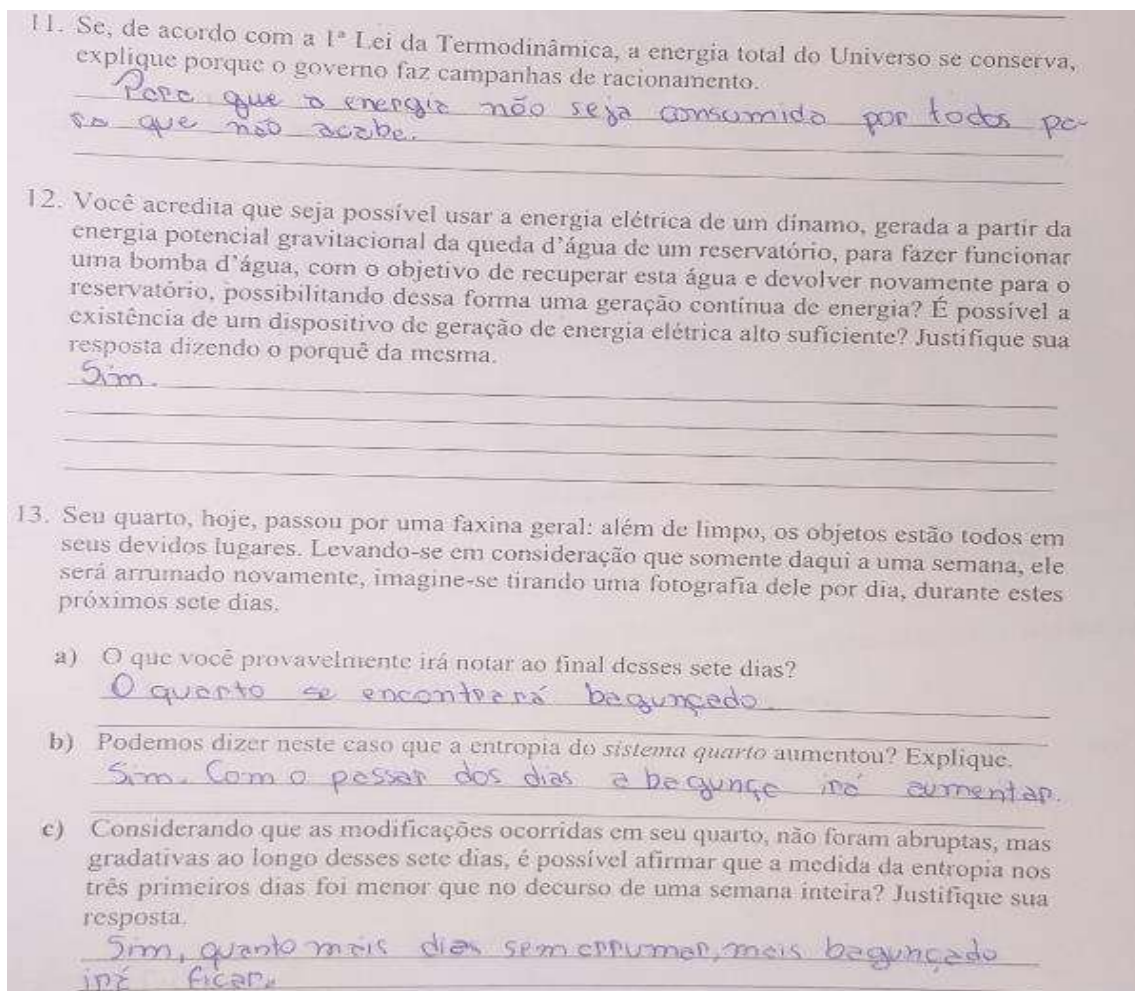


Figura 25: Resposta obtida de um aluno às questões 11, 12 e 13. Fonte: Autor.

Do exposto, nota-se que o questionário pré-teste nos possibilitou verificar a qualidade dos conhecimentos prévios dos alunos, e assim contribuiu de forma significativa, conforme preconiza a Teria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, com nossa intervenção conceitual, porque foi possível mapear de maneira mais precisa como os alunos pensavam certos conceitos. Além disso, foi possível perceber que esses estudantes ficaram bastante inquietos e curiosos com os questionamentos feitos por meio das questões por eles respondidas, o que deixou a aula bem mais atrativa, dando-as um significado mais relevante.

5.3 Abordagens histórica, conceitual e atividade experimental

Devido a implantação do Novo Ensino Médio neste ano de 2022 em todas as unidades de ensino do estado de Goiás, do retorno as aulas presenciais, pós-pandemia da Covid-19, com reposição de conteúdos ao mesmo tempo em que acontecia o ensino do conteúdo regular, e pelo fato também do colégio local em que esse Produto Educacional foi aplicado, funcionar como escola piloto, não foi fácil conseguir um espaço temporal adequado para realização da presente pesquisa, o que justifica o fato de termos que nos

adequar em duas semanas de aulas, contudo, isso não comprometeu a qualidade das 16 dias aulas ministradas.

Notou-se que o questionário pré-teste, além de revelar os conhecimentos prévios dos alunos, contribuiu para despertar neles o interesse em querer aprender os conceitos avaliados. Dessa forma, por várias vezes, no intuito de controlar a ansiedade desses alunos, durante a abordagem conceitual, eles foram orientados a aguardarem o assunto da aula seguinte, principalmente em relação ao conceito de entropia e seus desdobramentos como a que trata da degradação da energia. À medida que as aulas aconteciam, eles ficavam ainda mais curiosos para entender o quanto antes o que de fato expressava o conceito de entropia, e muitas vezes fazendo perguntas instigadoras, como: “*É possível voltarmos no tempo?*”, “*O teletransporte existe?*”, “*O universo vai entrar em equilíbrio térmico?*”, “*O mundo vai acabar?*”, dentre outros questionamentos.

Por mais que muitas dessas dúvidas manifestadas por esses alunos não fizessem tanto sentido físico, elas demonstravam o grau de envolvimento desses estudantes com o projeto.

Percebeu-se que a abordagem histórica motivou os alunos principalmente por fazer eles perceberem o contexto no qual se deram a descoberta e a formalização dos conceitos da física térmica. Além disso, eles puderam conhecer os métodos e processos, muitas vezes árduos, de construção do conhecimento científico. Não só isso, em muitas ocasiões, chegaram a relatar que as concepções dos cientistas daquela época, séculos XVII e XVIII, eram muito parecidas com suas concepções prévias e informadas no questionário pré-teste.

Durante as aulas expositivas dos conteúdos específicos, onde foram abordados os conceitos de: energia térmica, calor, temperatura, equilíbrio térmico, primeira e segunda leis da termodinâmica, máquina térmica, entropia de Clausius, ciclo de Carnot, microestado, macroestado, multiplicidade, entropia de Boltzmann, entropia de Shannon; em que foram apresentados os desdobramentos do conceito de entropia, como a inversão da seta do tempo e o esgotamento energético, além de fazer uma inserção superficial do conceito de probabilidade voltado para o lançamento de dados, grande parte dos alunos se manteve focado e comprometido com tudo que foi ensinado, participando com discussões e fazendo perguntas com o intuito de solucionar as dúvidas relacionadas com os tópicos trabalhados.

Findado esta explanação teórica, a atividade que tratava das questões pré-lançamentos (apêndice B) foi resolvida com os alunos com o intuito de facilitar o aprendizado do conteúdo de probabilidade, e prepará-los para melhor desempenho

durante a atividade prática. Nessa ocasião, os alunos assessorados pelo pesquisador, resolveram questões simples de probabilidade envolvendo o lançamento de dois dados, conforme expostos nas perguntas a seguir: “*Lançando simultaneamente 2 dados, qual a probabilidade da soma das faces obter valor igual a 2?*” ou “*Quais os possíveis resultados quando lançamos dois dados?*”.

É oportuno ressaltar que as questões pré-lançamentos foram inspiradas em uma atividade realizada por Silva (2020) em sua pesquisa de mestrado.

Logo após realização da atividade pré-lançamentos, consoante já relatado na descrição da quinta etapa e figura 18 os alunos foram levados para o laboratório para o momento de realização de coleta de dados, na oportunidade em que a tabela 1 (figura 19 e apêndice C) foi preenchida com os respectivos valores obtidos. De posse dessas informações, esses aprendizes retornaram para a sala de aula, local em que passaram a classificar essas informações utilizando a atividade pós-lançamentos.

Essa atividade pós-lançamento foi elaborada por este pesquisador com o intuito de fazer a transposição didática para o ensino dos conceitos de microestado, macroestado (ou configuração), multiplicidade, e de entropias tanto a de Boltzmann quanto a de Shannon, os quais são descritos em função da probabilidade de ocorrência de um dado fenômeno.

A seguir temos as questões pós-lançamentos (juntada também no apêndice B), onde é possível notar a transposição didática dos conceitos físicos da mecânica estatística retromencionados, por meio dos valores obtidos e registrados na tabela 1.

Questões pós-lançamentos

1- *A partir dos valores obtidos nos lançamentos dos 2 dados, durante as 36 repetições, responda:*

a) *Os macroestados (as somas possíveis obtidas).*

_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____

b) *Os microestados (os pares ordenados de valores obtidos classificando-os por macroestado).*

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

- c) *Qual somatória de faces ocorreu mais vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão n°***

- d) *Qual somatória de faces ocorreu menos vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão n°***

- 2- *De posse da tabela de valores obtidos com os lançamentos dos 2 dados, indique:*

- a) *As multiplicidades (o número de microestados para cada macroestado) e as respectivas entropias em unidade de 10^{-23} J/K.*

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

- b) O que se pode concluir dos resultados obtidos acima? Para isso, reveja os resultados obtidos na **letra b** da questão n°

- e) Organize esses resultados em uma segunda tabela fornecida posteriormente pelo professor, a qual organiza os resultados, em função da **multiplicidade, macroestado, microestado e entropia**.

- 3- Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?

Abaixo consta uma fotografia ilustrando o momento em que os alunos faziam a apuração desses dados, por meio da resolução das questões citadas acima.



Figura 26: Representação do momento de apuração e classificação das informações obtidas durante o lançamento dos dois dados. Fonte: Autor.

Os resultados alcançados durante realização da atividade pós-lançamentos foram organizados de forma bem mais didática e, portanto, bem mais compreensiva, na tabela

2.

TABELA 02:

Experimento: Lançamento de dados **Grupo:** _____

Nº de integrantes: _____

Somas Possíveis Para 02 Dados (MACROESTADO)	Pares Obtidos nos Lançamentos (MICROESTADO)	Nº de Soma Possíveis Para 02 Dados	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica / Máxima	Entropia/k ($S/k = \ln W$) Boltzmann	Entropia em Função da Probabilidade da Probabilidade ($S = -p \log p$) Shannon
2				$1/36 = 2,7\%$		
3				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
4				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
5				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
6				$5/36 = 13,8\%$		
7				$6/36 = 1/6 = 16,6\%$		
8				$5/36 = 13,8\%$		
9				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
10				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
11				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
12				$1/36 = 2,7\%$		
Total de Lançamentos (Espaço amostral – Tabela 1)				36		

Figura 27: Tabela 2 antes de ser preenchida. Fonte: Autor.

TABELA 02:
 Experimento: Lançamento de dados Grupo: F
 Nº de integrantes: 04

Somas Possíveis Para 12 Dados (MACROESTADO)	Pares Obtidos nos Lançamentos (MICROESTADO)	Nº de Somas Possíveis Para 02 Dados (MULTIPLICIDADE)	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica / Máxima	Entropia k (S/k = ln W) Boltzmann	Entropia em Função da Probabilidade (S = -p log p) Shannon
2	(1, 1)	1	2,7%	1/36 = 2,7%	0	0,04
3	—	—	—	2/36 = 1/18 = 5,5%	—	—
4	(1, 3), (3, 1)	2	5,5%	3/36 = 1/12 = 8,3%	0,7	0,07
5	(3, 2), (4, 1), (2, 3), (1, 4)	4	11,1%	4/36 = 1/9 = 11,1%	1,4	0,10
6	(3, 3), (3, 4)	2	5,5%	5/36 = 13,8%	0,7	0,07
7	(3, 4), (5, 2), (2, 6), (2, 5), (3, 4)	5	11,1%	6/36 = 1/6 = 16,6%	1,6	0,12
8	(3, 5), (6, 2), (2, 6)	3	8,3%	5/36 = 13,8%	1,1	0,08
9	(5, 4), (4, 5)	2	5,5%	4/36 = 1/9 = 11,1%	0,7	0,07
10	(4, 6), (6, 4)	2	5,5%	3/36 = 1/12 = 8,3%	0,7	0,07
11	(6, 5)	1	2,7%	2/36 = 1/18 = 5,5%	0	0,04
12	(6, 6)	1	2,7%	1/36 = 2,7%	0	0,04
Total de Lançamentos (Espaço amostral - Tabela 1)				36		

Figura 28: Tabela 2 com os valores obtidos e os cálculos das entropias de Boltzmann e de Shannon. Fonte: Autor.

Como já foi dito anteriormente, os 23 alunos foram divididos em seis grupos, destes somente dois, os grupos C e D, não conseguiram obter os resultados esperados para os valores da entropia. Seus cálculos ficaram incoerentes com o valor teórico que previa a soma 7 como evento mais provável e, portanto, de maior entropia. Apesar disso, verificou-se que o aprendizado desses estudantes não ficou prejudicado, pelo contrário, contribuiu para que a turma entendesse que o lançamento de dados é um evento probabilístico, o que significa dizer que quanto maior o espaço amostral, maior é a chance

de um determinado evento acontecer. Logo, da análise da situação, eles concluíram que tal incoerência poderia ser corrigida aumentando o espaço amostral de 36 lançamentos (tabela 1 e figura 19) para um valor mais significativo.

Para reforçar essa percepção desses estudantes, eles resolveram a questão 3 da atividade pós-lançamentos, a qual pergunta: “3- *Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?*”, oportunidade em que responderam com a ajuda do professor pesquisador, que seria necessário um número muito grande de vezes.

Antes de iniciarmos a análise do desempenho desses estudantes por meio do questionário pós-teste, é importante ressaltar que a tabela 2 prevê 36 lançamentos oriundos dos registros constantes na tabela 1, contudo, alguns pares de valores foram excluídos por serem perfeitamente iguais, não mudando nem mesmo a ordem com que apareceram, motivo pelo qual quando somamos a quantidade desses pares de valores não obtemos os 36 previstos. Isso se fez necessário para mantermos a quantidade de lançamentos planejados e não termos que fazer lançamentos extras no momento de preenchimento da tabela. Frisa-se que essas modificações não foram tão relevantes a ponto de prejudicar o objetivo deste projeto.

5.4 Análise das informações coletadas pelo questionários pós-teste

Para avaliar a aprendizagem dos estudantes participantes desta pesquisa, iniciaremos na subseção seguinte, a análise das respostas obtidas por meio do questionário pós-teste (apêndice E). Em seguida esses questionários serão classificados conforme os números de erros e acertos e organizados em um gráfico para melhor ilustração.

Esta atividade avaliativa, apesar de ser formada por algumas questões de enunciados diferentes, avaliou os mesmos conhecimentos que o questionário pré-teste, possui o mesmo número de perguntas, ou seja, 13 questões, as quais foram elaboradas também pelo próprio autor.

5.4.1 Objetivos das questões do questionário pós-teste e análise das respostas obtidas

Nesse questionário, a questão 1 tinha como objetivo avaliar o conhecimento do aluno sobre a relação entre os conceitos de calor e de temperatura. Enquanto a questão 2 buscou averiguar o que esses alunos aprenderam sobre o conceito de calor, e mais, se eles conseguiram perceber essa grandeza como sendo uma forma de energia em trânsito.

Por meio das respostas obtidas para essas questões foi possível verificar que grande parte desses alunos conseguiu de fato entender os conceitos de calor e de

temperatura. Conseguiram, por exemplo, vincular o conceito de calor ao conceito de energia térmica em trânsito entre corpos de temperaturas diferentes. Deixando assim, de tratar o calor como uma propriedade de um corpo, além disso, conseguiram desfazer a concepção oriunda do senso comum de que calor é a sensação que temos de frio e de quente.

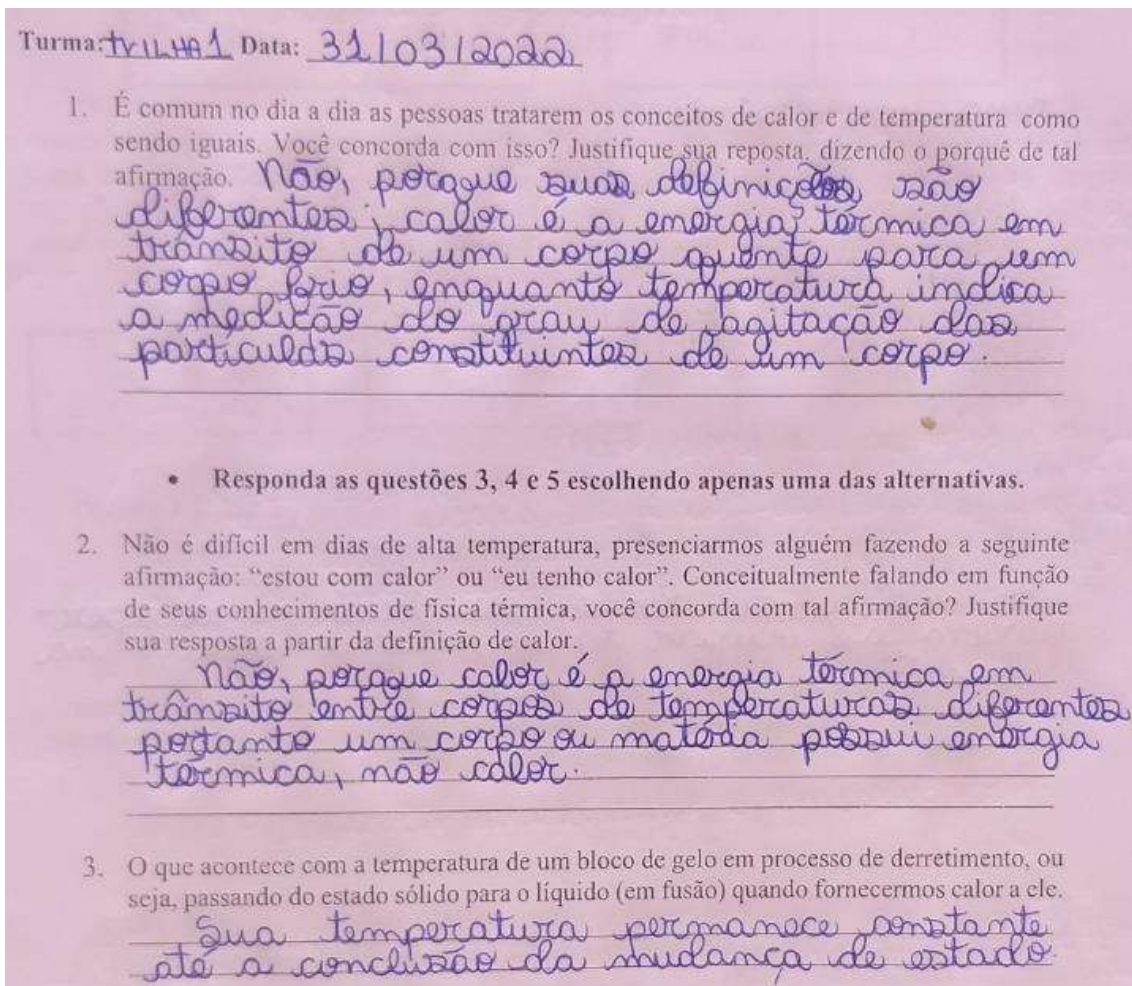


Figura 29: Resposta obtida de um aluno às questões 1 e 2. Fonte: Autor.

As questões 3, 4 e 5, objetivaram avaliar se os alunos eram capazes de diferenciar o conceito de temperatura e calor, observando que nem sempre o fornecimento de calor a um corpo implica na variação da sua temperatura. Pretendeu avaliar também a noção do aluno sobre equilíbrio térmico.

Em suas respostas, esses estudantes deixaram bem explícitos que são capazes de definir e de diferenciarem os conceitos de calor e de temperatura, bem como demonstraram também que são capazes de identificar o fenômeno do equilíbrio térmico, o que é bastante significativo, tendo em vista o grau de dificuldades que esses conceitos apresentam para serem compreendidos.

3. O que acontece com a temperatura de um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido (em fusão) quando fornecermos calor a ele.
A temperatura permanece constante, pois calor e temperatura tem conceitos diferentes.
4. Julgue a veracidade das seguinte proposição marcando V para verdade e F para falsa, a partir da análise da seguinte afirmação: *se dois corpos de tamanhos diferentes estiverem em contato e com a mesma temperatura, e ambos isolados do meio ambiente, pode-se dizer que:*
- (F) O corpo maior é o mais quente.
 - (F) O corpo maior cede calor para o corpo menor.
 - (V) Não há troca de calor entre os corpos.
5. Tem-se duas barras de alumínio: uma a 40°C e outra 60°C . Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.
elas vão atingir a mesma temperatura, ou seja, equilíbrio térmico.

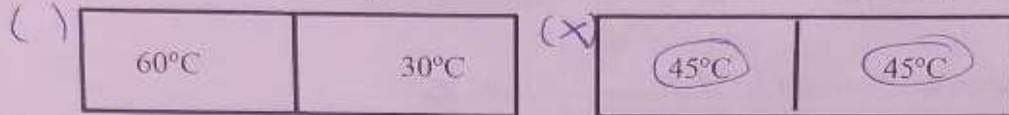
Figura 30: Resposta obtida de um aluno às questões 3, 4 e 5. Fonte: Autor.

Por outro lado, a questão 7 foi aplicada para verificar a compreensão desses alunos sobre o sentido preferencial dos processos espontâneos. E as questões 6, 8 e 9 objetivaram mensurar o conhecimento adquirido por esses estudantes a respeito da impossibilidade de reversão espontânea após a ocorrência de um processo espontâneo.

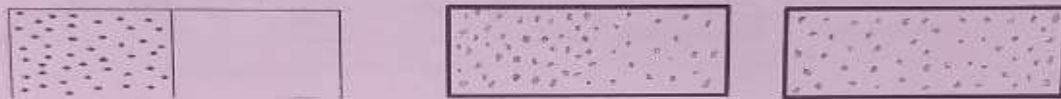
De forma unânime esses alunos demonstraram que conseguiram entender muito bem o sentido correto de ocorrência do fenômeno abordado na questão 7, inclusive, na maioria dos casos, citaram a segunda lei da termodinâmica em suas justificativas. Foi possível perceber também que a maioria deles adquiriram uma percepção coerente e, portanto, formal acerca da impossibilidade de reverter um processo irreversível espontaneamente, conforme indagado nas questões 6, 8 e 9, e muitos deles, de forma plausível, recorreram ao conceito de entropia ou a segunda lei da termodinâmica para fundamentarem suas respostas.

Não porque depois que a uma troca de calor entre corpos é impossível que voltem as suas temperaturas iniciais

temperatura de 30°C. Encostando uma na outra, verifica-se que após certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 45°C. Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 45°C, voltem às temperaturas que anteriormente eram de 60°C e 30°C? Justifique.



7. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de removida a separação.

Após um minuto.

~~Primeiramente uma parte toca mais gás concentrado após um minuto toda a caixa moléculas estarão iguais~~

8. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



~~Não porque ocorre espontaneamente iria revelar a 2ª lei da entropia~~

9. Considere as seguintes situações:

- a) Gelo derretendo; b) A refrigerante que fica choça; c) Uma vela que derrete;
d) Um homem envelhecendo; e) Uma planta crescendo; f) Leite esfriando na xícara.

A - Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis?

~~Os físicos que indicam não C-D-E porque quando uma coisa não podemos fazer nada para voltar ao estado inicial~~

B - Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

Figura 31: Resposta obtida de um aluno às questões 6, 7, 8 e 9. Fonte: Autor.

Assim, voltado diretamente para o tema deste trabalho produzimos as questões 10, 11, 12 e 13, onde as questões 10 e 11 trataram de averiguar os conhecimentos

assimilados por esses alunos a respeito do que eles pensavam sobre a degradação da energia útil de um processo termodinâmico irreversível. E por fim, tivemos as questões 12 e 13 que além de coletarem os conhecimentos assimilados por esses aprendizes a respeito da relação existente entre aumento da entropia e processo irreversível, objetivaram estimular a curiosidade desses estudantes a respeito desse importante fenômeno da física térmica.

Através dessas questões, foi possível mensurar o grau de conhecimento dos alunos acerca da segunda lei da termodinâmica, da entropia e da degradação da energia, e de acordo com as respostas obtidas, notou-se que quase a totalidade desses estudantes apresentaram respostas satisfatórias para o que foi solicitado nas referidas questões. Conseguiram associar a segunda lei da termodinâmica e a entropia ao princípio do esgotamento energético e a limitação imposta pela natureza ao rendimento de uma máquina térmica. Conseguiram associar muito bem o aumento da entropia com a desordem de um sistema, como a desorganização espontânea de um quarto, assim como vincularam esses conceitos a seta do tempo, conforme resposta dada na questão 13.

Escreva item como se fosse uma pergunta, por favor

9 - Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?
Um homem urinando, a explosão, a combustão e a seta que desliza.

10. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.
Por se de acordo com a 2ª Lei a energia que pode ser utilizada para trabalho mecânico se esgota.

11. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dinamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.
Não, pois o dispositivo não consegue utilizar toda a energia.

12. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

a) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?
A entropia irá aumentar nos sete dias.

b) Podemos dizer neste caso que a entropia do sistema quarto aumentou? Explique.
Sim, a tendência é se aumentar.

c) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decorrer de uma semana inteira? Justifique sua resposta.
Sim, pois nos primeiros dias será possível manter o quarto em ordem.

13. (UCS-2011) Um recente filme que no Brasil recebeu o nome de "O Curioso Caso de Benjamin Button", protagonizado pelo ator Brad Pitt, conta a história curiosa de um personagem que nasce velho e, à medida que o tempo passa, vai rejuvenescendo. Se pensarmos no envelhecimento humano como um processo energeticamente irreversível, qual título alternativo do filme ficaria coerente com as leis da Física?

a) A Curiosa Obediência à Equação de Clapeyron
b) O Extraordinário Caso da Violação da Segunda Lei de Newton
 c) O Estranho Caso de Violação da Segunda Lei da Termodinâmica
d) O Incomum Caso de Confirmação da Primeira Lei da Termodinâmica
e) O Intrigante Caso de Violação da Terceira Lei de Newton

Figura 32: Resposta obtida de um aluno às questões 10, 11, 12 e 13. Fonte: Autor.

Diferentemente das respostas dadas no questionário pré-teste, onde apareceram termos oriundos do senso comum como frio e quente, e de tratarem o calor como sendo temperatura e vice-versa, nas respostas elaboradas após a aplicação do produto educacional, os estudantes, para justificar seus posicionamentos, passaram a usar conceitos técnicos da física térmica como: agitação das partículas, energia em trânsito, esgotamento energético, equilíbrio térmico, degradação da energia, dissipação, violação da entropia ou da segunda lei da termodinâmica, dentre outros termos.

Dessa forma, o questionário pós-teste, pôde nos revelar que grande parte desses alunos apresentaram uma evolução significativa em suas concepções após a nossa intervenção.

5.5 Classificação dos resultados obtidos

Com o intuito de visualizarmos melhor a eficiência da nossa intervenção didática e, portanto, da qualidade deste Produto Educacional, segue abaixo por meio de tabelas e de um gráfico, uma relação entre o número de alunos e a quantidade de questões corretas obtidas por eles no questionário pós-teste.

Desempenho por quantidade de questões corretas	
Quantidade de questões corretas	Número de alunos
1 a 5	0
6	1
7	1
8	3
9	0
10	1
11	9
12	3
13	5

Tabela 4: Quantidade de alunos em relação ao número de questões corretas obtidas por eles no questionário pós-teste. Fonte Autor.

Desempenho por quantidade de questões corretas			
Quantidade de questões corretas	Percentual de questões	Número de alunos	Percentual de alunos
1 a 10	76,9%	6	26%
11 a 13	84,6%	17	74%

Tabela 5: Quantidade de alunos em relação ao número de questões corretas obtidas por eles no questionário pós-teste nos intervalos de 1 a 10 e de 11 a 13. Fonte Autor.

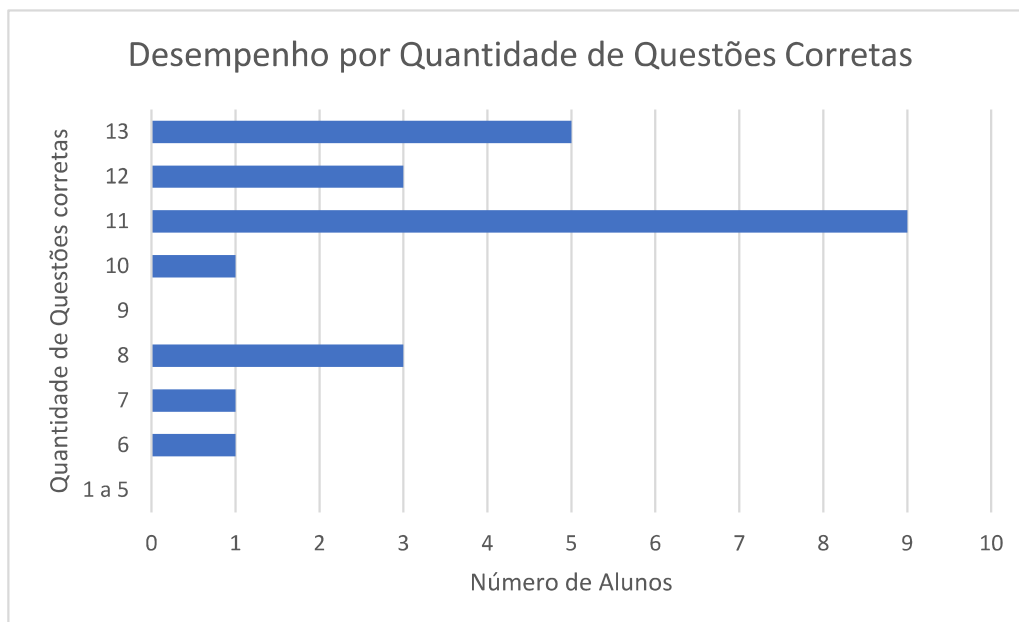


Gráfico 1: Histograma representando a quantidade de questões corretas em função do número de alunos. Fonte Autor.

Tanto as tabelas 4 e 5 quanto o gráfico 1 classificam a quantidade de alunos em relação ao número de questões corretas do questionário pós-teste.

Por meio da tabela 1 e do histograma é possível notar que a maior parte desses alunos, de um total de 13 questões, conseguiu responder de forma correta acima de 11 delas. De forma mais precisa, temos na tabela 5 que 17 alunos, ou seja, 74% dos 23 alunos participantes da pesquisa, conseguiram fornecer uma resposta satisfatória para pelo menos 11 das 13 questões avaliadas, sendo que deste universo 5 estudantes conseguiram acertar todas as 13 questões do questionário.

Em contrapartida percebe-se através da tabela 1 e do gráfico 1, que nenhum dos 23 alunos avaliados, acertaram menos que 5 questões.

Do exposto, verifica-se que a nossa estratégia didática, materializada por meio do nosso Produto Educacional, se revelou bastante eficiente no processo de ensino e aprendizagem dos principais conceitos da física térmica e em especial do conceito de entropia de Boltzmann.

Apesar disso, para o professor que adotar este Produto Educacional como estratégia didática para o ensino da entropia estatística, sugerimos, de forma complementar, que ele organize uma tabela com todos os valores coletados no lançamento dos dados, e após isso, plote um gráfico das somas dos valores obtidos em função da frequência de ocorrência desses valores. Com isso ele será capaz de demonstrar para os estudantes, que quanto maior o número de lançamento, mais preciso será o resultado

pretendido, neste caso será mais convincente para os aprendizes o resultado soma 7 que tende a ocorrer com maior frequência, por ser um evento mais provável e, portanto, fazendo uma analogia com os eventos termodinâmicos, a situação em que a entropia se torna máxima.

A título de exemplo, como descrito no parágrafo anterior, no tópico seguinte todos os 216 (6 grupos com 36 lançamentos cada) valores coletados pelos seis grupos de alunos foram organizados em uma tabela e representados em um gráfico para melhor visualização das frequências de incidência de cada soma.

5.6- Total dos pares de valores obtidos pelos alunos no lançamento dos dois dados

Na tabela 6 consta todos os 216 pares de valores obtidos durante o lançamento dos dois dados não viciados pelos seis grupos de alunos participantes da atividade experimental, e na sequência, o gráfico 2, indica o comportamento da curva da relação entre o número de incidência total e as somas possíveis.

Somas Possíveis	216 Resultados obtidos no lançamento de dois dados de todos os grupos	Número de incidência
2	(1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1)	5
3	(1,2); (2,1); (1,2); (1,2); (1,2); (3,2); (1,2); (2,1); (3,1);	9
4	(1,3); (3,1); (1,3); (3,1); (2,2); (2,2); (1,3); (2,2); (3,1); (1,3); (2,2); (3,1); (1,3); (2,2); (1,3); (3,1); (3,1)	17
5	(2,3); (1,4); (3,2); (2,3); (4,1); (1,4); (3,2); (2,3); (1,4); (4,1); (3,2); (4,1); (2,3); (3,2); (2,3); (1,4); (1,4); (3,2); (2,3); (3,2); (4,1); (1,4); (2,3); (3,2); (1,4); (1,4)	26
6	(1,5); (5,1); (1,5); (2,4); (1,5); (5,1); (5,1); (1,5); (3,3); (1,5); (3,3); (5,1); (1,5); (4,2); (3,3); (2,4); (1,6); (3,3); (1,5); (3,3); (4,2); (1,5); (3,3); (5,1); (4,2); (5,1); (5,1)	27
7	(1,6); (5,2); (2,5); (3,4); (3,4); (5,2); (6,1); (6,1); (2,5); (1,6); (2,5); (3,4); (2,5); (6,1); (4,3); (2,5); (6,1); (5,2); (3,4); (3,4); (6,1); (6,1); (3,4); (3,4); (4,3); (5,2); (6,1); (1,6); (5,2); (1,6); (4,3); (3,4); (5,2); (1,6); (5,2); (1,6); (2,5); (3,4); (5,2); (1,6); (5,2); (3,4); (5,2); (1,6); (4,3); (3,4); (5,2); (1,6); (1,6)	49
8	(3,5); (2,6); (5,3); (2,6); (5,3); (3,5); (6,2); (5,3); (5,3); (3,5); (6,2); (2,6); (3,5); (4,4); (5,3); (5,3); (5,3); (4,4); (2,6); (4,4); (6,2); (2,6); (6,2); (3,5); (4,4); (3,5); (6,2); (2,6); (4,4); (2,6); (4,4); (5,3); (6,2); (4,4); (2,6)	35
9	(4,5); (4,5); (6,3); (4,5); (3,6); (3,6); (5,4); (6,3); (4,5); (6,3); (5,4); (6,3); (4,5); (4,5); (5,4); (4,5)	16
10	(5,5); (5,5); (6,4); (5,5); (4,6); (5,5); (5,5); (4,6); (4,6); (4,6); (6,4); (4,6); (6,4); (5,5); (6,4); (4,6)	16
11	(6,5); (5,6); (6,5); (6,5); (5,6); (5,6); (5,6); (6,5)	8
12	(6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6)	8

Tabela 6: Classificação dos 216 resultados obtidos no lançamento dos dois dados dos 6 grupos participantes da pesquisa. Fonte: Autor.

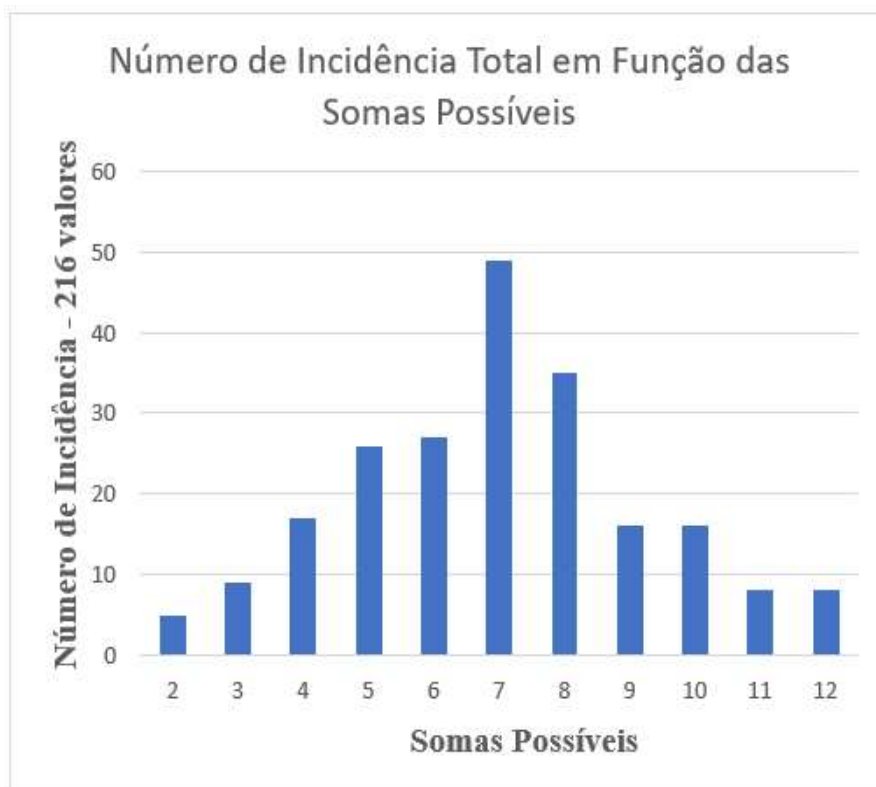


Gráfico 2: Número de incidência referentes aos 216 pares de valores obtidos em função das somas possíveis para o lançamento de dois dados não viciados. Fonte: Autor.

Durante a aplicação do produto os alunos observaram apenas por meio da tabela 2 da figura 28 e apêndice D, o comportamento das somas possíveis à medidas em que os dois dados não viciados eram lançados, na oportunidade em verificaram que a soma 7 se tornou o evento mais provável, entretanto, sugerimos que os colegas professores que utilizarem esta ferramenta pedagógica em suas aulas, quando convenientes, façam também um gráfico envolvendo todos os pares de valores obtidos pelos alunos indicando a curva da relação entre o número de incidência total e as somas possíveis, para apresentar para eles de forma mais real que quanto maior o número de lançamento, mais a curva se ajusta formando um pico central para soma 7, conforme previsão teórica, além de eliminar possíveis incoerências de resultados como os obtidos pelos grupos C e D, e relatados na seção 5.3 deste trabalho.

CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensino da física térmica sempre foi um desafio para os professores da educação básica, e essa dificuldade já é percebida logo no início da abordagem conceitual quando estes profissionais tentam diferenciar temperatura e calor, grandezas físicas as quais são fundamentais para o entendimento de outros conceitos, em especial, o da entropia. Nesse cenário a situação se torna ainda mais crítica por causa da falta de materiais que se preocupem com uma metodologia de ensino para esses conceitos de forma eficiente e, portanto, menos embaraçosa.

Durante a pesquisa bibliográfica percebemos que os trabalhos que tratam do conceito de entropia e, principalmente, os dirigidos para o nível de ensino que trabalhamos são raros. Sem contar que nos poucos que existem, esta grandeza não possui uma definição apropriada que faça uma transposição didática respeitando a natureza deste conceito como medida da degradação da energia útil. Em alguns casos a impressão que fica é que cada autor o define ao seu modo. Contribuindo dessa forma com o surgimento de concepções distorcidas.

Espera-se que esse trabalho possa contribuir de forma significativa com o processo de ensino e aprendizagem da termodinâmica, contudo, de forma mais específica, com o ensino da entropia de Boltzmann.

O presente trabalho foi desenvolvido norteado pela aprendizagem significativa de Ausubel e o pelo modelo de Gowin. Dessa forma, com o questionário pré-teste, foi feito um diagnóstico dos subsunçores existentes na estrutura cognitiva dos alunos, os quais representam os conhecimentos prévios que esses alunos construíram na etapa em que Ausubel denomina de formação de conceitos, ou seja, durante sua vivência fora da escola. E inspirado no modelo de Gowin, um material potencialmente significativo, nosso Produto Educacional foi construído com o intuito de possibilitar uma relação tríade de trocas de conhecimentos (compartilhar significados) entre este material, o professor e o aluno.

Com esse material, o professor foi capaz de colocar em prática o que Ausubel chama de criação de organizadores prévios, que consiste em melhorar os conhecimentos pré-existentes na estrutura cognitiva do aprendiz ao mesmo tempo em que cria novos conhecimentos prévios e, a partir disso ensiná-lo significativamente introduzindo outros conceitos numa relação não-arbitrária entre o conhecimento a ser aprendido e o conhecimento prévio (subsunçor) presente na estrutura cognitiva desses estudantes.

Tanto Ausubel quanto Gowin sugerem que uma das condições para que a aprendizagem significativa aconteça, é que o aprendiz manifeste interesse em querer

aprender. Foi exatamente com esse intuito que esta estratégia didática foi aplicada na Trilha Ciência da Natureza de turmas do 2º Ano, uma inovação metodológica implantada pelo Novo Ensino Médio, o qual entrou em vigor em todo o Brasil a partir do início deste ano.

Como foi apresentado no capítulo da análise dos resultados deste trabalho, 74% dos 23 alunos submetidos a nossa intervenção didática conseguiram obter êxito em pelo menos 11 das 13 questões avaliadas, o que nos convence de que trabalhar a história da termodinâmica em conjunto com a atividade experimental e a exposição de conteúdo torna-se uma estratégia didática bastante eficiente.

Apesar disso, acreditamos que os resultados poderiam ter sido melhores se não fosse o curto intervalo de tempo em que se deu a aplicação deste projeto. Apenas 16 horas aulas distribuídas em um período de duas semanas, isso porque a escola estava em processo de adaptação ao Novo Ensino Médio. Além disso, como os alunos estavam retornando ao ensino presencial depois de ficarem por quase dois anos tendo aulas de forma remota, por causa da pandemia Covid – 19, algumas aulas foram reservadas para a reposição de conteúdos, deixando o calendário letivo bastante restrito, obrigando o autor a negociar aulas com professores de outras disciplinas, deixando essas 16 aulas concentradas em um curto intervalo de tempo, mesmo assim, os alunos que em alguns momentos reclamavam do cansaço, demonstraram bastante interesse e empolgação com o curso, conforme já relatado nesta dissertação.

Aos professores que forem adotar nosso Produto Educacional em suas aulas, além de observarem as considerações feitas no parágrafo anterior, reforçamos a sugestão dada no capítulo da análise dos resultados, em que consideramos interessante apresentar aos alunos uma tabela e um gráfico com todos os pares de valores obtidos com o lançamento dos dois dados não viciados, porque dessa forma, acreditamos que ficará mais evidente para eles que quanto maior o número de lançamento mais preciso ficará o resultado soma 7, onde a curva se ajusta formando um pico central de acordo com o que estabelece a previsão teórica discutida durante a exposição de conteúdo, facilitando assim, a transposição didática para melhor entendimento da entropia estatística, tendo em vista que sana problemas de incoerências de resultados como os obtidos pelos grupos C e D, e relatados na seção 5.3 deste trabalho.

Do exposto, nota-se que este trabalho apesar dos desafios enfrentados durante sua intervenção em sala de aula, nos mostrou mais uma vez que a história da ciência e a atividade experimental são excelentes recursos didáticos para o ensino da física. Assim, esperamos que esta pesquisa possa contribuir de forma considerável com o processo de

ensino e aprendizagem dos conceitos desta nobre ciência, e também possa inspirar outros pesquisadores a criarem projetos pedagógicos com a mesma finalidade, porque somente desse modo num futuro próximo, a escassez de matérias eficientes para o ensino da termodinâmica e, principalmente, do conceito da entropia, seja reduzida ou até mesmo eliminada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSUBEL, D.P.; Novak, J.D. and Hanesian, H. (1978). Educational psychology: a cognitive view. 2nd. ed. New York, Holt Rinehart and Winston.
- BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio – Ciências da Natureza. Brasília: Ministério da Educação, 2000.
- BRASIL. Ministério de Educação. **A Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018. Disponível http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf Acesso em 06/09/2021
- CASTRO, R.S. **História e Epistemologia da Ciência: Investigando suas Contribuições num Curso de Física do Segundo Grau**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- COVOLAN, S.C.T. **O conceito de entropia num curso destinado ao Ensino Médio a partir das concepções prévias dos estudantes e da História da Ciência**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.
- CRUZ, T.P. **Experimentos de Física com Materiais de Baixo Custo e a Melhoria na Aprendizagem dos Alunos**. Monografia - Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, 2014.
- ELENO, L. **Entropia social: uma termovisão de mundo**. Disponível em: <<file:///C:/entropia-social-uma-termovisao-de-mundo.html>> Acessado em: 07 Dez. 2012.
- GALIAZZI, M. C. & GONÇALVES, F. P. **Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências**. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, páginas. 249-263, 2001.
- GASPAR, A. **Atividade experimentais no Ensino de Física. Uma nova visão baseada na teora de Vygotsky**. São Paulo: LF Editorial, 1997.
- GILBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.
- GIORDAN, M. (1999). **O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências**. *Química Nova na Escola* (10): 43-49.
- GOWIN, D. B. *Educating*. Ithaca, NY.: Cornell University Press, 1981. 210 p.
- GREGIO, N.O. **Termodinâmica, um Tutorial para Entendimento do Conceito de Entropia**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de

Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal São Carlos, São Carlos, 2016.

HODSON, D. **Teaching and learning science: Towards a personalized approach.** **Buckingham:** Open University Press, 1998.

KERR, J. **Practical work in school science.** Leicester: Leicester University Press, 1963.

LAMBERT, FRANK. Disorder – Cracked crutch for Supporting Entropy Discussions. **Journal of Chemical Education.** Vol. 49, n°. 2, Feb, 2002. P. 187 – 192.

MAGOSSI, J. C.; PAVIOTTI, J. R. **Incerteza em Entropia.** Revista Brasileira de História da Ciência, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 84-96, jan | jun 2019.

MATSUKUMA, M. **Produção e Avaliação de Interfaces, Segundo Princípios da Interação Humano-Computador.** Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MATTEWS, M.R. **História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação.** Cad. Cat. Ens. Fís., v. 12, n. 3: p. 164-214, dez. 1995.

MEDEIROS, R.L. **A Hidrostática Ensinada Através de Experimentações em Sala de Aula.** Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Catalão - GO, 2020.

MOREIRA, H., CALEFFE, L. G.. **Metodologia da pesquisa para o professor pesquisador.** DP&A Editora, 2006.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. **Teorias construtivistas.** Porto Alegre: UFRGS, 1999. (Textos de apoio ao professor de Física).

MOREIRA, M. A. **Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa.** São Paulo: Centauro, 2010.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel.** São Paulo: Moraes, 1982.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel.** 2. ed. São Paulo: Centauro, 2006.

MOREIRA, M.A. **O que é afinal aprendizagem significativa?** Porto Alegre: Técnicos e Pedagógicos a Serem Considerados num Sistema de Educação. UFRGS, 2012. 27 p.

MOREIRA, M.A. **Teorias de aprendizagem.** São Pulo: E.P.U., 2017.

MOREIRA, M.A. **Teorias de aprendizagem.** São Pulo: E.P.U., 1999.

MOURA, M. **Entropia Estatística e o Ensino da Segunda Lei da Termodinâmica**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2016.

NUSSENVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Vol 2, 4^o ed. Editora Edgar Blucher, 2002.

OLIVEIRA, P.M.C.; DECHOUM, K. **Facilitando a compreensão da Segunda lei da Termodinâmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol 25, n^o 4, Dezembro, 2003.

OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio José de Holanda. **Teorias de Aprendizagem**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física, 2010. 40 p.

PAGLIARINI, C.R. **Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio**. (Mestrado em Educação em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PEDUZZI, L.O.Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: PIETROCOLA, M. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora**. Florianópolis: Editora da UFSC: 2005.

PEREIRA JR., A. **Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição Boltzmaniana**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1997.

PINEDA, J. O. C. A entropia segundo Claude Shannon: o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica, São Paulo, 2006.

PIRES, Antônio S. T. **Evolução das Ideias da Física**. 2^a Ed., Editora Livraria da Física, 2011 – São Paulo.

QUADROS, S. **A termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**. 1^a ed. São Paulo: Scipione, 1996.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física**. 10^a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2016.

SANTOS, O.P. **O Ensino do Conceito de Entropia no Ensino Médio Utilizando como Recurso de Didático a História da Ciência**. Monografia - Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SANTOS, Z. T. S. **Uma perspectiva histórica e epistemológica para o ensino de entropia no ensino médio**. Ln: XI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 2008, Curitiba.

SILVA, C.C.; MARTINS, R.A. **A Teoria das cores de Newton: um exemplo do uso da História da Ciência em sala de aula**. *Ciência & Educação*, v.9, n.1, p.53-65, 2003.

SILVA, L. F. **Uma Proposta Metodológica para Inserção de Elementos de Estatística como Organizadores Prévios em Conceitos Básicos de Termodinâmica**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Polo Catalão, GO, 2020.

SPROVIERO. Entropia: "Progresso" para a Destruição! Entrevista com o Dr. Mario Bruno Sproviero. <http://hottopos.com/vdletras2/mario.htm>.

STYER, DANIEL F. Insight into Entropy. *American Journal of Physics*, ano 68, vol. 12, 2000. P. 1090 – 1096.

TIPLER, PAUL A. **Física 1**. Rio de Janeiro. LTC. 1976.

UFSCar. **Datas e Personagens na História da Termodinâmica – Prof. Dr. José Pedro Danoso**. Disponível em: https://www.ifsc.usp.br/~donoso/termodinamica/Historia_Termodinamica.pdf . Acesso em 05/09/2021

VEIGA, P.M. **Uso de Aplicativo em Smartphone e Tablet: uma proposta de aprendizagem significativa no Ensino de Física**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

YOUNG, H.D; FREEDMAN. R.A. **Física II: Termodinâmica e ondas**. 12^a ed. São Paulo: Addison Wesley, 2003.

QUESTIONÁRIO PRÉ - TESTE

ESTE QUESTIONÁRIO TEM COMO OBJETIVO ENTENDER COMO VOCÊ PENSA CERTAS IDEIAS A RESPEITO DA FÍSICA TÉRMICA. ELE NÃO SERÁ USADO PARA AVALIAÇÃO. PROCURE RESPONDÊ-LO COM SUAS PALAVRAS. VOCÊ ESTARÁ NOS AJUDANDO A MELHORAR O ENSINO. MUITO OBRIGADO!

Turma: _____ **Data:** _____

1. O que você entende por temperatura? Dê exemplos.

2. Defina com suas próprias palavras o conceito de calor. Dê exemplos.-

- **Responda as questões 3, 4 e 5 escolhendo apenas uma das alternativas.**

3. Associamos a existência de calor:

- a) A qualquer corpo, pois todo corpo possui calor.
- b) Apenas àqueles corpos que se encontram “quentes”.
- c) As situações nas quais há, necessariamente, transferência de calor.

4. Se fornecermos calor a um recipiente contendo um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido, pode-se dizer que:

- a) A temperatura do conjunto gelo e líquido aumenta.
- b) A temperatura do conjunto gelo e líquido permanece constante a 0°C até que todo o gelo seja derretido.
- c) A temperatura do sistema diminui.

5. Quando dois corpos de tamanhos diferentes estão em contato e com a mesma temperatura, ambos isolados do meio ambiente, pode-se dizer que:

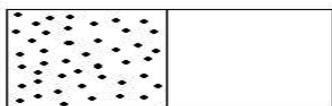
- a) O corpo maior é o mais quente.
- b) O corpo maior cede calor para o corpo menor.
- c) Não há troca de calor entre os corpos.

6. Duas barras de ferro: uma a 20°C e outra 70°C . Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.

7. Temos duas canecas de alumínio ligadas e isoladas do meio ambiente, uma com 1 litro de água a uma temperatura de 80°C e outra, também com 1 litro de água a uma temperatura de 20°C . Encostando uma na outra, verifica-se que após certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 50°C . Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 50°C , voltem às temperaturas que anteriormente eram de 80°C e 20°C ? Justifique.



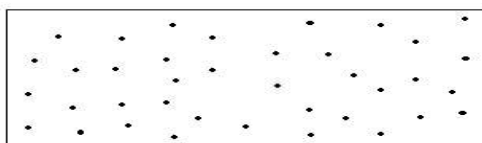
8. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de
removida a separação.

Após um minuto.

9. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



10. Considere as seguintes situações:

- a) Sorvete derretendo;
- b) A coca-cola que fica choca;
- c) Uma vela que derrete;

d) Um homem envelhecendo;

e) Uma planta crescendo;

f) Café esfriando na xícara.

A – Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis? _____

B – Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

C – Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?

11. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.

12. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dínamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.

13. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

a) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?

b) Podemos dizer neste caso que a entropia do *sistema quarto* aumentou? Explique.

-
- c) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decurso de uma semana inteira? Justifique sua resposta.
-

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

h) Qual somatória de faces ocorreu mais vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão nº**

i) Qual somatória de faces ocorreu menos vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão nº**

5- De posse da tabela de valores obtidos com os lançamentos dos 2 dados, indique:

c) As multiplicidades (o número de microestados para cada macroestado) e as respectivas entropias em unidade de 10^{-23} J/K.

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

- d) O que se pode concluir dos resultados obtidos acima? Para isso, reveja os resultados obtidos na **letra b** da questão n°

-
- j) Organize esses resultados em uma segunda tabela fornecida posteriormente pelo professor, a qual organiza os resultados, em função da **multiplicidade**, **macroestado**, **microestado** e **entropia**.

- 6- Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?

Apêndice C: Tabela 01

TABELA 01:

Experimento: Lançamento de dados **Grupo:** _____

Nº de integrantes: _____

36 Lançamentos de 2 dados simultâneos			
Nº de Lançamentos	Dado 01	Dado 02	Soma das Faces
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			

Apêndice D: Tabela 02

TABELA 02:

Experimento: Lançamento de dados

Grupo: _____

Nº de integrantes: _____

Somas Possíveis Para 02 Dados (MACROESTADO)	Pares Obtidos nos Lançamentos (MICROESTADO)	Nº de Soma Possíveis Para 02 Dados (MULTIPLICIDADE)	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica / Máxima	Entropia/k (S/k = ln W) Boltzmann	Entropia em Função da Probabilidade (S = -p log p) Shannon
2				$1/36 = 2,7\%$		
3				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
4				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
5				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
6				$5/36 = 13,8\%$		
7				$6/36 = 1/6 = 16,6\%$		
8				$5/36 = 13,8\%$		
9				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
10				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
11				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
12				$1/36 = 2,7\%$		
Total de Lançamentos (Espaço amostral – Tabela 1)				36		

QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE

CARO ALUNO, AGORA QUE CHEGAMOS AO FINAL DESTA OFICINA, SOLICITO QUE VOCÊ RESPONDA AS QUESTÕES ABAIXO PARA VERIFICARMOS A CONTRIBUIÇÃO DA ESTRATÉGIA DIDÁTICA UTILIZADA PARA O ENSINO DA FÍSICA.

Turma: _____ **Data:** _____

1. É comum no dia a dia as pessoas tratarem os conceitos de calor e de temperatura como sendo iguais. Você concorda com isso? Justifique sua resposta, dizendo o porquê de tal afirmação.

- **Responda as questões 3, 4 e 5 escolhendo apenas uma das alternativas.**

2. Não é difícil em dias de alta temperatura, presenciarmos alguém fazendo a seguinte afirmação: “estou com calor” ou “eu tenho calor”. Conceitualmente falando em função de seus conhecimentos de física térmica, você concorda com tal afirmação? Justifique sua resposta a partir da definição de calor.

3. O que acontece com a temperatura de um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido (em fusão) quando fornecermos calor a ele.

4. Julgue a veracidade das seguinte proposição marcando V para verdade e F para falsa, a partir da análise da seguinte afirmação: *se dois corpos de tamanhos diferentes estiverem em contato e com a mesma temperatura, e ambos isolados do meio ambiente*, pode-se dizer que:

- () O corpo maior é o mais quente.
- () O corpo maior cede calor para o corpo menor.
- () Não há troca de calor entre os corpos.

5. Tem-se duas barras de alumínio: uma a 40°C e outra 60°C. Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.

6. Temos duas canecas de alumínio ligadas e isoladas do meio ambiente, uma com 2 litro de água a uma temperatura de 60°C e outra, também com 2 litro de água a uma temperatura de 30°C . Encostando uma na outra, verifica-se que após certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 45°C . Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 45°C , voltem às temperaturas que anteriormente eram de 60°C e 30°C ? Justifique.



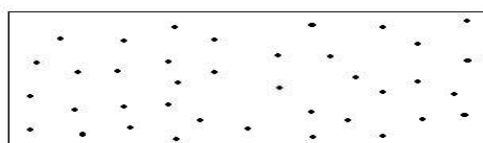
7. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de
removida a separação.

Após um minuto.

8. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



9. Considere as seguintes situações:
- a) Gelo derretendo;
 - b) A refrigerante que fica choca;
 - c) Uma vela que derrete;
 - d) Um homem envelhecendo;
 - e) Uma planta crescendo;
 - f) Leite esfriando na xícara.

A – Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis?

B – Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

C – Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?

10. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.

11. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dínamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.

12. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

a) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?

b) Podemos dizer neste caso que a entropia do *sistema quarto* aumentou? Explique.

c) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decurso de uma semana inteira? Justifique sua resposta.

13. (UCS-2011) Um recente filme que no Brasil recebeu o nome de “O Curioso Caso de Benjamin Button”, protagonizado pelo ator Brad Pitt, conta a história curiosa de um personagem que nasce velho e, à medida que o tempo passa, vai reju-

venescendo. Se pensarmos no envelhecimento humano como um processo energeticamente irreversível, qual título alternativo do filme ficaria coerente com as leis da Física?

- a) A Curiosa Obediência à Equação de Clapeyron
- b) O Extraordinário Caso da Violação da Segunda Lei de Newton
- c) O Estranho Caso de Violação da Segunda Lei da Termodinâmica
- d) O Incomum Caso de Confirmação da Primeira Lei da Termodinâmica
- e) O Intrigante Caso de Violação da Terceira Lei de Newton

Apêndice F: Produto Educacional



Universidade Federal de Goiás (UFG) / Universidade Federal de Catalão (UFCAT)

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física em Rede

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

PRODUTO EDUCACIONAL

UMA METODOLOGIA DE ENSINO PARA ENTROPIA DE BOLTZMANN SUBSIDIADA PELA TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Ocione Pereira dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Júlio Santiago Espinoza Ortiz

Catalão, GO – agosto de 2022

Apresentação

Caro (a) professor (a),

Este material inspirado na pesquisa desenvolvida na dissertação de mestrado profissional em ensino de física de nossa autoria, foi elaborado sob a perspectiva da teoria da aprendizagem significativa, principalmente, em sintonia com o modelo de Gowin, o qual sugere que no processo de ensino aprendizagem deve existir uma relação triádica envolvendo educador, material educativo e aluno.

Dessa forma, este Produto Educacional, foi elaborado com o intuito de fornecer a todos os colegas professores um material que fornece uma estratégia didática bastante robusta para o ensino dos principais conceitos da termodinâmica, em especial, do conceito de entropia estatística.

Neste texto didático, os professores terão acesso a uma metodologia de ensino e aprendizagem para inserção do conceito de entropia estatística que envolve a história da termodinâmica e a atividade experimental. Para isto foi montado um fluxograma que traz todas as etapas desta estratégia de ensino.

Além disso, neste Produto Educacional os colegas encontrarão, ainda que de forma breve, os fundamentos da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e o modelo de Gowin, os principais acontecimentos da história da termodinâmica, uma abordagem conceitual envolvendo a segunda lei da termodinâmica e a entropia estatística de Boltzmann e a metodologia de aplicação da atividade experimental de lançamentos de dados não viciados.

O professor terá acesso também a uma interessante referência bibliográfica relacionada com o tema em questão.

Espera-se que este Produto Educacional possa cumprir seu papel primordial que é auxiliar, vocês professores do ensino médio, no preparo de suas aulas com profundidade, tendo em vista que na literatura, existe uma carência muito grande de matérias pedagógicas voltado para o ensino do tópico de entropia. Sendo assim, sugerimos que os colegas façam bom uso deste trabalho, inclusive fazendo as alterações que julgarem necessárias, conforme suas realidades profissionais.

SUMÁRIO

Introdução.....	4
Capítulo 1: Entropia: Fundamentação teórica.....	6
Capítulo 2: Fundamentação teórica.....	8
2.1 Teoria da Aprendizagem Significativa.....	8
2.2 Modelo de Gowin e seu processo de ensino e aprendizagem.....	11
Capítulo 3: Sequência didática para inserção do conceito de entropia.....	13
3.1 Abordagem histórica.....	13
3.2 Abordagem conceitual – Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica.....	18
3.2.5 Abordagem estatística do conceito de entropia.....	26
3.2.6 Entropia na Teoria da Informação.....	34
3.2.7 Entropia nos fenômenos sociais.....	36
3.2.8 Princípio da degradação da energia: Uma consequência da entropia.....	37
3.2.9 Seta do tempo.....	39
3.3 Abordagem experimental.....	40
Capítulo 4: Metodologia – Aplicação do Produto.....	41
4.1 Objetivos das questões dos questionários pré e pós testes	44
4.2 Sequência didática representada por meio de um fluxograma	48
4.3 Observações a respeito da experiência em sala de aula.....	48
4.4 Total dos pares de valores obtidos pelos alunos no lançamento dos dois Dados.....	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
Apêndice A: Questionário pré – teste.....	59
Apêndice B: Questões pré e pós – lançamentos dos dados.....	63
Apêndice C: Tabela 01.....	66
Apêndice D: Tabela 02.....	67
Apêndice E: Questionário pós-teste.....	68

Introdução

Com o objetivo de elaborar um material para contribuir com o ensino de física na educação básica, neste trabalho propomos um Produto Educacional que traz uma sequência didática que envolve, além da História da Termodinâmica, uma Atividade Experimental para inserção do conceito de entropia estatística no Ensino Médio. O foco aqui foi fazer, de forma simples, por meio de uso de noções básicas de métodos estatísticos, a introdução do conceito de entropia de Boltzmann no Ensino Médio, que muitas vezes, quando não é deixado de ser abordado por completo nos livros didáticos desta etapa da educação básica brasileira, é tratado de forma muito superficial, dificultando, assim, a assimilação pelos alunos desse conhecimento específico tão primordial para compreensão do mundo a sua volta, principalmente, nos dias atuais onde tanto se fala em crises ambientais reveladas por meios de suas faces mais sensíveis ao ser humano, que são as crises hídrica e energética.

Entretanto, conforme a Teoria da Aprendizagem Significativa, é necessário que os alunos tenham conhecimentos prévios para que eles possam aprender significativamente, motivo pelo qual pensando em melhorar a qualidade desses conhecimentos que esses alunos provavelmente tenham adquiridos durante, principalmente, o período de formação de conceitos como veremos no capítulo que trata desta teoria de aprendizagem, propomos a inserção dos organizadores prévios, por meio do ensino dos conceitos iniciais da termodinâmica em paralelo com a apresentação da História da Termodinâmica, passando pela entropia de Clausius, para somente depois ensinar a esses estudantes a entropia de Boltzmann.

É nesse contexto que definimos a problematização deste projeto que busca responder os seguintes questionamentos: Qual seria a contribuição da História da Ciência e da Atividade Experimental no processo de ensino aprendizagem do conceito de entropia estatístico no ensino médio? E como planejar uma estratégia didática de apresentação de conteúdos de tal forma a fazer com que os estudantes compreendam de maneira satisfatória o conceito de entropia estatístico?

Questionamentos esses que nos remetem ao objetivo geral que é usar a História da Ciência e a Atividade Experimental subsidiadas pela aprendizagem significativa de Ausubel e pelo modelo de Gowin como recursos didáticos facilitadores e complementares no ensino do conceito de entropia estatístico, e aos objetivos específicos que são: Facilitar o entendimento do conceito de entropia estatístico, tentar desfazer concepções distorcidas do conceito de entropia e apresentar um Texto Didático como Produto Educacional

usando como estratégias didáticas a História da Ciência e a Atividade Experimental respectivamente para o ensino da entropia estatística.

Com esse objetivo, este trabalho traz no capítulo 1 a fundamentação teórica da entropia. No capítulo 2 discorremos sobre a fundamentação teórica em relação a aprendizagem significativa de Ausubel e do modelo de Gowin. No capítulo 3 é apresentada a sequência didática, bem como no capítulo 4, a metodologia é relatada. E por fim teremos as considerações finais.

Capítulo 1: Entropia: Fundamentação teórica

O ensino do conceito de entropia tanto no ensino médio quanto no ensino superior sempre foi considerado problemático por vários professores e diversos autores. Há variadas discussões em torno das dificuldades do ensino da termodinâmica de uma maneira geral, e da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia de forma específica (SANTOS, 2008).

De todos os conceitos difíceis da Física Clássica – a aceleração, energia, campo elétrico – o mais difícil é entropia. Até mesmo Von Neuman afirmou que “ninguém realmente sabe o que é entropia”. (STYLER, 2000).

A entropia é o assunto mais temido na química universitária básica – por estudantes devido a sua complexidade, e por professores porque os estudantes falham em entender seus princípios básicos (LAMBERT, 2006).

Observamos, ainda, em vários trabalhos como Nussenzveig (2002), Lambert (2006) e em Oliveira & Dechhoum (2003) que existem, também, dificuldades no entendimento e na formulação deste conceito.

A conexão entre a 2ª lei e a irreversibilidade é um dos problemas mais profundos da Física. (NUSENVEIG, 2002).

A segunda lei da termodinâmica é uma das construções intelectuais mais intrigantes de todos os tempos. Desde sua primeira formulação no século XIX, tem sido fonte de discussões acaloradas entre cientistas das mais variadas origens, nos mais variados ramos da ciência. Apesar de seu foco ser os sistemas microscópicos, algumas vezes têm sido abusivamente aplicada até mesmo a fenômenos sociais, gerando interpretações que poderíamos classificar, no mínimo, como perigosas. (OLIVEIRA e DECHHOUM, 2003).

Entropia não é desordem nem tem nada a ver com coisas misturadas, como cadeiras desarrumadas e cartas embaralhadas. (LAMBERT, 2006).

Nestes trabalhos observamos vários aspectos que dificultam o ensino do conceito de entropia e da segunda lei da termodinâmica. A conexão entre a segunda lei e a irreversibilidade dos processos naturais, o problema da relação entre entropia e os sistemas microscópicos e a desordem que é muito mencionada pelos professores em sala de aula e também muito comum, em textos de divulgação científica, a conexão da entropia e aos fenômenos sociais. Nesta coleção de desafios didáticos e interpretações polêmicas do conceito de entropia, percebemos uma carência muito grande em se definir uma estratégia didática apropriada para lidar com este tema. É necessário definir claramente a melhor forma estratégica de se introduzir a segunda lei e o conceito de entropia.

Observando se utilizaremos o modelo termodinâmico ou o cinético molecular como ponto de partida, se a abordagem contextualizadora é a mais apropriada, ou mesmo, se devemos simplesmente definir estes conceitos e deixar que determinados problemas, inerentes a estes, sejam respondidos posteriormente em um curso mais avançado.

Diante dessas dificuldades este trabalho propõe um tratamento didático com o objetivo de facilitar o ensino do conceito de entropia. Nesta abordagem fizemos uso da História da Ciência, de Atividade Experimental e de uma Abordagem Conceitual mais abrangente e imparcial dos principais tópicos da termodinâmica como sequência didática, para inserção do conceito de entropia no ensino médio, na sua vertente estatística.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica

2.1 Teoria da Aprendizagem Significativa

Atualmente a Educação Básica brasileira está passando por uma profunda reformulação. Isso se deve, principalmente, ao fato de que não é mais possível manter um processo de ensino e aprendizagem tradicional baseado em práticas pedagógicas mecânicas, onde o aluno é orientado a repetir determinado conhecimento até que o memorize, sem fazer qualquer questionamento ou relação com os conhecimentos de outras áreas do saber ou até mesmo com conhecimentos práticos que estão presentes em seu cotidiano.

Com o intuito de romper com esse método de ensino arcaico, em 14 de dezembro de 2018, o então Ministro da Educação, Rossetti Soares, homologou o documento da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a etapa do Ensino Médio. Documento este que tem o intuito de fazer uma transformação considerável nos métodos de ensino existente atualmente.

Dentre outras coisas a BNCC pretende implantar uma metodologia de ensino no qual o aluno se torne o ator principal do processo de ensino e aprendizagem. Onde o aluno deixe de ocupar uma posição passiva para passar a ocupar uma posição relevante, no sentido de ele próprio buscar com maior independência o conhecimento proposto pelo professor, valorizando sempre seu conhecimento prévio adquirido até inclusive aquele que foi adquirido mesmo antes do acesso à escola. Conhecimento prévio este que possui forte vínculo com a estrutura cognitiva do aluno, conforme sugere a Teoria de Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel.

Diante disso, este trabalho está fundamentado sobre as bases da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Paul Ausubel e também pelo modelo de Dixie Bob Gowin, também norteado pelos estudos realizados sobre o assunto, do eminente pesquisador e professor Marco Antônio Moreira, um dos maiores pesquisadores do Brasil sobre temas relacionados ao ensino de Física focado na Teoria da Aprendizagem Significativa.

2.1.1 Tipos Gerais de Aprendizagem

Conforme Moreira (1999) existem três tipos gerais de aprendizagem: a aprendizagem cognitiva que acontece quando o conhecimento é fixado na mente do aprendiz resultando no que ele chama de armazenamento organizado ou, de modo mais formal, na estrutura cognitiva do ser que aprende. A aprendizagem afetiva que está relacionada com as sensações internas do indivíduo como dor, alegria, ansiedade, etc. Por

fim a aprendizagem psicomotora que ocorre por meio de respostas musculares obtidas com treino e prática.

Desse modo percebe-se que a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel é predominantemente voltada para a aprendizagem cognitiva, fazendo dele um representante da Teoria Cognitivista, amplamente formulada e desenvolvida pelos teóricos da educação como Piaget, Wallon e Vigotsky.

2.1.2 Aprendizagem Cognitiva

Ausubel não desconsiderava os outros tipos de aprendizagem, entretanto, ele acreditava que a aprendizagem se consumava quando o conteúdo era organizado e integrado na estrutura cognitiva do ser que aprende. Mas como essa aprendizagem era construída? O próprio autor assegurava que ela acontecia pela interação entre os conhecimentos prévios e os conhecimentos novos, entretanto, essa interação é não literal e não-arbitrária, reforçando assim, a necessidade de termos que criar alguma ferramenta pedagógica, no caso em questão, um produto, que tenha como função possibilitar essa interação não mecânica entre o conhecimento prévio e o conhecimento novo a ser ensinado ao aluno.

Nesse contexto, surge o conceito de subsunçor, que é o conhecimento específico que o aprendiz possui, como afirma Ausubel (1978):

A essência do processo de aprendizagem significativa é que ideias simbolicamente expressas sejam relacionadas, de maneira substantiva (não literal) e não arbitrária, ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto de sua estrutura cognitiva especificamente relevante (isto é, um subsunçor) que pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição já significativa. (AUSUBEL, 1978, p.41)

Em relação ao assunto Moreira (2010) reforça que:

[...] à medida que o conhecimento prévio serve de base para a atribuição de significados à nova informação, ele também se modifica, ou seja, os subsunçores vão adquirindo novos significados, se tornando mais diferenciados, mais estáveis. São formados novos subsunçores que interagem entre si. Neste sentido a estrutura cognitiva está constantemente se reestruturando durante a aprendizagem significativa. O processo é dinâmico; o conhecimento vai sendo construído. (MOREIRA, 2010, p. 18)

O conhecimento prévio conhecido também como subsunçor na teoria da aprendizagem significativa, deve estar disponível na estrutura cognitiva do indivíduo, para que seja usado como ponto de ancoragem para a formação de novos conhecimentos, isso é o que adverte Moreira (1999):

O fator isolado que mais influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno

já sabe (cabe o professor identificar isso e ensinar de acordo). Novas ideias e informações podem ser aprendidas e retidas, na medida em que conceitos relevantes e inclusivos estejam adequadamente claros e disponíveis na estrutura cognitiva do indivíduo e funcionem, dessa forma, como ponto de ancoragem às novas ideias e conceitos. (MOREIRA, 1999, p. 152)

Vale destacar que para essa teoria, quando mais o aprendiz sabe, mais ele aprende, entretanto, a aprendizagem acontece tanto no sentido de aquisição de novos conhecimentos, como também no sentido de aprimoramento daqueles conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva desse aprendiz e que servirão como pontos de ancoragem. Dessa forma, nesse processo acontecem duas aprendizagens simultâneas: aquisição de novos conhecimentos ao mesmo tempo em que ocorre o aprimoramento daqueles pré-existentes, usados como ponto de ancoragem, os subsunçores, os quais na maioria das vezes, tratam-se de conhecimentos limitados, informais e, portanto, carregados de significados deturpados. E como foi retromencionado, a qualidade desse processo de ensino e aprendizagem, passa pela maestria do professor no que diz respeito a identificação desse conhecimento prévio, para que em seguida, ele possa usá-lo da melhor forma possível como um suporte para inserção de novos conhecimentos, ao mesmo tempo em que desenvolve o seu aperfeiçoamento.

Usando como exemplo conceitos da Física Térmica, o professor auxiliado por meios de ferramentas como questionários pré-testes, identificará na estrutura cognitiva do aluno subsunçores como temperatura e calor, que na maioria das vezes aparecerão carregados de concepções distorcidas, uma vez que eles foram construídos a partir das nossas sensações de quente e frio, entretanto, esses conhecimentos servirão como ponto de ancoragem para o ensino, por exemplo, dos conceitos de energia térmica e equilíbrio térmico ao mesmo tempo em que deve ocorrer uma formalização e, portanto, um aprimorando desses dois conceitos informais pré-existentes na estrutura cognitiva do aprendiz e, a partir daí, traçar um caminho mais significativo e robusto para este professor trabalhar com esses alunos outros tópicos como são a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, além claro, do conceito de entropia. Conceitos esses que estão associados a diversos outros subsunçores, que muitas vezes possuem significados opostos aos subsunçores pretendidos, mas de igual modo importantes como veremos abaixo em Moreira (2012):

O subsunçor Conservação da Energia, poderá servir de ideia âncora para um outro novo conceito: a Conservação da Quantidade de Movimento, uma outra lei geral da Física. Analogamente, a conservação de outras grandezas físicas como momento angular e a

carga elétrica adquirirão significados por interação com o subsunçor constituído pelas leis da conservação já significativas. Quer dizer, o subsunçor que inicialmente era apenas conservação da energia, agora é também conservação da quantidade de movimento, do momento angular, da carga elétrica, da corrente elétrica, e de outras grandezas físicas, permitindo inclusive dar significados à não-conservação de certas grandezas como é o caso da entropia. (MOREIRA, 2012, p. 3)

2.2 Modelo de Gowin e seu Processo de Ensino Aprendizagem

Dixie Bob Gowin (1925-2016) foi professor, teórico e filósofo da educação, e se notabilizou por ter criado um instrumento para analisar a estrutura do processo de produção do conhecimento denominado Vê epistemológico ou “Vê de Gowin”, do qual faz parte um outro projeto, conforme Moreira (1999), o Modelo de Gowin.

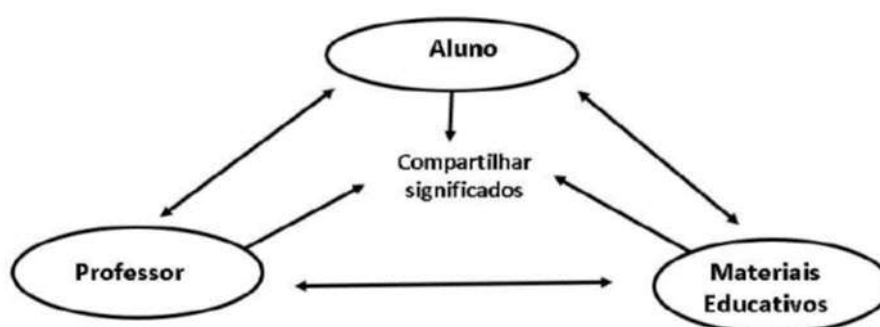


Figura 1: O modelo triádico de Gowin (MOREIRA, apud, MOREIRA, 1993)

A partir da análise da Teoria da Aprendizagem Significativa, em seu modelo, Gowin afirma que no processo de ensino aprendizagem deva existir uma relação triádica envolvendo: educador, material educativo e aluno. “Para ele, um episódio de ensino-aprendizagem se caracteriza por compartilhar significados entre alunos e professor, a respeito de conhecimentos veiculados por materiais educativos do currículo” (MOREIRA, 2017, p. 185). Contudo, conforme figura 1, é perfeitamente possível em certas situações dentro da relação triádica, ocorrerem relações diádicas formando os denominados pares de interação: professor – aluno, professor – materiais educativos, aluno – aluno e aluno – materiais educativos

Apesar disso, para esse modelo de ensino é preciso que haja troca de informações entre o professor e o aluno por intermédio de materiais educativos, numa relação triádica, de tal forma que o aluno consiga aprender e também a transmitir o conhecimento ensinado. E que este conhecimento só será considerado como adquirido pelo aluno, somente quando for atingido o nível que deve ser estipulado pelo professor. Nas palavras do autor, o ensino se consuma quando o significado do material que o aluno capta é o

mesmo significado que o professor pretende que esse material tenha para o aluno (Moreira, apud, Gowin, 1981, p.81).

Neste material a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e o Modelo de Gowin foram utilizados e pensados com o objetivo de fundamentar a criação do nosso Produto Pedagógico com o intuito de facilitar o ensino do conceito de entropia no ensino médio, por meio deste Texto Didático que tem como função, ensinar este conceito a partir dos conhecimentos prévios existentes e disponíveis na estrutura cognitiva do aluno. Para tanto, seguindo os fundamentos desta teoria, este material foi construído de tal forma que será possível identificar por meio de questionários pré-testes, os conceitos subsunçores ou os significados presentes na estrutura cognitiva dos alunos, e a partir daí, o professor por meio de diferentes atividades: da História da Ciência, de uma revisão de conteúdo, além de aprimorar esses conhecimentos, também criará organizadores prévios para suprirem aqueles conhecimentos não identificados na estrutura cognitiva desses estudantes, para em seguida fazer por meio de pontes ou pontos de ancoragem, uma relação substancial e não arbitrária, a inserção do conceito de entropia em sua abordagem estatística.

Espera-se que esse trabalho possa subsidiar significativamente o trabalho do professor do ensino médio durante o processo de ensino e aprendizagem não só no que tange ao conceito de entropia, mas também de qualquer outro conceito da Física, contribuindo dessa forma, com o rompimento da atual e centenária metodologia de ensino existente nas escolas brasileira, onde é enaltecido o ensino de conteúdo por meio da aprendizagem puramente mecânica, com práticas repetidas de memorização de conceitos, fórmulas, proposições, imagens, fatos, etc. Aprendizagem esta em que os conceitos ensinados possuem pouca relação com os conhecimentos que o aprendiz já possui em sua estrutura cognitiva, o que os tornam suscetíveis ao rápido esquecimento, e quando isso acontece, o nível de resgate, de recuperação, se torna bem difícil quando o estudante é instigado a lembrá-los.

Capítulo 3: Sequência Didática para Inserção do Conceito de Entropia

Caros professores, neste capítulo será exposta a sequência didática para introdução do conceito de entropia no Ensino Médio. Sequência essa que iniciará com a abordagem histórica da Termodinâmica, em seguida de forma mais conceitual, abrangente e com métodos matemático e estatístico, os principais tópicos desta ciência, em especial a entropia de Boltzmann, serão apresentados e, finalmente, faremos uma descrição de como a atividade experimental pode ser desenvolvida com os alunos do ensino médio. Sendo esta, uma abordagem prática e, portanto, menos abstrata que traz mais sentido para os estudantes logo que eles estudaram a parte histórica e conceitual.

Vale ressaltar que por meio do recurso didático História da Termodinâmica, o aluno terá a oportunidade de conhecer os obstáculos epistemológicos ocorridos no desenvolvimento dessa ciência, possibilitando assim, que esse estudante desfaça aquela tradicional concepção de que os conceitos científicos surgem de forma pronta, mecânica e automática, sem a existência de reflexões e conflitos ideológicos e culturais.

3.1 Abordagem Histórica

Utilizando como principais referenciais teóricos os autores Quadros (1996) e Pires (2011), além de feitas algumas adaptações do texto de Santos (2013), pertencente ao meu Trabalho de Conclusão de curso em Graduação em Física, foi montado aqui uma sequência histórica com os principais acontecimentos e descobertas da História da Termodinâmica até o surgimento da definição clássica do conceito de entropia.

- **Máquina de Heron**

Heron foi um inventor grego, que no século I d.C. construiu o primeiro dispositivo que funcionava através do vapor produzido pelo aquecimento da água. Esse vapor colocava em rotação uma esfera de metal que estava acoplada à máquina de Heron. Hoje, aos olhos da ciência moderna, esse dispositivo que é uma máquina térmica, ou seja, ela é um dispositivo com capacidade de transformar o calor, energia térmica, em trabalho mecânico. No entanto, essa máquina não foi usada para produzir energia mecânica em grandes escalas. Somente no século XVIII que foram construídas as primeiras máquinas térmicas capazes de produzir energia mecânica em escala industrial.

Figura 2 – Máquina de Heron (Eolípila)



Fonte: Wikipédia. Disponível em:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Eol%C3%ADpila#/media/Ficheiro: Aeolipile_illustration.png. Acesso em
05/09/2021

- **Bomba de Água de Savery**

Em 1698, mais de mil anos após a máquina de Heron, Thomas Savery inventou a primeira máquina a vapor de interesse industrial. A máquina de Savery era uma bomba d'água. Um enorme cilindro de metal era preenchido com vapor proveniente de um ebulidor. Uma válvula cortava o fornecimento do vapor, enquanto o cilindro era resfriado com uma corrente de água à temperatura ambiente. Este processo de resfriamento provocava a condensação do vapor do cilindro, formando vácuo em seu interior. A baixa pressão fazia com que a máquina retirasse a água de um poço de até dez metros de profundidade. Em seguida um novo ciclo era iniciado por outra descarga de vapor no cilindro, expulsando a água que restou.

- **Motor a Vapor de Newcomen**

A mineração de carvão era feita em minas bastante profundas, frequentemente inundadas, exigindo uma forma eficiente de bombeamento da água, eficiência essa que a máquina de Savery não possuía. Essa exigência só foi atendida em 1712, quando o inglês Thomas Newcomen inventou uma bomba hidráulica capaz de realizar a tarefa. Esta máquina possuía um cilindro com um êmbolo móvel, acoplado a uma grande alavanca com um contrapeso. A alavanca cedia ao contrapeso, puxava o êmbolo e forçava a entrada do vapor por sucção. Uma vez preenchido, o suprimento de vapor era interrompido e uma corrente de água resfriava o cilindro, condensando o vapor e produzindo o vácuo. O peso da atmosfera forçava então o êmbolo para baixo, eliminando a água do cilindro resultando no bombeamento da água da mina. Por causa do contrapeso, a alavanca erguia novamente o êmbolo, iniciando um novo ciclo.

- **Joseph Black (1728 – 1799)**

Joseph Black nasceu em Bordeaux, na França. Conceituado professor de química, medicina e anatomia da Universidade de Glasgow, estudando a fusão do gelo, descobriu, por volta de 1761, o fenômeno do calor latente. Ele fez a distinção entre temperatura e calor. Black demonstrou, ainda, que o calor latente seria a quantidade de calor que deveria ser fornecida às substâncias para que sofram mudança de fase, sem a alteração de sua temperatura.

- **Primeira Máquina de Watt (1736 - 1819)**

James Watt nasceu em Greenock, na Escócia, foi aluno de Joseph Black, estudou a máquina de Newcomen quando trabalhava como construtor de instrumento na Universidade de Glasgow, na Escócia e propôs uma série de melhorias ao seu funcionamento, dentre as quais um condensador separado do cilindro principal, patenteada em 1769. Formou uma sociedade com o industrial Matthew Boulton, de 1774 a 1800, produzindo máquinas a vapor que logo substituíram as máquinas de Newcomen na extração de água das minas de carvão. Para alguns, foi à máquina de Watt que ocasionou a Revolução Industrial. Foi James Watt que fixou o cavalo-vapor como unidade de medida para determinar a potência de uma máquina.

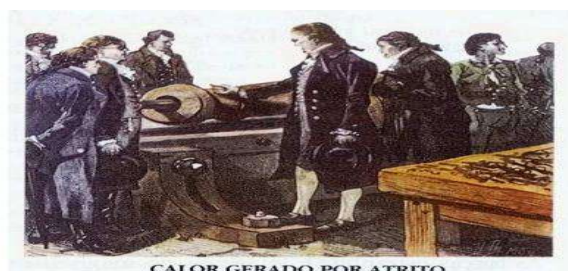
- **Lavoisier (1743 - 1794)**

No final do século XVIII, existiam duas hipóteses alternativas sobre a natureza do calor. A hipótese mais aceita considerava o calor como uma substância fluida indestrutível que dentre outras coisas escoaria de um corpo mais quente para um mais frio. Lavoisier deu a essa substância hipotética o nome de calórico. Ele defendia a ideia de que o calor podia ser transferido de um corpo a outro, mas a quantidade total de calórico se conservaria, ou seja, existiria uma conservação do calor.

- **Benjamin Thompson (1753 - 1814)**

Benjamin Thompson nasceu em Woburn, na colônia britânica de Massachusetts. Na Inglaterra recebeu o título de Conde de Rumford. Ao observar a perfuração de canos de canhões numa fábrica de armas em Munique, percebeu que enormes quantidades de calor eram geradas por atrito entre os retorneadores e os canos metálicos das armas. Era necessário mergulhar a peça num tanque com água, a qual aquecia a ponto de ferver. Este comportamento não podia ser explicado pela teoria do calórico. Se o calor constituísse um fluido, seria consumido muito depressa, mais o calor gerado pelo atrito continuava a ser liberado enquanto os canos estavam sendo perfurados. Na década de 1790, Rumford concluiu que o calor devia ser uma forma de movimento.

Figura 3 – Cano de Canhão



- **Livro de Carnot (1796 – 1832)**

O físico e engenheiro militar Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832) nasceu em Paris e estudou na École Polytechnique. Em 1824 publicou seu único trabalho, o livro Reflexões Sobre a Potência Motriz do Fogo, em que propõe uma teoria sobre o funcionamento das máquinas térmicas, com a descrição de um ciclo ideal que mostra a maior eficiência determinada pela natureza, para uma máquina que opera retirando calor de uma fonte quente, gerando trabalho e rejeitando calor a uma fonte fria.

- **Julius Robert Von Mayer (1814 - 1878)**

Mayer nasceu em Heilbronn, na Alemanha, estudou medicina na Universidade de Tübingen. Em 1842 publicou um artigo na revista científica Annales de Chimie, no qual fornecia o equivalente mecânico do calor. Foi o primeiro a estabelecer o princípio de conservação da energia, mas não conseguiu convencer a comunidade acadêmica. Seus resultados tinham pouca evidência experimental, sendo por isso, considerados especulativos. Mayer em seus estudos utilizou o argumento, fundamentado pelo Conde Rumford que o calor é fruto da agitação dos constituintes da matéria.

- **William Thomson (1824 – 1907)**

William Thomson melhor conhecido como Lord Kelvin nasceu em Belfast, na Irlanda, estudou nas universidades de Glasgow e Cambridge. Em 1848 propôs uma escala absoluta de temperatura (escala adotada hoje pelo Sistema Internacional de Unidades e tem seu nome). Foi o principal responsável pelo desenvolvimento formal dos trabalhos de Joule, sobre o equivalente mecânico de calor. Formulou juntamente com Clausius a segunda lei da termodinâmica, ou seja, a formulação do conceito de entropia.

- **Primeira lei da termodinâmica**

Formulada entre 1842 e 1847, esta tem como função definir o conceito de energia interna e o princípio da conservação da energia. Segundo alguns pesquisadores da história da termodinâmica a formulação da primeira lei se deu de forma desordenada e, dentre os vários cientistas que contribuíram com a sua dedução estavam Mayer, Joule, Helmholtz e Sadi Carnot.

- **Artigo de Joule**

James Prescott Joule (1818 - 1889) em seu artigo publicado em 1843 mostrou que

o calor gerado na bobina de um eletroímã é proporcional ao quadrado da corrente elétrica que a percorre, demonstrando assim o estudo inicial do efeito Joule. Nesse mesmo trabalho Joule mostrou ainda por meio do motor elétrico uma relação entre o calor produzido pelas correntes elétricas e o trabalho gerado ou consumido, ou seja, demonstrou que uma caloria é equivalente a 4,8 joules, porém esses resultados ainda eram considerados duvidosos e não eram muito adequados como provas empíricas da existência de uma relação constante entre trabalho e calor. Apesar da importância do trabalho de Joule, seu artigo não despertou interesse da comunidade científica, porque as suas experiências eram muito difíceis de serem interpretadas e reproduzidas.

- **Entropia de Clausius**

Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822 - 1888) em um trabalho publicado em 1850 propôs uma conciliação entre a universalidade da primeira lei da termodinâmica e a separação natural existente entre processos reversíveis e irreversíveis. O resultado dessa conciliação foi à distinção definitiva feita por ele dos conceitos de calórico e de calor, deduzindo dessa forma uma nova grandeza física que deu o nome de entropia, grandeza esta que seria o chamado calórico.

3.1.1 Discussão de Clausius e Kelvin que os conduziram aos seus respectivos postulados do conceito de entropia

- **Carnot**

Na Segunda Lei da Termodinâmica, Carnot mostrou que existem condições para a conservação de calor em trabalho e o máximo rendimento de uma máquina térmica. Para desenvolver suas pesquisas, Carnot apoderou-se da concepção de um fluido ígneo, historicamente conhecido como calórico, sugerido por Lavoisier para a natureza do calor.

- **Joule e Mayer**

Mayer formulou o princípio da conservação da energia. Enquanto Joule determinou a quantidade de trabalho necessária para gerar uma quantidade determinada de calor, ou seja, a equivalência entre energia mecânica e calor. Nestes estudos ambos utilizaram o argumento formulado pelo Conde Rumford que estabelece que o calor é resultado da agitação das partículas que compõe a matéria.

- **Entropia de Clausius**

Uma vez que os trabalhos de Carnot foram apoiados na concepção da natureza do calor como calórico, fica fácil perceber que sua concepção da natureza do calor se opõe

a concepção de Mayer e Joule. Essas ideias antagônicas culminaram com o surgimento de um cenário com duas possibilidades a ser escolhidas:

- Os princípios físicos utilizados por Carnot estão equivocados, pois se baseiam na concepção material do calor.
- Devemos concordar com os trabalhos de Carnot e rever a afirmação de Mayer e Joule sobre a natureza do calor.

Diante desse impasse conceitual, em um trabalho publicado em 1865 o polonês Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888) apresentou de fato a conciliação entre as posições antagônicas de Carnot e Mayer e Joule ao introduzir uma interpretação para o que Carnot chamava de calórico em seu ciclo.

Para fazer tal conciliação Clausius analisou o funcionamento de uma máquina térmica de Carnot utilizando tanto a concepção de calor de Mayer e Joule quanto à concepção de calórico de Carnot. Clausius verificou que para as duas formulações o conceito de trabalho estava bem definido matematicamente, identificando dessa forma o que Carnot chamava de calórico, ou seja, uma grandeza que a partir de então ele denominou como *entropia*, uma função de estado, que no ciclo de Carnot, flui do reservatório quente para o frio em um processo reversível: $S = \frac{Q}{T}$.

3.2 Abordagem conceitual – entropia e a segunda lei da termodinâmica

Nesta seção apresentaremos uma abordagem conceitual envolvendo a segunda lei da termodinâmica e a entropia estatística de Boltzmann, onde esta grandeza será definida usando tanto a visão da Termodinâmica ($\Delta S = Q/T$) quanto a visão da Mecânica Estatística ($S = k \ln w$), conforme sequência apresentada nos tópicos seguintes.

3.2.1 Processos termodinâmicos

3.2.1.1 Processo reversível

Classificamos como processos reversíveis as transformações que podem ocorrer em ambos os sentidos, desde que, na volta, o sistema retorne ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram variações definitivas na vizinhança do sistema.

Podemos citar como exemplo as transformações puramente mecânicas, que se realizam sem atritos e sem que se produzam choques inelásticos.

Imagine a seguinte situação: um bloco com uma determinada massa colocado no topo de um plano inclinado, em que na base desse plano existe uma mola considerada ideal. Se esse bloco se deslizar sem atrito plano abaixo, irá conseqüentemente, chocar-se

elasticamente com a mola e voltará a subir pelo plano até alcançar novamente a posição inicial. Como a transformação ocorrida não produziu nenhuma modificação na sua vizinhança ou nos corpos circundantes podemos classificá-la como um processo reversível.

3.2.1.2 Processo irreversível

Um processo é dito irreversível quando o inverso desse processo só pode se efetuar como parte de um processo mais complexo, envolvendo modificações nos corpos circundantes. Em outras palavras, são aqueles que possuem uma direção preferencial no tempo, não podendo ser executado “de trás para frente”. Quando falamos de processos reversíveis, citamos o exemplo do bloco descendo em um plano inclinado sem nenhuma resistência. Se por outro lado, considerarmos as perdas de energia por atrito para fazer o bloco retornar à posição inicial, seria necessário o fornecimento de energia. Dessa forma, a descida se tornaria irreversível.

Para entender melhor nossa compreensão de processos irreversíveis analisaremos as seguintes situações: quando um mergulhador pula em uma piscina, sua energia cinética é convertida em calor, aquecendo a água. Fenômeno como este é classificado como processo irreversível, uma vez que o resfriamento súbito da água não devolveria o mergulhador ao trampolim. Outros exemplos bastante comuns de processos irreversíveis é o resfriamento de uma xícara de café, ou a queima de lenha na lareira. Nunca veremos a fumaça voltando pela chaminé enquanto a sala se resfria e a lenha se reconstituindo a partir das cinzas.

3.2.2 Entropia

3.2.2.1 Processos irreversíveis e entropia

Do exposto no tópico anterior, verifica-se que os processos irreversíveis são unidirecionais, contudo, se esses processos retornassem aos seus estados iniciais espontaneamente, sob a ótica da Primeira Lei da Termodinâmica, que expressa o princípio da conservação da energia, tais fenômenos não causariam nenhuma anormalidade aparente, tendo em vista que esta lei não impõe um sentido preferencial para a ocorrência dos fenômenos naturais. Em vez disso, ela apenas se preocupa com a energia total do sistema. Para a Primeira Lei, não importa se, por exemplo, o calor se desloca de um corpo de maior temperatura para um corpo de menor temperatura ou se desloca no sentido inverso. O que importa é se a energia total desse sistema vai se conservar ou não.

Diante disso, percebe-se que não são as alterações da energia de um sistema fechado que estabelecem o sentido de ocorrência dos processos naturais, mas sim outra

propriedade, que conforme Resnick & Halliday (2016), denomina-se variação da entropia ΔS do sistema, podendo ser postulado da seguinte forma:

Todos os processos irreversíveis em um sistema fechado são acompanhados por aumento da entropia. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Nos processos irreversíveis, se opondo ao conceito de energia, a entropia é uma grandeza não conservativa, aumentando em um sistema isolado, na medida em que tais processos evoluem, por esse motivo a variação da entropia é frequentemente associada à “seta do tempo”, conforme consta em Resnick e Halliday (2016).

A variação da entropia é às vezes chamada de “seta do tempo”. Assim, por exemplo, associamos a explosão de um milho de pipoca ao sentido positivo do tempo e ao aumento da entropia. O sentido negativo do tempo (um filme passado ao contrário) corresponde a uma pipoca se transformando em milho. Como esse processo resultaria em uma diminuição da entropia, ele jamais acontece. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

3.2.2.2 Definição da variação de entropia

Na figura 7 tem-se um sistema isolado representando a expansão livre de um gás, que é um processo irreversível e que, portanto, acontece com o aumento da variação da entropia. A figura indica o gás em seus estados inicial i e final f , e para cada situação pode-se associar uma temperatura, uma pressão e um volume, que são propriedades clássicas de estado de um sistema termodinâmico, assim como a energia. Essas grandezas são ditas de estado porque não dependem do processo de transformação, dependem apenas do estado atual do gás.

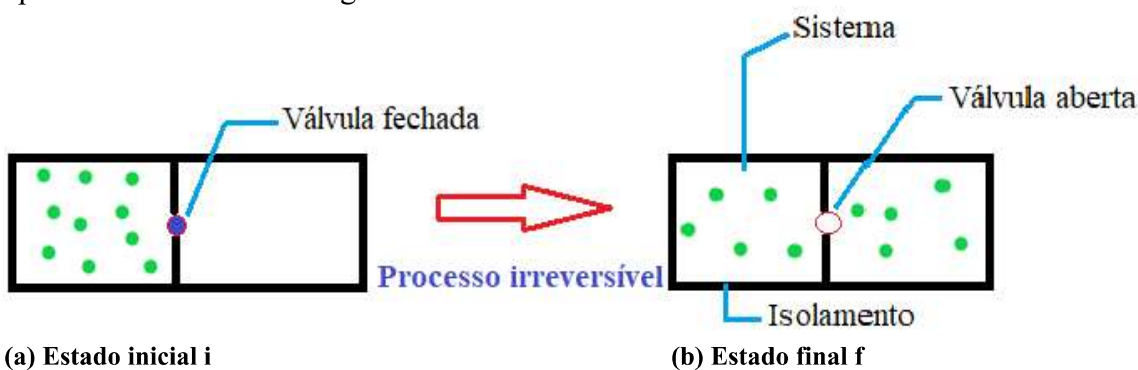


Figura 4: Gás em expansão livre, configurando um processo irreversível que evolui de (a) para (b).
Fonte: autor.

Nesse contexto, introduziremos o conceito de entropia S como sendo uma propriedade de estado, definindo-a por meio de sua variação $\Delta S = S_f - S_i$ num sistema que evolui por meio de um processo com estados inicial i e final f , e que de acordo com os autores Resnick & Halliday (2016), dada pela equação:

$$\Delta S = S_F - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Esta equação fornece uma definição do conceito de entropia em função da quantidade de calor Q que é a energia térmica transferida do sistema ou para o sistema durante o processo, e T representa a temperatura do sistema. É importante destacar que como a temperatura deve ser fornecida em kelvin, conforme o Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI), ela é sempre positiva, fazendo com que o sinal da variação da entropia ΔS , dependa apenas do sinal da quantidade de calor Q . E seguindo o que estabelece o SI, a unidade de entropia é joule por kelvin.

Apesar de definirmos entropia partindo do princípio que ela é uma propriedade de estado, assim como a temperatura, o volume e a pressão, a eq. 3.1 se torna problemática quando aplicada a processo irreversível como na expansão livre de um gás. Isso porque de consoante Resnick e Halliday (2016):

Enquanto o gás se expande para ocupar todo o recipiente, a pressão, a temperatura e o volume do gás flutuam de forma imprevisível. Em outras palavras, as três variáveis não passam por uma série de valores de equilíbrio bem definidos nos estágios intermediários da mudança do sistema do estado de equilíbrio inicial i para o estado de equilíbrio final f . Assim não podemos plotar uma trajetória pressão-volume da expansão livre no diagrama P - V e, mais importante, não podemos escrever uma relação entre Q e T que nos permita realizar a integração da equação. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Mas se considerarmos que a entropia é de fato uma função de estado, a variação da entropia entre os estados inicial i e final f , depende apenas desses extremos, não dependendo do caminho pelo qual o processo ocorreu. Isso posto, é perfeitamente possível substituir a expansão livre irreversível do gás da figura 4 por um processo reversível que passa pelos mesmos estados retromencionados (i e f). Dessa forma, neste novo processo é possível plotar uma trajetória no diagrama P - V , e a eq. 3.1 se torna coerente na determinação da variação da entropia em função da energia trocada pelo sistema e a temperatura desse sistema.

Ainda discorrendo sobre a expansão livre de um gás, vale ressaltar que nesta transformação a temperatura não varia, tendo em vista que conforme a figura 4 o processo ocorre sem trocas de calor com o ambiente – sistema isolado constituindo assim uma transformação adiabática – e pela definição desse tipo de expansão o gás não realiza trabalho, porque suas moléculas não sofrem resistência enquanto toma o espaço vazio e, claro, consoante a Primeira Lei da Termodinâmica a energia interna do sistema não se altera, revelando assim uma transformação isotérmica.

Figura 6: Diagrama P-V para a transformação isotérmica reversível. Fonte: Autor.

Vale reforçar que a expansão isotérmica representado acima é fisicamente diferente da expansão livre irreversível, contudo, como já foi dito, esses dois processos se tornam equivalentes quando observados apenas os estados inicial e final que são os mesmos nas duas transformações e, portando, fornecem a mesma variação de entropia em ambos os casos. Nesse prisma temos em Tipler (1976), que:

É importante compreender, todavia, que somente para um processo reversível a integral $\int dQ/T$ é independente do processo. Num processo irreversível, a variação da entropia do sistema não será dada pela integral $\int dQ/T$. Não obstante, uma vez que entropia é uma função de estado, podemos determinar a variação de entropia do sistema que efetua um processo irreversível do estado 1 para o estado 2, considerando qualquer processo reversível que comece e acabe nestes estados e fazendo o cálculo de $\int dQ/T$.” (TIPLER, 1976)

A partir dessa abordagem, podemos reescrever a eq. 3.1 para uma expansão isotérmica, da seguinte forma:

$$\Delta S = S_F - S_i = \frac{1}{T} \int_i^F dQ \quad \text{Eq. 3.2}$$

Mas a $\int dQ = Q$, onde Q representa a energia total transferida em forma de calor durante o processo, dessa forma a variação de entropia para o processo isotérmico, fica como segue:

$$\Delta S = S_F - S_i = \frac{Q}{T} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Como já foi apresentado anteriormente, para que a temperatura T do gás seja constante durante a expansão isotérmica da figura 5, uma quantidade de calor Q deve ser transferida da fonte de calor para o gás. Com isso, Q é positivo e, conseqüentemente, a entropia desse gás aumenta tanto durante o processo isotérmico como também durante a expansão livre da figura 4.

Sobre essa abordagem, na mesma perspectiva de Tipler (1976), supramencionado, temos em Resnick e Halliday (2016) onde dizem:

Para determinar a variação de entropia que ocorre em um processo irreversível, substituímos esse processo por um processo reversível que envolve os mesmos estados inicial e final e calculamos a variação de entropia para esse processo reversível. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

3.2.3 Entropia e a segunda lei da termodinâmica

Para enunciarmos a Segunda Lei da Termodinâmica, vamos analisar o comportamento da entropia se retornarmos para o estado inicial o gás representado na

figura 5 (b). Para isso, sendo o processo reversível, devemos devolver lentamente cada grão de areia retirado daquele êmbolo, até que o volume anterior do gás seja atingido, figura 5 (a). Isso implica que para que a temperatura seja mantida constante, nesse processo inverso e reversível, energia na forma de calor deve ser retirada do gás. Com isso, Q se torna negativo, e conforme a eq. 3.3, a entropia do gás diminui, violando assim aparentemente o enunciado da entropia, o qual diz que a entropia sempre aumenta. Entretanto, isso não é verdade quando levamos em consideração que essa nova transformação não representa um sistema irreversível isolado conforme impõe o enunciado formal da entropia.

Dessa forma, para eliminarmos essa suposta contradição em torno do conceito da entropia, precisamos ampliar o sistema incluindo o ambiente com a qual ele interage de forma que esse novo universo se torne isolado. O novo sistema deve levar em consideração além do gás, também a fonte de calor.

Considerando o valor absoluto da quantidade de calor $|Q|$, temos para o gás que perde calor, uma variação de entropia igual a $\Delta S(\text{gás}) = -\frac{|Q|}{T}$ e para a fonte que ganha a mesma quantidade de calor, uma variação de entropia de $\Delta S(\text{fonte}) = +\frac{|Q|}{T}$. E finalmente para determinarmos a entropia desse novo sistema fechado, precisamos somar essas duas quantidades, o que resulta em um valor igual a zero.

A partir disso, podemos ampliar o enunciado da entropia de tal forma que ela seja compatível tanto com os processos reversíveis quanto com os processos irreversíveis. Nesse contexto, Resnick e Halliday (2016), expuseram:

Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta se o processo for irreversível e permanece constante se o processo for reversível.

Embora a entropia possa diminuir em uma parte de um sistema fechado, sempre existe um aumento igual ou maior em outra parte do sistema, de modo que a entropia do sistema como um todo jamais diminui. Essa afirmação constitui uma das formas de enunciar a **Segunda Lei da Termodinâmica**. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

De acordo com os autores citados acima, esse enunciado mais geral do conceito de entropia representa uma das formas de se enunciar a Segunda Lei da Termodinâmica e que pode ser escrita matematicamente por meio da seguinte equação:

$$\Delta s \geq 0 \qquad \text{Eq. 3.4}$$

Essa equação traz o sinal de desigualdade para descrever os processos irreversíveis e o sinal de igualdade para indicar a variação da entropia nos processos reversíveis, todavia, ela só é válida para sistemas isolados.

É importante lembrar que processos reversíveis são processos idealizados, não existindo em fenômenos reais, tendo em vista que dificilmente teremos um sistema fechado livre de qualquer interferência externa, como por exemplo, isento da influência de atrito. Dessa forma, na prática, no nosso dia a dia, mesmo em ambientes fechados, os processos são sempre irreversíveis, de modo que a entropia sempre aumenta, evoluindo para um valor máximo.

3.2.4 Máquina térmica e a segunda lei da termodinâmica

Neste tópico será feita uma abordagem diferente para apresentarmos uma outra forma de enunciar a Segunda Lei da Termodinâmica. Para tanto analisaremos os processos de funcionamento de uma máquina térmica, definida como sendo um dispositivo composto por duas fontes térmicas de temperatura diferentes, denominadas fonte quente e fonte fria, que funciona em ciclos, entre essas duas fontes, tendo como atividade fim realizar trabalho útil a partir do calor fornecido da fonte quente.

As máquinas térmicas sempre utilizam um produto conhecido como substância trabalhante que tem como função absorver calor Q_1 da fonte quente de temperatura T_1 e depois realizar trabalho útil W por meio da utilização de parte dessa energia, sendo que a outra fração dessa energia é liberada necessariamente na fonte fria T_2 na forma de calor Q_2 , conforme a figura 7. Como exemplo de substância trabalhante, temos na máquina a vapor a mistura de água fervente e o vapor de água. Já nos motores dos veículos, a substância de trabalho ou fluido operante, muitas vezes, é representado pela mistura ar e gasolina.

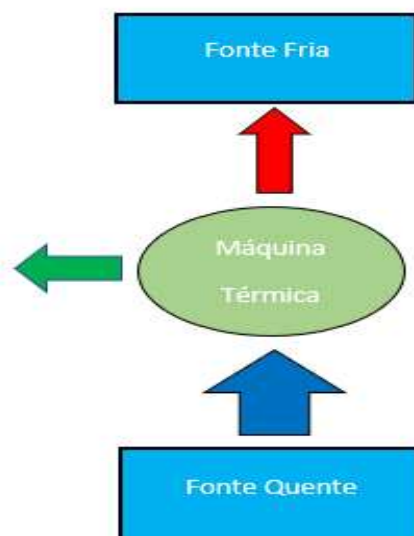


Figura 7: Diagrama esquemático de uma máquina térmica. Fonte: Autor.

A condição para que uma máquina térmica realize trabalho continuamente, é que

a substância trabalhante tem que operar em ciclo, repetindo esse movimento de retorno ao estado inicial periodicamente. É nessa conjuntura que surge o enunciado de Kelvin e Planck para a Segunda Lei da Termodinâmica, segundo os quais:

É impossível que uma máquina qualquer, que operando em ciclo, recebe calor de uma fonte e execute uma quantidade equivalente de trabalho sem produzir nenhum outro efeito nas suas vizinhanças. (TIPLER, 1976)

Esse enunciado nos revela que em uma máquina térmica, parte da energia recebida da fonte quente Q_1 em forma de calor deve ser liberada para a fonte fria Q_2 , restando apenas uma fração dessa energia para a realização de trabalho útil W , assim como representado na figura 7. Se parte dessa energia não fosse liberada para a fonte fria, não faria sentido esta máquina existir, como é possível notarmos quando analisamos o rendimento desta máquina.

Se utilizarmos a Primeira Lei da Termodinâmica para relacionar essas três grandezas térmicas, teremos:

$$w = |Q_1| - |Q_2| \quad \text{Eq. 3.5}$$

Podemos também determinar o rendimento n dessa máquina fazendo a razão entre o trabalho útil W e a energia em forma de calor Q_1 recebida pela substância trabalhante da fonte quente, de acordo com o que segue abaixo:

$$n = \frac{w}{|Q_1|} \quad \text{Eq. 3.6}$$

E substituindo a eq. 3.5 na eq. 3.6, obtemos o rendimento de uma máquina térmica em função de Q_1 e Q_2 como descrito a seguir:

$$n = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Essa equação revela que como Q_1 é sempre maior que Q_2 , uma vez que este é uma parte de Q_1 , o rendimento n assumirá valores menores que 1, demonstrando assim, a impossibilidade de uma máquina térmica atingir rendimento igual a 100%, o que está coerente com o que prevê a Segunda Lei da Termodinâmica.

3.2.5 Abordagem estatística do conceito de entropia

3.2.5.1 A conexão entre entropia e a desordem de um sistema

Como foi relatado na abordagem histórica, em 1865 Clausius definiu o conceito de entropia como uma grandeza que aumenta com a dissipação e atinge seu valor mais alto quando todo o potencial do sistema de realizar trabalho está esgotado. Foi exposto, também, que esta definição implica que, em um processo reversível a variação de entropia

é nula e em um processo irreversível a entropia sempre aumenta.

Dessa forma, considerando o universo como um sistema fechado, em 1865 Clausius lançou a Primeira e a Segunda Lei da termodinâmica. Ao enunciar a primeira lei afirmou que a energia total do universo é constante, enquanto no enunciado da segunda lei, afirmou que a entropia total do universo tende a um valor máximo.

De acordo com alguns autores como, por exemplo, Resnick & Halliday (2016) e Young & Freedman (2003), o conceito de entropia está associado à desordem de um sistema.

Mexa o café de uma xícara com uma colher [...] esse processo espontâneo resulta no aumento de entropia. Também resulta no aumento de desordem atômica, sendo o movimento de rotação inicial das moléculas do café um estado relativamente ordenado. (RESNICK & HALLIDAY, 2016).

A energia interna de um sistema pode ser calculada, pelo menos em princípio, somando – se todas as energias cinéticas das partículas constituintes e todas as energias potenciais da interação entre as partículas. Isso denomina – se um cálculo *microscópico* da energia interna. Podemos também fazer um cálculo microscópico da entropia S de um sistema. Contudo, diferentemente da energia, a entropia não é algo que pertence a cada partícula individual ou a pares de partículas do sistema. Em vez disto, a entropia é uma medida da desordem do sistema como um todo. (YOUNG & FREEDMAN, 2003).

Essa desordem molecular ou das partículas constituintes do sistema como um todo, como sugerem os autores acima, foi definido quantitativamente na Termodinâmica Estatística por Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) por volta de 1866. Segundo Silvia (1995) essa definição de Boltzmann se deve ao fato de que, no final do século XIX, a teoria mecânica do calor recebeu novo impulso com os trabalhos de Maxwell (1831 – 1871) sobre a distribuição de velocidades das moléculas de um gás assim como os trabalhos do próprio Boltzmann sobre a introdução da teoria das probabilidades e da entropia no estudo da teoria cinética dos gases.

A essência do trabalho de Maxwell se concentrava na descrição do estado de equilíbrio termodinâmico de um sistema. Em 1860 ele propôs que após uma série de colisões, a energia cinética das partículas tende a se igualar.

Apoderando-se das ideias desenvolvidas por Clausius e Maxwell, Boltzmann escreveu:

Como resultado das colisões, muitas moléculas adquirirão maiores velocidades, e outras obterão menores velocidades, até que finalmente é estabelecida uma distribuição de velocidades entre as moléculas, tal que não seja alterada por novas colisões. (BOLTZMANN, apud. PEREIRA JR., 1997).

A partir daí a Segunda Lei da Termodinâmica passa a ter uma interpretação de Boltzmann. Nessa nova interpretação Boltzmann demonstrou que nos movimentos espontâneos de energia como na conversão de energia mecânica em calor ou na refrigeração de corpos aquecidos, as moléculas dos sistemas envolvidos tendiam para uma distribuição probabilística de suas energias. Para ele essa distribuição desordenada, era a mais provável, enquanto que a distribuição ordenada ou organizada, possuía menor probabilidade de ocorrência. Dessa forma, Boltzmann chegou à conclusão que o crescimento espontâneo da entropia de um sistema poderia ser relacionado com o aumento da distribuição das energias moleculares do mesmo.

Para Gilbert (1982) a interpretação de Boltzmann corresponde a admitir que os estados de maior entropia são os mais prováveis e que, também, os estados mais prováveis são os de maior desordem, logo pode-se concluir que os sistemas evoluem no sentido de maior desordem ao mesmo tempo em que sua entropia aumenta.

Como demonstramos a primeira formulação do conceito de entropia não fazia conexões com estados microscópicos. Sua definição foi desenvolvida exclusivamente em cima de sistemas macroscópicos. Agora sabemos que foi Boltzmann quem fez sua relação com a escala microscópica. Apesar desse feito, e uma vez que a entropia de um sistema aumenta quando este recebe calor de sua vizinhança, para muitos como Covolan (2003), a grande realização de Boltzmann foi mostrar que as duas definições, aparentemente distintas, são equivalentes. Quando um sistema recebe calor, aumenta a agitação de suas partículas constituintes e, conseqüentemente, aumenta sua desordem microscópica.

Nos tópicos seguintes, de forma bem acessível e, portanto, didática, faremos uma abordagem do conceito de entropia na perspectiva da mecânica estatística, ou seja, apresentaremos a equação da entropia de Boltzmann, explicitando sua aplicação durante a expansão livre de um gás ideal. Para tanto, se faz necessário para melhor clareza, antes definirmos os conceitos estatísticos de macroestado, microestado e multiplicidade.

3.2.5.2 Macroestado, Microestado e Multiplicidade

Para introduzirmos os conceitos de macroestado (o mesmo que configuração), microestado e multiplicidade, vamos analisar os resultados possíveis obtidos no lançamento de dois dados de seis lados não viciados.

Se lançarmos um único dado de seis faces, teremos seis resultados possíveis e equiprováveis, ou seja, os valores 1, 2, 3, 4, 5 e 6, têm as mesmas chances de ocorrerem. Por outro lado, se lançarmos dois dados ao mesmo tempo, esse universo aumenta

significativamente de tal forma que teremos 36 (6 x 6) resultados diferentes possíveis e com a mesma probabilidade de ocorrer, conforme descrito na tabela 1. Contudo, quando fazemos a soma de cada resultado obtido, como apresentado na tabela 2, percebe-se que temos 11 valores possíveis nesse espaço amostral. Valores esses que vão de 2 a 12, os quais não possuem a mesma probabilidade de ocorrência, isso porque, conforme a tabela 3, temos diferentes formas de se obter uma determinada soma, de tal modo que nesse espaço amostral, existem mais possibilidades de se chegar a uma determinada soma do que em outra.

		DADO 1					
		1	2	3	4	5	6
DADO 2	1	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)
	2	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)	(2,6)
	3	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)	(3,6)
	4	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)	(4,6)
	5	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)	(5,6)
	6	(6,1)	(6,2)	(6,3)	(6,4)	(6,5)	(6,6)

Tabela 1: Resultados possíveis no lançamento de dois dados. Fonte: Autor.

		DADO 1					
		1	2	3	4	5	6
DADO 2	1	2	3	4	5	6	7
	2	3	4	5	6	6	8
	3	4	5	6	7	8	9
	4	5	6	7	8	9	10
	5	6	7	8	9	10	11
	6	7	8	9	10	11	12

Tabela 2: Soma de cada par de resultados possíveis no lançamento de dois dados. Fonte: Autor.

Soma possíveis	Resultados possíveis no lançamento de dois dados
2	(1,1)
3	(1,2); (2,1)
4	(1,3); (2,2); (3,1)
5	(1,4); (2,3); (3,2); (4,1)
6	(1,5); (2,4); (3,3); (4,2); (5,1)
7	(1,6); (2,5); (3,4); (4,3); (5,2); (6,1)
8	(2,6); (3,5); (4,4); (5,3); (6,2)
9	(3,6); (4,5); (5,4); (6,3)
10	(4,6); (5,5); (6,4)
11	(5,6); (6,5)

Tabela 3: Classificação dos resultados possíveis para o lançamento de dois dados conforme o universo de soma possíveis. Fonte: Autor.

Quando observamos a tabela 3, verificamos que existem seis maneiras diferentes de se obter a soma 7, em contrapartida, existe apenas uma maneira de se obter a soma 2, dessa forma, dizemos que o evento soma 7 é muito mais provável que o evento soma 2.

Feito esta análise do espaço amostral do lançamento de dois dados não viciados, iniciaremos agora de forma bem didática uma discussão sobre os conceitos de macroestado (ou configuração), microestado e multiplicidade, que de acordo com Moura (2016), os conceitos de microestado e macroestado estão relacionados com o grau de detalhe com que se descreve um sistema. Sendo assim, podemos dizer que cada par de valores possíveis no lançamento de dois dados, como mostrado na tabela 1, representa o microestado, porque é a descrição mais detalhada possível daquele sistema. Já as somas possíveis, dentro do universo de 2 a 12, como consta na tabela 3, constitui o macroestado daquele sistema, que apesar de não individualizar os eventos como acontece no microestado, se torna bastante importante quando estamos preocupados apenas com a probabilidade de ocorrência de uma determinada soma.

Do exposto, percebe-se que um macroestado, também denominado configuração, de um sistema é constituído por um ou mais microestados.

Na tabela 2, vemos que o macroestado soma 2 possui a mesma chance de ocorrer que o macroestado soma 12, sendo menos prováveis de ocorrer quando comparados com o macroestado soma 7. Isso se deve porque, como todos os microestados (pares de valores), são igualmente prováveis, macroestado que tem maior número de microestado, é mais provável.

Do que foi apresentado verifica-se que um determinado microestado só pode ser bem entendido quando é localizado o resultado fornecido por cada dado individualmente, uma vez que o microestado (4,1) é diferente do microestado (1,4). E por mais que esses dois eventos em particular sejam semelhantes, eles não são iguais, porque foram fornecidos por dados distintos, logo, podemos dizer que esses pares são *eventos distinguíveis*, o mesmo não ocorre quando estamos lidando com uma amostra de gás em expansão livre como veremos posteriormente; fenômeno que não possibilita diferenciar as moléculas envolvidas, por isso constituem um *evento indistinguível*.

Quando se trata de um sistema físico composto por muitas partículas, como por exemplo, numa amostra de gás, Moura (2016) escreve que os conceitos de microestado e

macroestado estão relacionados com as grandezas físicas da seguinte forma:

Num sistema físico mais típico, como um objeto macroscópico composto por muitas partículas, o microestado especificaria a posição e a velocidade de cada partícula individualmente. Já o macroestado seria dado pelo volume, temperatura e outras grandezas macroscópicas necessárias para descrever a situação desse objeto. (MOURA, 2016)

Uma vez que conhecemos os conceitos de microestado e macroestado, fica fácil definir o conceito de multiplicidade W , o qual representa o número de microestados que compõe um macroestado. Anteriormente falamos que o macroestado soma 2 e soma 12 possui a mesma probabilidade de ocorrer, contudo, esses eventos são bem menos prováveis que a que a soma 7. Pois bem, além da explicação dada naquela oportunidade, podemos fazer uso da multiplicidade para justificar o comportamento de tais eventos, uma vez que a soma 2 e a soma 12, possuem multiplicidade $W = 1$ (são formadas por um microestado cada) e a soma 7, tem multiplicidade $W = 6$ (é composta por 6 microestados), ou seja, quanto maior a multiplicidade de um macroestado, mais chance ele tem de acontecer, tendo em vista que como foi relatado anteriormente, todos os microestados são equiprováveis, logo, evento com um maior número de microestados ou de maior multiplicidades é mais provável.

Depois de usarmos didaticamente o lançamento de dois dados não viciados, como um sistema físico, para inserção dos conceitos estatísticos de macroestado, microestado e multiplicidade, trataremos a partir do tópico seguinte da entropia de Boltzmann aplicada a expansão livre de um gás ideal, ou seja, faremos uma abordagem do conceito de entropia a partir dos princípios da mecânica estatística.

3.2.5.3 Entropia de Boltzmann

Depois de definirmos a entropia a partir dos princípios da termodinâmica de agora em diante este conceito será abordado sob a ótica da mecânica estatística.

Vale ressaltar que, pela natureza deste projeto de pesquisa, concentraremos nossos esforços em definir apenas a entropia de Boltzmann em sua versão introdutória, não sendo objeto deste trabalho, apresentar as particularidades e as implicações matemáticas avançadas do universo da mecânica estatística relacionadas com o presente tema.

Iniciaremos nosso estudo, analisando a distribuição das moléculas de um gás entre dois compartimentos de uma caixa isolada, como representado na figura 8. Essa caixa traz uma amostra de gás ideal em expansão livre, onde temos quatro moléculas iguais ou indistinguíveis.

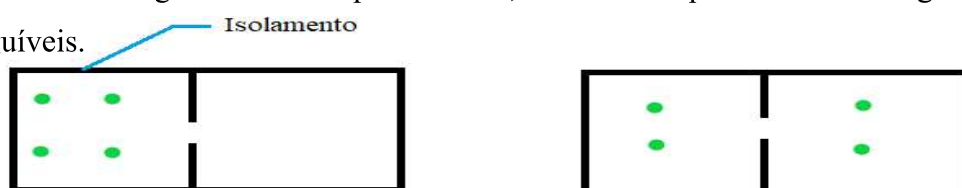


Figura 8: Quatro moléculas de gás ideal em expansão livre. Fonte: Autor

Se observamos apenas uma molécula notaremos que após um intervalo de tempo, ela ocupará ou o lado direito ou o lado esquerda da caixa, e como são dois compartimentos de mesma dimensão, ela possui 50% de chance de estar no compartimento da esquerda ou no compartimento da direita.

Se fosse possível fotografarmos o movimento dessas quatro moléculas, perceberíamos as mais diversas configurações, e dentro das quais teríamos diferentes formas dessas moléculas se posicionarem, como por exemplo:

Configuração I: 4 moléculas do lado esquerda e nenhuma do lado direito. Neste caso existe somente uma forma dessas moléculas se arranjam, como demonstrado na figura 9.

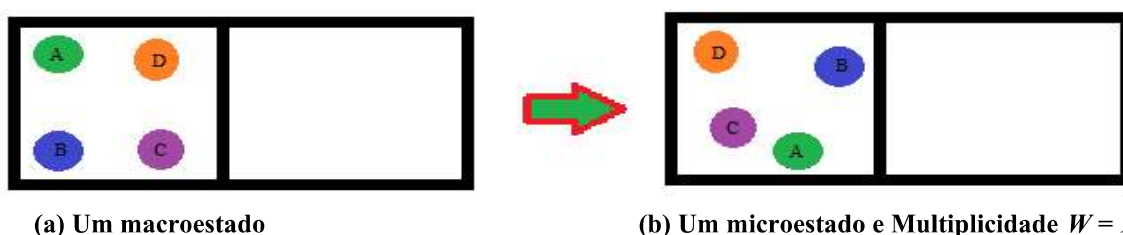


Figura 9: Relação entre macroestado e microestado para a situação em que foi considerada as quatro moléculas distribuídas em um único lado da caixa. Fonte: Autor.

Configuração II: 3 moléculas do lado esquerdo e 1 molécula do lado direito. Aqui teríamos diferentes arranjos para a mesma configuração, porque é possível a molécula que se encontra do lado da direita trocar de posição com cada moléculas da esquerda por três vezes, conforme representado na figura 10.

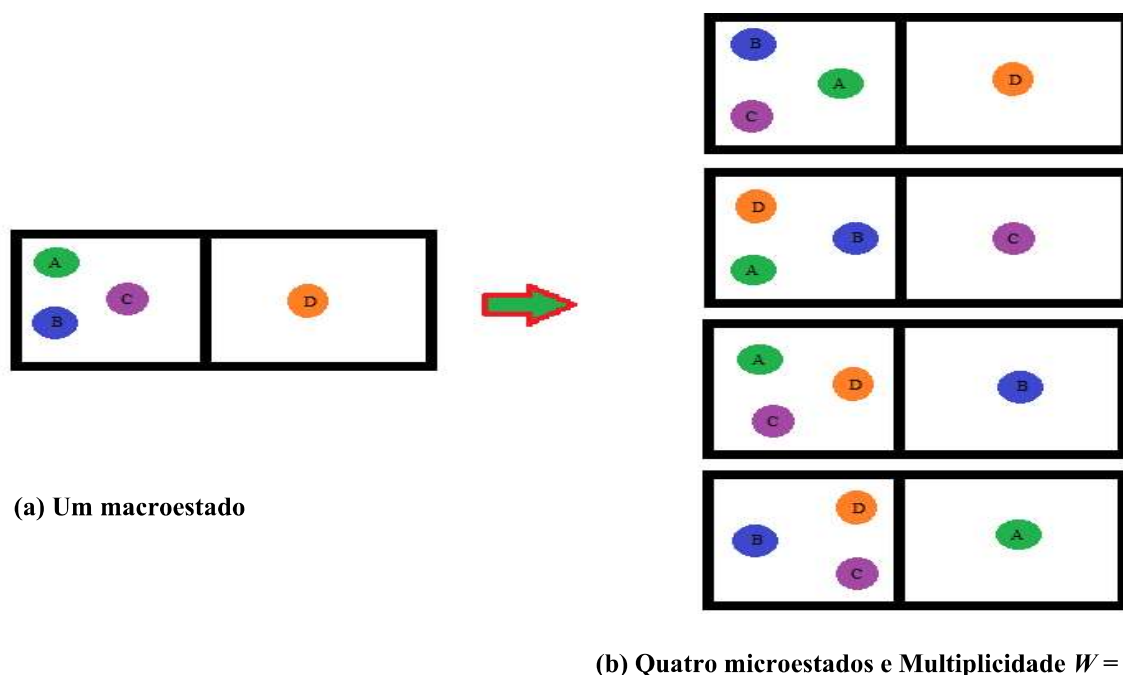


Figura 10: Relação entre macroestado e microestado para a situação em que foram consideradas três

moléculas distribuídas do lado esquerdo e uma molécula do lado direito. Fonte: Autor.

Nesses exemplos a configuração do sistema representa o macroestado, e os diferentes arranjos dessas moléculas dentro dessa configuração, como descrito na figura 10, são os microestados, e o número desses microestados é a multiplicidade W da configuração.

Sendo assim, na figura 9, temos um macroestado e multiplicidade $W = 1$. Já na figura 10, temos um macroestado com multiplicidade $W = 4$.

Do exposto, fica claro que a multiplicidade de um determinado sistema depende do número total de partículas e da quantidade de partículas distribuídas em cada compartimento de um recipiente. Desse modo, levando em consideração que a multiplicidade está relacionada também com as diferentes formas dessas moléculas se posicionarem de um lado ou do outro de um recipiente, podemos determinar a multiplicidade W para uma amostra de N partículas, distribuindo n dessas partículas em partes de um determinado recipiente, fazendo uso da análise combinatória por meio da equação abaixo, conforme sugere Resnick & Halliday (2016):

$$w = \frac{N!}{n_1! n_2!} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Essa equação representa a multiplicidade W da configuração para N partículas distribuídas em dois compartimentos de um sistema, conforme descrito nas figuras 9 e figura 10, contudo, ela pode ser reescrita para calcular a multiplicidade em ambientes subdivididos em vários compartimentos, basta que para isso, seja acrescentado em seu denominador o fatorial do número de partículas de cada compartimento correspondente.

Se aplicarmos a eq. 3.8 nas configurações I e II, figuras 9 e 10, notaríamos que a multiplicidade se tornaria maior para o caso em que $n_1 = n_2$, situação na qual essas moléculas estariam distribuídas igualmente entre os dois lados da caixa, representando a configuração mais provável, e conforme veremos matematicamente, a situação de entropia máxima. Isso ocorre porque de acordo com Resnick & Halliday (2016), a hipótese fundamental da mecânica estatística é que todos os *microestados são igualmente prováveis*.

Esses mesmos autores escreveram a equação de Boltzmann que fornece a relação entre a entropia S de uma configuração de um gás e a multiplicidade W dessa configuração da seguinte forma:

$$S = k \ln w \quad \text{Eq. 3.9}$$

Onde $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann.

Essa ilustre equação da entropia de Boltzmann é uma função logarítmica, porque tem o objetivo de harmonizar uma aparente contradição que acontece quando analisamos dois sistemas independentes. Neste caso a entropia apresenta propriedade aditiva, uma vez que a entropia total desses sistemas é a soma das entropias individuais. Já a probabilidade de ocorrência desses dois sistemas é o produto das probabilidades de cada sistema obtido individualmente. Para resolver esse imbróglio, em sua equação, Boltzmann utilizou a propriedade da função logaritma, que possibilita fazer a conexão entre uma grandeza com propriedade aditiva e uma grandeza com propriedade multiplicativa.

Com essa equação, Boltzmann demonstrou matematicamente que configuração ou macroestado de maior multiplicidade W , ou seja, mais provável, possui maior entropia S .

Se analisarmos as configurações I e II, figuras 9 e 10, notaríamos que a multiplicidade se tornaria maior para o caso em que $n_1 = n_2$, situação na qual essas moléculas estariam distribuídas igualmente entre os dois lados da caixa, representando a configuração mais provável, e conforme a equação de Boltzmann, teríamos ali uma situação de máxima entropia ou de máxima desordem, representando assim, a configuração em que o gás atinge o equilíbrio térmico.

Na eq. 3.9, para um número muito grande de W , como o obtido em uma amostra de gás em que N é da ordem de 10^{22} , faz-se necessário utilizar a aproximação de Stirling desenvolvida pelo matemático escocês James Stirling, para evitar o fatorial de N , o qual neste caso, apresenta um grau de complexidade muito grande para ser calculado.

Com esse objetivo, tem-se abaixo a aproximação de Stirling, consoante Resnick & Halliday (2016):

$$\ln N! \approx N(\ln N) - N \quad \text{Eq. 3.10}$$

Após introduzirmos a definição da entropia nas visões da termodinâmica e da mecânica estatística, nos tópicos seguintes apresentaremos alguns fenômenos que são associados a este conceito e que muitas vezes são feitas sem qualquer coerência física.

3.2.6 Entropia na teoria da informação

Como foi mostrada anteriormente a definição do conceito de entropia de Boltzmann está relacionado com o grau de aleatoriedade de um sistema físico. O fato de Boltzmann ter feito esta definição em termos estatísticos (ou probabilísticos), fez com que este conceito passasse a ser aplicado em diversas áreas do conhecimento, dentre elas está a Teoria da Informação.

Em 1948 o americano matemático e engenheiro eletricitista Claude Elwood Shannon (1916 – 2001) publicou um trabalho intitulado Teoria Matemática da Comunicação a respeito da quantificação da informação presente em uma mensagem. Neste trabalho, que posteriormente foi publicado em forma de livro (Pineda, 2006), Shannon associa a Quantidade de Informação ao conceito de entropia conforme interpretado pela Mecânica Estatística de Boltzmann.

Para entender melhor essa associação feita por Shannon, é preciso que antes entendamos o processo de transmissão de uma mensagem.

Segundo Pineda (2006), que desenvolveu uma pesquisa sobre a entropia de Shannon, antes de se receber uma mensagem, é suposto que exista um conjunto finito de mensagens possíveis de serem recebidas, e que cada uma destas mensagens tenha uma certa probabilidade de ocorrência. Dessa forma, segundo o autor, a incerteza quanto à informação a ser recebida diminui quando a mensagem é recebida. E o quanto de incerteza que a mensagem recebida reduz está relacionada à probabilidade de sua ocorrência.

Antes de definir uma grandeza que mede a quantidade de informação, Pineda (2006) afirma que o recebimento de uma mensagem mais provável tem menos informação que uma mensagem menos provável. Para reforçar seu argumento ele utilizou o seguinte exemplo: num informe meteorológico que prevê para a cidade de Maceió um dia ensolarado possui menos informação do que a previsão de um dia de nevasca. Isso porque o recebimento da primeira mensagem não será novidade para qualquer pessoa que esteja familiarizado com o clima do Nordeste Brasileiro, enquanto que o recebimento da segunda mensagem será tido como uma ocorrência rara (incomum).

No processo de comunicação de Shannon a mensagem é transmitida da seguinte forma: o emissor através de um canal de comunicação envia ao receptor uma mensagem codificada em símbolos. O processo de codificação envolve a tradução da informação em símbolos, retirados de um repertório previamente definido. Com base nesse raciocínio, Shannon propôs que a quantidade de informação deve ser entendida como a entropia de Boltzmann. Para ele, à medida que a ocorrência de um grupo de símbolos se torna mais provável que outros do repertório, a entropia decresce. A entropia é máxima quando a ocorrência de todos os símbolos é equiprovável (ou seja, a probabilidade de ocorrência de alguns grupos de símbolos é nula). Para o caso onde existe certeza sobre qual símbolo vai ser transmitido, a entropia é zero. Em outras palavras, a quantidade de informação decresce quando aumenta a probabilidade de ocorrência de certos símbolos. Quando há certeza sobre qual símbolo vai ser transmitido, a quantidade de informação será nula.

Neste contexto o conceito de entropia passa a ser uma grandeza que mede a quantidade de informação de uma mensagem e está relacionada com a frequência dos símbolos empregados para codificá-la.

Comparando o conceito de entropia de Boltzmann com o de Shannon, percebe-se que o primeiro estudou os gases e definiu o conceito de entropia como sendo a medida da desordem molecular desses gases, e sua variação aumenta à medida que o movimento das moléculas se torna aleatória. O segundo estudou a informação e definiu o conceito de entropia como sendo a medida da quantidade da mesma, de informação. E esta medida está associada à probabilidade de ocorrência dos símbolos. Empregando o mesmo raciocínio probabilístico de Boltzmann, Shannon definiu que a variação da sua entropia aumenta à medida que a ocorrência dos símbolos se torna menos aleatória (ou menos provável), ou seja, a probabilidade de ocorrência dos símbolos tende a zero.

De exposto e conforme Magossi & Paviotti (2019), Shannon, definiu a incerteza, ou a entropia (Letra H), de uma mensagem X sobre n valores com probabilidade p_i , para $i = 1, 2, \dots, n$, como descrito na equação abaixo:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad \text{Eq. 3.11}$$

Ou seja, podemos dizer que temos aí a equação de Boltzmann, eq. 3.9, adaptada para analisar os fenômenos probabilísticos envolvidos no processo de transmissão de uma mensagem, mas como se trata de quantidade de informação que é inversamente proporcional a maior probabilidade de ocorrência, ela foi adaptada com o acréscimo do sinal negativo.

Percebe-se que tanto a eq. 3.9 (equação de Boltzmann) quanto a eq. 3.11 (equação de Shannon), nos mostram que fenômenos de maior probabilidade ou mais prováveis, possuem maiores entropia. Ou ainda, que a entropia aumenta sempre no sentido dos eventos mais prováveis. Motivo pelo qual a eq. 3.15 foi usada também, mas em módulo, na aplicação do produto.

3.2.7 Entropia nos fenômenos sociais

Partindo da associação do conceito de entropia ao aumento da desordem de um sistema termodinâmico, muitos tentam relacionar este conceito com movimentos sociais ou a caos urbanos.

Um caso bem comum dessa relação é percebido quando as moléculas que formam um gás em um sistema são comparadas com automóveis como ônibus, caminhões, motos,

trens, aviões, dentre outros. Em seguida são feitas as seguintes observações: à medida que aumenta a velocidades desses veículos e, conseqüentemente, as suas energias cinéticas, as mesmas são degradadas na forma de energia térmica, sonora, nas deformações por impacto, etc. Isso se deve ao aumento desses automóveis, em um sistema fechado, tais como rodovias, ferrovias e nas pistas aéreas, todas sendo cada vez mais utilizadas sem um correspondente aumento da infraestrutura. Como consequência disso, aumentam os acidentes, os atrasos nos aeroportos, a geração de calor e de stress.

Em outros casos, alguns identificam a desordem de Boltzmann com a desordem social, dizendo que o caos da sociedade tende sempre a crescer. Outros definem a entropia como uma medida da insatisfação do indivíduo e das massas, afirmando que a insatisfação da sociedade tende sempre a um máximo.

Uma outra aplicação incoerente do conceito de entropia se refere ao comportamento do ser humano. Este é um criador por natureza. Muito mais que um criador de máquinas e artefatos, é antes de qualquer coisa um criador de ideias. Algumas delas são aceitas, outras não. A cada nova ideia ou comportamento aceito ou entendido, a entropia avança um pouco mais em direção a seu máximo.

Como podemos perceber naquilo que foi apresentado acima, em todos os casos a aplicação do conceito de entropia possui definições distorcidas e precipitadas quando comparados com a definição estabelecida pela Mecânica Estatística.

Preocupado com a aplicação do conceito de entropia aos fenômenos sociais de forma errônea. Luiz Eleno (2011) alerta que na Mecânica Estatística o aumento da desordem se refere ao aumento do número de possíveis estados equivalentes em que o sistema pode se encontrar. E esta interpretação do conceito de entropia não deve ser confundida com caos sociais, tão pouco com bagunça, corrupção ou afrouxamento moral. Em seu argumento ele reforça que ao aplicarmos o conceito de entropia as Ciências Humanas é preciso estar atento a este fato, pois o risco de recair numa falácia é grande.

3.2.8 Princípio da degradação da energia: uma consequência da entropia

Em termos matemáticos a entropia é dada também pela equação, $\Delta S = \frac{Q}{T}$, que mede a quantidade de calor por unidade de temperatura envolvida em um processo termodinâmico. Essa razão corresponde a quantidade de energia térmica por unidade de temperatura que é convertida em energia interna e que não serve para realizar trabalho, por exemplo. Quando um corpo recebe calor, uma quantidade $\frac{dQ}{T}$ indica o calor convertido em energia do sistema que não pode ser usada para outro fim, neste processo,

que não seja $\Delta T > 0$.

Da primeira lei da termodinâmica, que é uma expressão da conservação da energia, sabemos que a mesma não pode nem ser criada e nem ser destruída.

Para a segunda lei, em outras palavras a entropia, além dessa característica da energia, a forma que ela assume nas diversas transformações de que participa acaba se “deteriorando” em formas menos úteis de energia, ou seja, quando a energia torna-se mais difusa acaba degenerando em dissipações.

Podemos entender melhor essa ideia fazendo a seguinte observação: podemos dizer que a energia “organizada”, concentrada e, portanto, energia de alta utilidade ou qualidade, acaba degenerando em energia “desorganizada”, com baixa utilidade ou qualidade. Uma vez que a água já fluiu sobre uma queda d’água, ela perdeu seu potencial para realizar trabalho útil. O mesmo acontece com a gasolina, em que a energia organizada se degrada quando queima dentro do motor de um carro. A energia útil degenera em forma não úteis, e é incapaz de realizar trabalho novamente, alimentando, por exemplo, um outro motor de automóvel. A perda de qualidade da energia ocorre a cada transformação que ela sofre.

Sobre esse assunto Nussenzveig (2002) e Young & Freedman (2003), escreveram:

O princípio do aumento da entropia mostra que a diferença está no aumento da entropia do universo no caso irreversível. Do ponto de vista prático, conforme vamos ver, isso corresponde em geral a um desperdício de energia que, em princípio, poderia ter sido utilizada. (NUSSENZVEIG, 2002)

Considere a mistura de água quente com água fria. Poderíamos usar a água fria como os reservatórios quente e frio de uma máquina térmica. Enquanto retiramos calor da água quente e fornecemos calor para a água fria, podemos obter uma certa quantidade de trabalho. Porém, depois que a água se mistura e atinge o equilíbrio térmico, a oportunidade de se obter trabalho é perdida irreversivelmente. Depois do equilíbrio, a água quente não pode ser mais separada da água fria. Não existe nenhuma diminuição de energia quando a água quente se mistura com a água fria. O que foi perdido não foi a energia, mas sim a disponibilidade, ou seja, a oportunidade de se converter parte do calor da água quente em trabalho mecânico. Portanto, quando a entropia cresce, a energia para produção de trabalho torna-se menos disponíveis e o universo se torna mais caótico ou “aleatório”. (YOUNG & FREEDMAN, 2003)

Do exposto, fica evidente que durante as transformações naturais (processos irreversíveis), a energia se conserva, como previsto pela primeira lei da termodinâmica, contudo, a disponibilidade ou a qualidade dessa energia diminui, perdendo assim, seu potencial de realizar trabalho. O aumento da entropia por se tratar de um fenômeno irreversível, se perdermos a oportunidade de obtermos uma certa quantidade de trabalho

no momento certo, já mais recuperaremos esse trabalho em situações futuras.

Se consideramos o universo como um sistema isolado, podemos dizer, sobe a ótica da segunda lei da termodinâmica, que ele evolui no sentido de aumento da entropia, porque os processos naturais são irreversíveis e, por consequência, do esgotamento energético. Tal interpretação da segunda lei se torna bem pertinente, quando analisamos os problemas enfrentados pela sociedade no diz respeito à crise energética frente aos problemas ambientais provocados, principalmente, pelas ações imprudentes do homem na exploração dos recursos naturais.

Talvez seja necessário desenvolver um trabalho de conscientização do homem focado no postulado da termodinâmica, onde fosse possível apresentar a sociedade a relação entre irreversibilidade e o esgotamento energético. Mostrar que o homem neste contexto atua como uma engrenagem aceleradora desse processo irreversível, conduzindo assim, o universo, neste caso de forma mais específico, o planeta Terra, a um lugar de disponibilidade de energia mínima ou de máxima entropia.

A divulgação do postulado da entropia se faz necessário ainda mais quando observamos o que diz o professor titular do DLO-FFLCHUSP, Dr. Mário Bruno Sproviero.

Com o problema da entropia ocorre um fenômeno curioso: apesar de ter a máxima importância, afetando diretamente - a curto, médio e longo prazo – a própria sobrevivência humana no planeta, tem sido bem pouco divulgado e assim praticamente ignorado pela opinião pública. Recentemente, foi publicado na Europa a tradução atualizada do clássico *Entropy* de Jeremy Rifkin, que apresenta a tendência universal de todos os sistemas - incluídos os econômicos, sociais e ambientais - a passar de uma situação de ordem à crescente desordem. Portanto, deve ser discutido por toda a sociedade, em todos os seus setores e não apenas em círculos especializados de cientistas. (SPROVIERO, 2001, apud. GRÉCIO, 2016)

3.2.9 Seta do tempo

Muitos autores associam os fenômenos irreversíveis ao sentido da passagem do tempo. Isso porque o tempo sempre irreversivelmente vai do passado para o futuro. Podemos observar isso na prática quando analisamos o crescimento de uma árvore ou o envelhecimento de uma pessoa, fatos estes que são impossíveis de ocorrer no sentido inverso.

Já sabemos que a única lei física que trata desse fenômeno, que distingue passado e futuro, é a segunda lei da termodinâmica. Se analisarmos a irreversibilidade sob a ótica da entropia de Boltzmann, veremos que a inversão da seta do tempo não é algo

impossível, apenas improvável, porque possui chance mínima de ocorrer na prática, como por exemplo, na situação em que todas as moléculas de um gás presentes em uma caixa se distribuam espontaneamente de um único lado desse recipiente, figura 6. Isso não é impossível, contudo, tem probabilidade mínima de acontecer.

Essa tendência de associar a irreversibilidade à seta do tempo, pode ser percebido em Resnick & Halliday (2016), quando eles dizem:

Nos processos irreversíveis, a entropia de um sistema fechado aumenta. Graças a essa propriedade, a variação da entropia é às vezes chamada de “seta do tempo”. Assim, por exemplo, associamos a explosão de um milho de pipoca ao sentido positivo do tempo e ao aumento da entropia. O sentido negativo do tempo (um filme passado ao contrário) corresponde a uma pipoca se transformando em milho. Como esse processo resultaria em uma diminuição de entropia, ele jamais acontece. (RESNICK & HALLIDAY, 2016)

Por mais que esses autores afirmam que a inversão da seta do tempo “jamais acontece”, porque se não a segunda lei da termodinâmica seria violada, pode-se assegurar que se analisarmos esta lei sob a perspectiva da mecânica estatística, por meio da equação da entropia de Boltzmann, concluiríamos surpreendentemente que existe uma probabilidade finita, embora muito pequena, de isso ocorrer, logo tal fato não é impossível de acontecer dentro dessa nova visão.

3.3 Abordagem experimental

A Atividade Experimental consiste na execução de uma experiência de lançamento simultâneo, pelos alunos, de dois dados não viciados, oportunidade em que as somas das faces terão que ser anotadas em uma tabela.

Durante a execução da experiência, os alunos terão que ser divididos em grupos de até cinco participantes, onde cada grupo lançará por 36 vezes, dois dados não viciados, e para cada lançamento, eles deverão anotar em uma tabela, o resultado da face 1 e da face 2, bem como a soma desses dois valores.

Capítulo 4: Metodologia - Aplicação do Produto

Este Produto Educacional traz uma metodologia de ensino bastante coerente com a realidade do professor da educação básica. Utiliza-se materiais com um custo bem acessível, além de necessitar de uma estrutura bastante simples para sua execução, podendo ser aplicado perfeitamente em uma sala de aula convencional.

Na sua aplicação, utiliza-se como materiais papel A4 para impressão das tabelas e questionários, dados não viciados, embalagem retangular para bolo G 78, figura 15, dentro da qual os dados são lançados, caneta esferográfica, um notebook e um Datashow para projeção dos slides utilizados durante a abordagem histórica e conceitual.

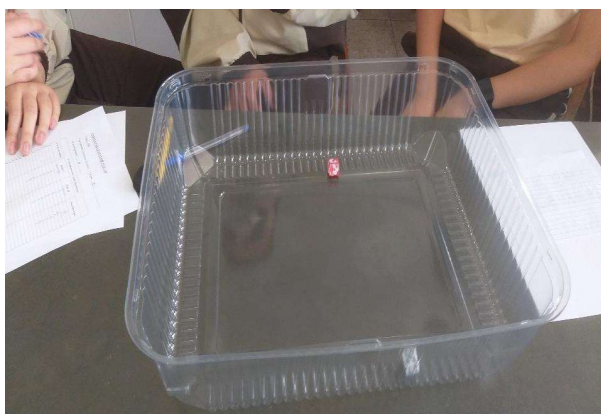


Figura 11: Nesta figura temos uma embalagem retangular para bolo G 78 dentro da qual os dados foram lançados. Temos também uma caneta esferográfica azul, dois dados pintados com cores diferentes, algumas tabelas impressas em papel A4, além de alguns alunos posicionados durante a realização da atividade experimental. Fonte: Autor.

Como já exposto anteriormente, neste trabalho utiliza-se a História da Ciência e a Atividade Experimental como recursos didáticos facilitadores para o ensino do conceito de entropia. Percebeu-se, durante a aplicação deste produto, que a História da Termodinâmica se tornou bastante interessante para inserção da entropia de Clausius, e esta, conforme já previa a teoria da aprendizagem significativa, atuando como conhecimento prévio na estrutura cognitiva do aluno, ajudou-o a compreender de forma significativa a entropia de Boltzmann, que teve a Atividade Experimental como principal ferramenta pedagógica motivadora dessa aprendizagem.

O teste desta metodologia aconteceu de 22/03/2022 a 31/03/2022, ou seja, foram necessárias duas semanas, contudo, envolvendo um quantitativo de 16 aulas de 50 minutos cada. Já o público alvo foram 23 alunos dos 2º anos do Novo Ensino Médio, do Colégio da Polícia Militar do Estado de Goiás unidade Mansões Paraíso situado na cidade de Aparecida de Goiânia – GO.

Vale destacar que o Novo Ensino Médio nos possibilitou atender uma das condições preconizadas pela Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, que segundo a qual, para que aprendizagem significativa para aconteça é necessário que o aluno manifeste disposição para aprender. Que o aluno demonstre interesse em aprender aquele determinado conteúdo ensinado pelo professor. Nas palavras de Moreira (1999):

A outra condição é que o aprendiz manifeste uma disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo, a sua estrutura cognitiva. (MOREIRA, 1999, p. 156).

Dentre as mudanças que o Novo Ensino Médio implantou nas escolas, está aquela em que o aluno tem a liberdade de escolher a área de conhecimento em que demonstra mais afinidade e, portanto, mais disposição em aprender. Aproveitando dessa oportunidade, este trabalho foi aplicado em uma turma de alunos denominada Trilha 01, que trabalha a temática Energia que nos Move, e pertencente a área do conhecimento Ciências da Natureza e suas Tecnologias, da qual fazem parte as disciplinas de Física, Química e Biologia. Esses alunos tiveram a liberdade de escolher estudar o assunto da citada Trilha, e representam uma parte dos alunos pertencentes a seis turmas de 2º anos. Os demais estudantes dessas turmas foram distribuídos, conformes suas preferências em Trilhas de outros assuntos e até mesmo de outras áreas do conhecimento, como nas áreas de Ciências Humanas, Linguagens, Matemáticas e suas Tecnologias.

Dessa forma, em consonância com a teoria de aprendizagem que norteou este projeto, os alunos manifestaram interesse em aprender o assunto abordado.

A partir do que foi relatado acima, sugerimos que este recurso seja executado em turmas dos 2ª anos do ensino médio, obedecendo as sete etapas da sequência didática descritas nos parágrafos seguintes e apresentada no fluxograma da figura 15.

Assim, subsidiados pela teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e pelo modelo de Gowin, na primeira etapa, em uma aula, por meio da aplicação de um questionário pré-teste - juntado no apêndice A – o professor deve fazer o diagnóstico dos conhecimentos prévios dos estudantes.

Após a aplicação do questionário pré-teste, nas duas aulas seguintes, o professor executou a segunda etapa, onde será feita a abordagem histórica por meio de aula expositiva por meio do uso de um computador e um datashow, oportunidade em que os alunos irão conhecer os principais acontecimentos da termodinâmica, desde as construções das primeiras máquinas térmicas, à formalização dos conceitos de temperatura, de calor, das leis da termodinâmica e do ciclo de Carnot, bem como dos conflitos que existiram em torno da formulação do conceito de entropia de Clausius.

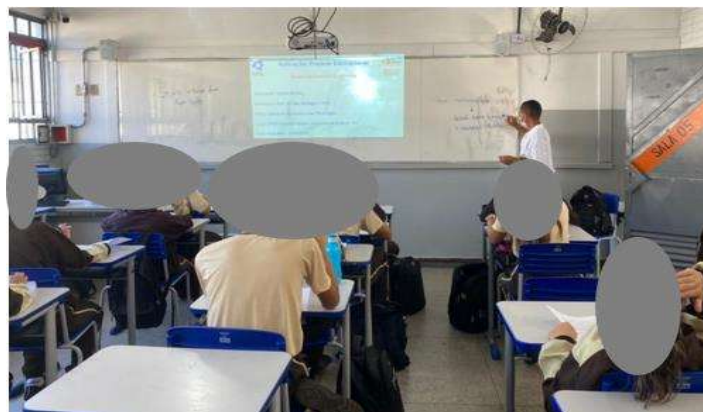


Figura 12: Preparativos para início da segunda etapa da aplicação do produto. Fonte: Autor.

Na terceira etapa, são necessárias seis aulas para fazerem a abordagem conceitual, porém bastante produtiva uma vez que nessa oportunidade o professor já terá conhecimento da qualidade dos conhecimentos prévios existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Dessa forma, o processo de ensino e aprendizagem ficará bem mais interessante tanto para o professor quanto para os alunos.



Figura 13: Aula durante a terceira etapa da aplicação do produto. Fonte: Autor.

A quarta etapa, que poderá acontecer em uma aula, é o momento de preparar os alunos para a atividade experimental, onde o professor deverá resolver com eles as questões da atividade teórica denominada “questões pré-lançamentos” – juntada no apêndice B –, com o intuito de trabalhar com esses alunos os eventos probabilísticos presentes no lançamento de um dado não viciado e no lançamento de dois dados simultâneos.

Depois disso, inicia-se a quinta etapa, com duração de uma aula, onde sugerimos que os alunos sejam divididos em grupos de até quatro integrantes, os quais podem ser levados para o laboratório de ciências da escola, local em que os dois dados não viciados de cores diferentes, por ser tratar de eventos distinguíveis, conforme já descrito em tópico

anterior, serão lançados por 36 vezes e os pares de valores obtidos terão que ser anotados por esses alunos na tabela 1 - juntado no apêndice C.

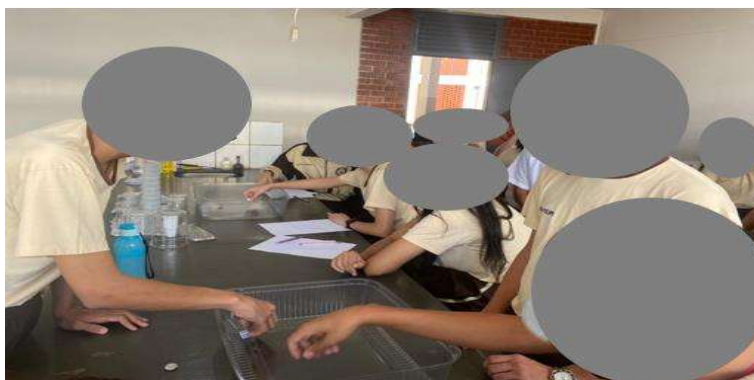


Figura 14: Realização da atividade experimental na quinta etapa. Fonte: Autor.

Com essas informações registradas em planilha, é possível na sexta etapa com duração de quatro aulas, os alunos resolverem algumas questões do questionário da atividade denominada “questões pós-lançamentos” – juntada no apêndice B, e a partir desse evento, a tabela mais importante desta sequência didática deverá ser preenchida, tabela 02 - juntada no apêndice D -, e, em seguida, as informações registradas nela terá que ser amplamente debatidas com os alunos. É nesse momento que esses estudantes poderão visualizar de forma mais clara, os conceitos de microestado, macroestado, bem como a tendência natural de aumento da entropia nos eventos mais prováveis, conforme previsão de Boltzmann e de Shannon, e as discussões feitas durante as aulas expositivos relatadas na terceira etapa.

Depois de esgotados os debates em torno dos conceitos envolvidos na tabela 02, momento em que deverão ser sanadas todas as dúvidas e curiosidades desses estudantes, os quais, bem provavelmente, se apresentarão bastantes inquietos e deslumbrados, principalmente com os desdobramentos do conceito de entropia, finalmente na sétima etapa de execução desse recurso didático, que poderá ser desenvolvida em uma única aula, é a oportunidade em que esses aprendizes demonstrarão seus conhecimentos adquiridos respondendo as questões do questionário pós-teste – juntado no apêndice E –

4.1 Objetivos das questões dos questionários pré e pós testes

A questão 1 tem como objetivo avaliar o conhecimento do aluno sobre a relação entre os conceitos de calor e de temperatura. Enquanto a questão 2 busca averiguar o que esses alunos aprenderam sobre o conceito de calor, e mais, se eles conseguem perceber essa grandeza como sendo uma forma de energia em trânsito, conforme representadas

abaixo:

- 1. É comum no dia a dia as pessoas tratarem os conceitos de calor e de temperatura como sendo iguais. Você concorda com isso? Justifique sua resposta, dizendo o porquê de tal afirmação.*
- 2. Não é difícil em dias de alta temperatura, presenciarmos alguém fazendo a seguinte afirmação: “estou com calor” ou “eu tenho calor”. Conceitualmente falando em função de seus conhecimentos de física térmica, você concorda com tal afirmação? Justifique sua resposta a partir da definição de calor.*

As questões 3, 4 e 5, objetivam avaliar se os alunos foram capazes de diferenciar o conceito de temperatura e calor, observando que nem sempre o fornecimento de calor a um corpo implica na variação da sua temperatura. Pretende-se avaliar também a noção do aluno sobre equilíbrio térmico, como vemos a seguir:

3. O que acontece com a temperatura de um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido (em fusão) quando fornecermos calor a ele.

*4. Julgue a veracidade das seguinte proposição marcando V para verdade e F para falsa, a partir da análise da seguinte afirmação: **se dois corpos de tamanhos diferentes estiverem em contato e com a mesma temperatura, e ambos isolados do meio ambiente, pode-se dizer que:***

- () O corpo maior é o mais quente.*
- () O corpo maior cede calor para o corpo menor.*
- () Não há troca de calor entre os corpos.*

5. Tem-se duas barras de alumínio: uma a 40°C e outra 60°C. Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.

Por outro lado, a questão 7 verificará a compreensão desses alunos sobre o sentido preferencial dos processos espontâneos. E as questões 6, 8 e 9 objetivam mensurar o conhecimento adquirido por esses estudantes a respeito da impossibilidade de reversão espontânea após a ocorrência de um processo espontâneo, consoante descritos nos enunciados seguintes:

6. Temos duas canecas de alumínio ligadas e isoladas do meio ambiente, uma com 2 litro de água a uma temperatura de 60°C e outra, também com 2 litro de água a uma temperatura de 30°C. Encostando uma na outra, verifica-se que após

certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 45°C . Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 45°C , voltem às temperaturas que anteriormente eram de 60°C e 30°C ? Justifique.



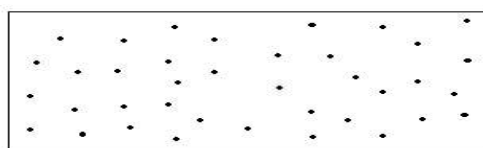
7. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de removida a separação.

Após um minuto.

8. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



9. Considere as seguintes situações:

a) Gelo derretendo; **b)** A refrigerante que fica choca; **c)** Uma vela que derrete; **d)** Um homem envelhecendo; **e)** Uma planta crescendo; **f)** Leite esfriando na xícara.

A – Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis?

B – Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

C – Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?

Assim, voltado diretamente para o tema deste trabalho, temos as questões 10, 11, 12 e 13, onde as questões 10 e 11 tratam de averiguar os conhecimentos assimilados pelos alunos a respeito do que eles pensam sobre a degradação da energia útil em um processo termodinâmico irreversível. E por fim, temos as questões 12 e 13 que além de coletarem os conhecimentos assimilados por esses aprendizes a respeito da relação existente entre aumento da entropia e processo irreversível, objetivam estimular a curiosidade desses estudantes a respeito desse importante fenômeno da física térmica, abaixo temos as citadas questões:

10. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.

11. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dínamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.

12. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

a) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?

b) Podemos dizer neste caso que a entropia do sistema quarto aumentou? Explique.

c) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decurso de uma semana inteira? Justifique sua resposta.

13. (UCS-2011) Um recente filme que no Brasil recebeu o nome de “O Curioso Caso de Benjamin Button”, protagonizado pelo ator Brad Pitt, conta a história curiosa de um personagem que nasce velho e, à medida que o tempo passa, vai rejuvenescendo. Se pensarmos no envelhecimento humano como um processo

energeticamente irreversível, qual título alternativo do filme ficaria coerente com as leis da Física?

- a) A Curiosa Obediência à Equação de Clapeyron*
 - b) O Extraordinário Caso da Violação da Segunda Lei de Newton*
 - c) O Estranho Caso de Violação da Segunda Lei da Termodinâmica*
 - d) O Incomum Caso de Confirmação da Primeira Lei da Termodinâmica*
- O Intrigante Caso de Violação da Terceira Lei de Newton.*

4.2 Sequência didática representada por meio de um fluxograma

Na figura 15 temos um fluxograma que traz, de forma resumida, as sete etapas da sequência didática relatada nos parágrafos desta seção.

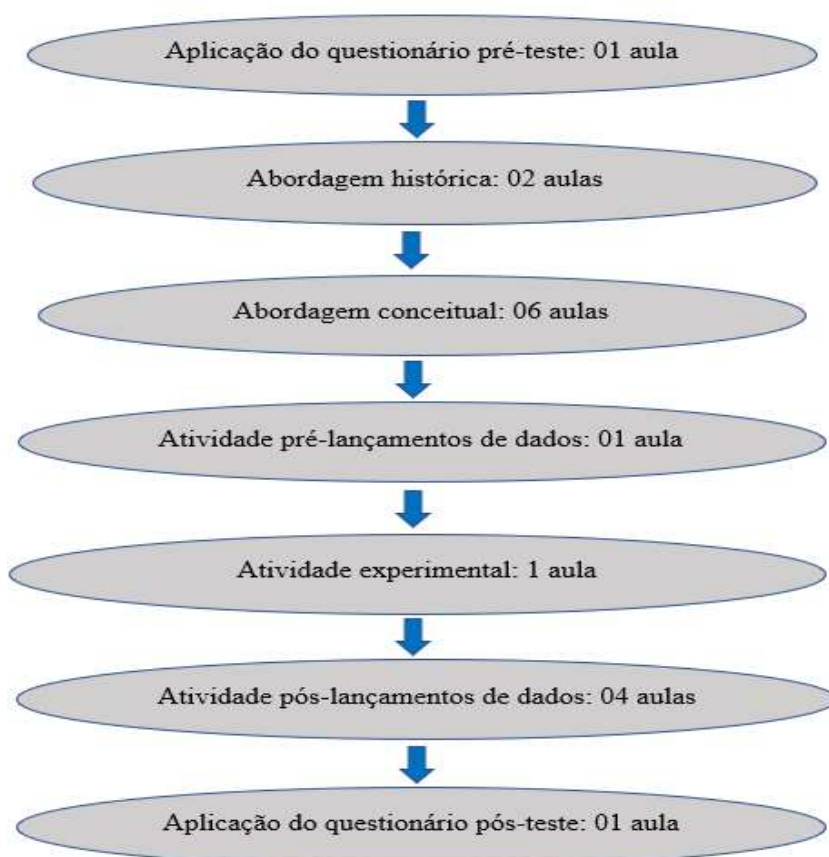


Figura 15: Fluxograma com a sequência didática da aplicação do produto educacional.
Fonte: Autor.

4.3 Observações a respeito da experiência em sala de aula

Ressaltamos aos colegas professores que findado a explanação teórica, a atividade que trata das questões pré-lançamentos (apêndice B) deve ser trabalhada com os alunos com o intuito de facilitar o aprendizado do conteúdo de probabilidade, e prepará-los para melhor desempenho durante a atividade prática. Nessa ocasião, os alunos sob a supervisão

do professor, resolverão questões simples de probabilidade envolvendo o lançamento de dois dados, conforme expostos nas perguntas a seguir: “*Lançando simultaneamente 2 dados, qual a probabilidade da soma das faces obter valor igual a 2?*” ou “*Quais os possíveis resultados quando lançamos dois dados?*”.

É oportuno ressaltar que as questões pré-lançamentos foram inspiradas em uma atividade realizada por Silva (2020) em sua pesquisa de mestrado.

Logo após realização da atividade pré-lançamentos, consoante já relatado na descrição da quinta etapa e figura 18 os alunos, conforme realidade da escola, poderão ser conduzidos ao laboratório para realização de coleta de dados, na oportunidade em que a tabela 1 (apêndice C) será preenchida com os valores obtidos. De posse dessas informações, esses aprendizes deverão retornar para a sala de aula, local em que passarão a classificar essas informações utilizando a atividade pós-lançamentos.

Essa atividade pós-lançamento foi elaborada por este pesquisador com o intuito de fazer a transposição didática para o ensino dos conceitos de microestado, macroestado (ou configuração), multiplicidade, e de entropias tanto a de Boltzmann quanto a de Shannon, os quais são descritos em função da probabilidade de ocorrência de um dado fenômeno.

A seguir temos as questões pós-lançamentos (juntada também no apêndice B), onde é possível notar a transposição didática dos conceitos físicos da mecânica estatística retromencionados, por meio dos valores obtidos e registrados na tabela 1.

Questões pós-lançamentos

1- A partir dos valores obtidos nos lançamentos dos 2 dados, durante as 36 repetições, responda:

a) Os macroestados (as somas possíveis obtidas).

_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____
_____	/	_____	/	_____

b) Os microestados (os pares ordenados de valores obtidos classificando-os por macroestado).

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

c) *Qual somatória de faces ocorreu mais vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão n°***

d) *Qual somatória de faces ocorreu menos vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão n°***

2- *De posse da tabela de valores obtidos com os lançamentos dos 2 dados, indique:*

a) *As multiplicidades (o número de microestados para cada macroestado) e as respectivas entropias em unidade de 10^{-23} J/K.*

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

b) O que se pode concluir dos resultados obtidos acima? Para isso, reveja os resultados obtidos na **letra b** da questão n°

e) Organize esses resultados em uma segunda tabela fornecida posteriormente pelo professor, a qual organiza os resultados, em função da **multiplicidade, macroestado, microestado e entropia**.

3- Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?

Os resultados alcançados durante realização da atividade pós-lançamentos devem ser organizados de forma bem mais didática e, portanto, bem mais compreensiva, na tabela 2.

TABELA 02:

Experimento: Lançamento de dados **Grupo:** _____

N° de integrantes: _____

Somas Possíveis Para 02 Dados (MACROESTADO)	Pares Obtidos nos Lançamentos (MICROESTADO)	N° de Soma Possíveis Para 02 Dados	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica / Máxima	Entropia/k (S/k = ln W) Boltzmann	Entropia em Função da Probabilidade (S = - p log p) Shannon
2				1/36 = 2,7%		
3				2/36 = 1/18 = 5,5%		
4				3/36 = 1/12 = 8,3%		
5				4/36 = 1/9 = 11,1%		
6				5/36 = 13,8%		
7				6/36 = 1/6 = 16,6%		
8				5/36 = 13,8%		
9				4/36 = 1/9 = 11,1%		
10				3/36 = 1/12 = 8,3%		
11				2/36 = 1/18 = 5,5%		
12				1/36 = 2,7%		
Total de Lançamentos (Espaço amostral – Tabela 1)				36		

Figura 16: Tabela 2 antes de ser preenchida. Fonte: Autor.

Durante a execução dos trabalhos em sala de aula, participaram 23 alunos que foram divididos em seis grupos, destes somente dois, não conseguiram obter os resultados esperados para os valores da entropia. Seus cálculos ficaram incoerentes com o valor teórico que previa a soma 7 como evento mais provável e, portanto, de maior entropia. Apesar disso, verificou-se que o aprendizado desses estudantes não ficou prejudicado, pelo contrário, contribuiu para que a turma entendesse que o lançamento de dados é um evento probabilístico, o que significa dizer que quanto maior o espaço amostral, maior é a chance de um determinado evento acontecer. Logo, da análise da situação, eles concluíram que tal incoerência poderia ser corrigida aumentando o espaço amostral de 36 lançamentos para um valor mais significativo.

Para reforçar essa percepção desses estudantes, eles resolveram a questão 3 da atividade pós-lançamentos, a qual pergunta: “3- *Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?*”, oportunidade em que responderam com a ajuda do professor pesquisador, que seria necessário um número muito grande de vezes.

Do que foi relatado, verifica-se que a nossa estratégia didática, se revelou bastante eficiente no processo de ensino e aprendizagem dos principais conceitos da física térmica e em especial do conceito de entropia de Boltzmann.

Apesar disso, o professor que adotar este Produto Educacional como estratégia didática para o ensino da entropia estatística, sugerimos, de forma complementar, que ele organize uma tabela com todos os valores coletados no lançamento dos dados, e após isso, plote um gráfico das somas dos valores obtidos em função da frequência de ocorrência desses valores. Com isso ele será capaz de demonstrar para os estudantes, que quanto maior o número de lançamento, mais preciso será o resultado pretendido, neste caso ficará mais convincente para os aprendizes o resultado soma 7 que tende a ocorrer com maior frequência, por ser um evento mais provável e, portanto, fazendo uma analogia com os eventos termodinâmicos, a situação em que a entropia se torna máxima.

A título de exemplo, como descrito no parágrafo anterior, no tópico seguinte todos os 216 (6 grupos com 36 lançamentos cada) valores coletados pelos seis grupos de alunos foram organizados em uma tabela e representados em um gráfico para melhor visualização das frequências de incidência de cada soma.

4.4 Total dos pares de valores obtidos pelos alunos no lançamento dos dois dados

Na tabela 6 consta todos os 216 pares de valores obtidos durante o lançamento dos

dois dados não viciados pelos seis grupos de alunos participantes da atividade experimental, e na sequência, o gráfico 1, indica o comportamento da curva da relação entre o número de incidência total e as somas possíveis.

Somas Possíveis	216 Resultados obtidos no lançamento de dois dados de todos os grupos	Número de incidência
2	(1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1); (1,1)	5
3	(1,2); (2,1); (1,2); (1,2); (1,2); (3,2); (1,2); (2,1); (3,1);	9
4	(1,3); (3,1); (1,3); (3,1); (2,2); (2,2); (1,3); (2,2); (3,1); (1,3); (2,2); (3,1); (1,3); (2,2); (1,3); (3,1); (3,1)	17
5	(2,3); (1,4); (3,2); (2,3); (4,1); (1,4); (3,2); (2,3); (1,4); (4,1); (3,2); (4,1); (2,3); (3,2); (2,3); (1,4); (1,4); (3,2); (2,3); (3,2); (4,1); (1,4); (2,3); (3,2); (1,4); (1,4)	26
6	(1,5); (5,1); (1,5); (2,4); (1,5); (5,1); (5,1); (1,5); (3,3); (1,5); (3,3); (5,1); (1,5); (4,2); (3,3); (2,4); (1,6); (3,3); (1,5); (3,3); (4,2); (1,5); (3,3); (5,1); (4,2); (5,1); (5,1)	27
7	(1,6); (5,2); (2,5); (3,4); (3,4); (5,2); (6,1); (6,1); (2,5); (1,6); (2,5); (3,4); (2,5); (6,1); (4,3); (2,5); (6,1); (5,2); (3,4); (3,4); (6,1); (6,1); (3,4); (3,4); (4,3); (5,2); (6,1); (1,6); (5,2); (1,6); (4,3); (3,4); (5,2); (1,6); (5,2); (1,6); (2,5); (3,4); (5,2); (1,6); (5,2); (3,4); (5,2); (1,6); (4,3); (3,4); (5,2); (1,6); (1,6)	49
8	(3,5); (2,6); (5,3); (2,6); (5,3); (3,5); (6,2); (5,3); (5,3); (3,5); (6,2); (2,6); (3,5); (4,4); (5,3); (5,3); (5,3); (4,4); (2,6); (4,4); (6,2); (2,6); (6,2); (3,5); (4,4); (3,5); (6,2); (2,6); (4,4); (2,6); (4,4); (5,3); (6,2); (4,4); (2,6)	35
9	(4,5); (4,5); (6,3); (4,5); (3,6); (3,6); (5,4); (6,3); (4,5); (6,3); (5,4); (6,3); (4,5); (4,5); (5,4); (4,5)	16
10	(5,5); (5,5); (6,4); (5,5); (4,6); (5,5); (5,5); (4,6); (4,6); (4,6); (6,4); (4,6); (6,4); (5,5); (6,4); (4,6)	16
11	(6,5); (5,6); (6,5); (6,5); (5,6); (5,6); (5,6); (6,5)	8
12	(6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6); (6,6)	8

Tabela 4: Classificação dos 216 resultados obtidos no lançamento dos dois dados dos 6 grupos participantes da pesquisa. Fonte: Autor.

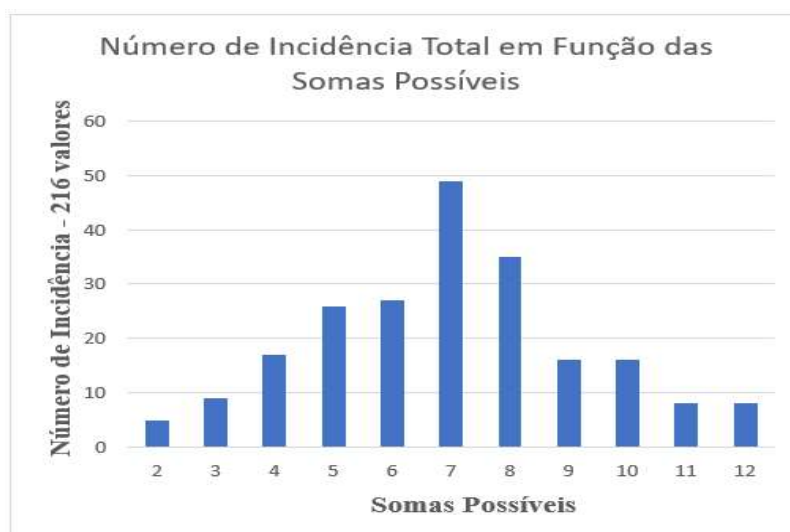


Gráfico 1: Número de incidência referentes aos 216 pares de valores obtidos em função das somas possíveis para o lançamento de dois dados não viciados. Fonte: Autor.

Durante a aplicação desta metodologia de ensino os alunos observaram apenas por meio da tabela 2 da figura 20 e apêndice D, o comportamento das somas possíveis à medidas em que os dois dados não viciados eram lançados, na oportunidade verificaram que a soma 7 se tornou o evento mais provável, entretanto, sugerimos que os colegas professores que utilizarem esta ferramenta pedagógica em suas aulas, quando conveniente, façam também um gráfico envolvendo todos os pares de valores obtidos pelos alunos indicando a curva da relação entre o número de incidência total e as somas possíveis, mostrando para eles de forma mais real que quanto maior o número de lançamento, mais a curva se ajusta formando um pico central para soma 7, conforme previsão teórica, além de eliminar possíveis incoerências de resultados como os obtidos por dois grupos participantes da pesquisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Produto Educacional subsidiado pela Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel e pelo Modelo de Gowin, constitui um material de didático potencialmente significativo capaz de facilitar, aos professores do ensino médio, o ensino dos principais conceitos da termodinâmica, em especial do conceito de entropia.

Isso se torna bastante interessante porque, nós professores sabemos que os materiais que tratam do conceito de entropia e, principalmente, os dirigidos para o ensino médio, são raros. Sem contar que nos poucos que existem, esta grandeza não possui uma definição apropriada que faça uma transposição didática respeitando a natureza deste conceito como medida da degradação da energia útil. Em alguns casos a impressão que fica é que cada autor o define ao seu modo. Contribuindo, dessa forma, com o surgimento de concepções distorcidas.

Aos colegas que forem adotar nosso Produto Educacional em suas aulas, acreditamos que seja relevante apresentar aos alunos uma tabela e um gráfico com todos os pares de valores obtidos com o lançamento dos dois dados não viciados, porque assim, ficará mais evidente para eles que quanto maior o número de lançamento mais preciso ficará o resultado soma 7, mais a curva se ajusta formando um pico central de acordo com o que estabelece a previsão teórica discutida durante a exposição de conteúdo, facilitando desse modo, a transposição didática para melhor entendimento da entropia estatística, evitando que, incoerências de resultados que muitas vezes surgem quando analisamos apenas 36 resultados, algo que foi constatado durante aplicação desta metodologia de ensino em alguns grupos de alunos participantes da pesquisa.

Com isso, espera-se que esse trabalho possa contribuir de forma significativa com o processo de ensino e aprendizagem da termodinâmica, entretanto, de forma mais específica, com o ensino da entropia de Boltzmann. E que os professores do ensino médio possam utilizá-lo, inclusive, fazendo modificações ou adaptações que julgarem necessárias, conforme as suas realidades escolares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSUBEL, D.P.; Novak, J.D. and Hanesian, H. (1978). Educational psychology: a cognitive view. 2nd. ed. New York, Holt Rinehart and Winston.
- BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio – Ciências da Natureza. Brasília: Ministério da Educação, 2000.
- BRASIL. Ministério de Educação. **A Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018. Disponível http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_-versaofinal_site.pdf Acesso em 06/09/2021
- COVOLAN, S.C.T. **O conceito de entropia num curso destinado ao Ensino Médio a partir das concepções prévias dos estudantes e da História da Ciência**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.
- ELENO, L. **Entropia social: uma termovisão de mundo**. Disponível em: <file:///C:/entropia-social-uma-termovisao-de-mundo.html> Acessado em: 07 Dez. 2012.
- GILBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.
- GOWIN, D. B. Educating. Ithaca, NY.: Cornell University Press, 1981. 210 p.
- GREGIO, N.O. **Termodinâmica, um Tutorial para Entendimento do Conceito de Entropia**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal São Carlos, São Carlos, 2016.
- LAMBERT, FRANK. Disorder – Cracked crutch for Supporting Entropy Discussions. **Journal of Chemical Education**. Vol. 49, nº. 2, Feb, 2002. P. 187 – 192.
- MAGOSSI, J. C.; PAVIOTTI, J. R. **Incerteza em Entropia**. Revista Brasileira de História da Ciência, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 84-96, jan | jun 2019.
- MOREIRA, H., CALEFFE, L. G.. **Metodologia da pesquisa para o professor pesquisador**. DP&A Editora, 2006.
- MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. **Teorias construtivistas**. Porto Alegre: UFRGS, 1999. (Textos de apoio ao professor de Física).
- MOREIRA, M. A. **Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa**. São Paulo: Centauro, 2010.
- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. São Paulo: Moraes, 1982.

- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 2. ed. São Paulo: Centauro, 2006.
- MOREIRA, M.A. **O que é afinal aprendizagem significativa?** Porto Alegre: Técnicos e Pedagógicos a Serem Considerados num Sistema de Educação. UFRGS, 2012. 27 p.
- MOREIRA, M.A. **Teorias de aprendizagem**. São Pulo: E.P.U., 2017.
- MOREIRA, M.A. **Teorias de aprendizagem**. São Pulo: E.P.U., 1999.
- MOURA, M. **Entropia Estatística e o Ensino da Segunda Lei da Termodinâmica**. Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2016.
- NUSSENVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Vol 2, 4º ed. Editora Edgar Blucher, 2002.
- OLIVEIRA, P.M.C.; DECHOUM, K. **Facilitando a compreensão da Segunda lei da Termodinâmica**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol 25, nº 4, Dezembro, 2003.
- OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio José de Holanda. **Teorias de Aprendizagem**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física, 2010. 40 p.
- PEREIRA JR., A. **Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição Boltzmaniana**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1997.
- PINEDA, J. O. C. A entropia segundo Claude Shannon: o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Pontificia Universidade Católica, São Paulo, 2006.
- PIRES, Antônio S. T. **Evolução das Ideias da Física**. 2ª Ed., Editora Livraria da Física, 2011 – São Paulo.
- QUADROS, S. **A termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**. 1ª ed. São Paulo: Scipione, 1996.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentos da Física**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2016.
- SANTOS, O.P. **O Ensino do Conceito de Entropia no Ensino Médio Utilizando como Recurso de Didático a História da Ciência**. Monografia - Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SANTOS, Z. T. S. **Uma perspectiva histórica e epistemológica para o ensino de entropia no ensino médio.** Ln: XI ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 2008, Curitiba.

SILVA, L. F. **Uma Proposta Metodológica para Inserção de Elementos de Estatística como Organizadores Prévios em Conceitos Básicos de Termodinâmica.** Dissertação (Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) – Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Polo Catalão, GO, 2020.

SPROVIERO. Entropia: "Progresso" para a Destruição! Entrevista com o Dr. Mario Bruno Sproviero. <http://hottopos.com/vdletras2/mario.htm>.

STYER, DANIEL F. Insight into Entropy. **American Journal of Physics**, ano 68, vol. 12, 2000. P. 1090 – 1096.

TIPLER, PAUL A. **Física 1.** Rio de Janeiro. LTC. 1976.

UFSCar. **Datas e Personagens na História da Termodinâmica – Prof. Dr. José Pedro Danoso.** Disponível em: https://www.ifsc.usp.br/~donoso/termodinamica/Historia_Termodinamica.pdf . Acesso em 05/09/2021

YOUNG, H.D; FREEDMAN. R.A. **Física II: Termodinâmica e ondas.** 12^a ed. São Paulo: Addison Wesley, 2003.

QUESTIONÁRIO PRÉ - TESTE

ESTE QUESTIONÁRIO TEM COMO OBJETIVO ENTENDER COMO VOCÊ PENSA CERTAS IDEIAS A RESPEITO DA FÍSICA TÉRMICA. ELE NÃO SERÁ USADO PARA AVALIAÇÃO. PROCURE RESPONDÊ-LO COM SUAS PALAVRAS. VOCÊ ESTARÁ NOS AJUDANDO A MELHORAR O ENSINO. MUITO OBRIGADO!

Turma: _____ **Data:** _____

14. O que você entende por temperatura? Dê exemplos.

15. Defina com suas próprias palavras o conceito de calor. Dê exemplos.-

- **Responda as questões 3, 4 e 5 escolhendo apenas uma das alternativas.**

16. Associamos a existência de calor:

- d) A qualquer corpo, pois todo corpo possui calor.
- e) Apenas àqueles corpos que se encontram “quentes”.
- f) As situações nas quais há, necessariamente, transferência de calor.

17. Se fornecermos calor a um recipiente contendo um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido, pode-se dizer que:

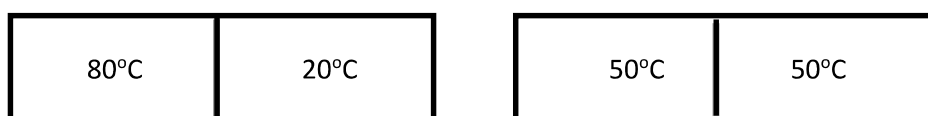
- d) A temperatura do conjunto gelo e líquido aumenta.
- e) A temperatura do conjunto gelo e líquido permanece constante a 0°C até que todo o gelo seja derretido.
- f) A temperatura do sistema diminui.

18. Quando dois corpos de tamanhos diferentes estão em contato e com a mesma temperatura, ambos isolados do meio ambiente, pode-se dizer que:

- d) O corpo maior é o mais quente.
- e) O corpo maior cede calor para o corpo menor.
- f) Não há troca de calor entre os corpos.

19. Duas barras de ferro: uma a 20°C e outra 70°C . Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.

-
20. Temos duas canecas de alumínio ligadas e isoladas do meio ambiente, uma com 1 litro de água a uma temperatura de 80°C e outra, também com 1 litro de água a uma temperatura de 20°C . Encostando uma na outra, verifica-se que após certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 50°C . Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 50°C , voltem às temperaturas que anteriormente eram de 80°C e 20°C ? Justifique.



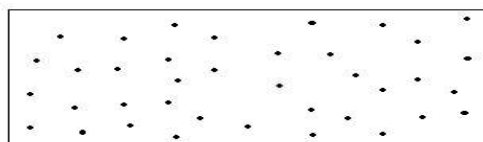
21. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de removida a separação.

Após um minuto.

-
22. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



-
23. Considere as seguintes situações:

- a) Sorvete derretendo;
- b) A coca-cola que fica choca;

- c) Uma vela que derrete;
- d) Um homem envelhecendo;
- e) Uma planta crescendo;
- f) Café esfriando na xícara.

A – Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis? _____

B – Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

C – Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?

24. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.

25. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dínamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.

26. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

d) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?

- e) Podemos dizer neste caso que a entropia do *sistema quarto* aumentou? Explique.

- f) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decurso de uma semana inteira? Justifique sua resposta.

Apêndice B: Questões pré e pós – lançamentos dos dados

QUESTÕES A SEREM RESPONDIDAS E DEBATIDAS COM OS ALUNOS NO DIA DA REALIZAÇÃO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Grupo: _____ Turma: _____ N° de alunos: _____ Data: _____

Questões pré-lançamentos

2- Um dado possui 6 faces com gravações em forma de pontos de 1 a 6. Sabe-se que todas as faces possuem a mesma chance de aparecer quando o dado é lançado. A partir dessas informações, responda:

c) Quais os possíveis resultados quando lançamos dois dados? Em sua resposta escreva em forma de pares ordenados, exemplo: (dado 1, dado 2)

d) Lançando simultaneamente esses 2 dados, qual a probabilidade de soma das faces obter:

I) 2? _____ II) 3? _____ III) 4? _____ IV) 5? _____ V) 6? _____

VI) 7? _____ VII) 8? _____ VIII) 9? _____ IX) 10? _____ X) 11? _____

XI) 12? _____

Questões pós-lançamentos

7- A partir dos valores obtidos nos lançamentos dos 2 dados, durante as 36 repetições, responda:

k) Os macroestados (as somas possíveis obtidas).

_____/_____/_____
_____/_____/_____
_____/_____/_____
_____/_____/_____

l) Os microestados (os pares ordenados de valores obtidos classificando-os por macroestado).

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

Macroestado Soma: _____ : _____

m) Qual somatória de faces ocorreu mais vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão nº**

n) Qual somatória de faces ocorreu menos vezes? Compare sua resposta com os resultados obtidos na **letra b da questão nº**

8- De posse da tabela de valores obtidos com os lançamentos dos 2 dados, indique:

e) As multiplicidades (o número de microestados para cada macroestado) e as respectivas entropias em unidade de 10^{-23} J/K.

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

Macroestado Soma: _____ Multiplicidade: _____ Entropia: _____

- f) O que se pode concluir dos resultados obtidos acima? Para isso, reveja os resultados obtidos na **letra b** da questão nº

- o) Organize esses resultados em uma segunda tabela fornecida posteriormente pelo professor, a qual organiza os resultados, em função da **multiplicidade**, **macroestado**, **microestado** e **entropia**.

- 9- Quantas vezes no mínimo deve se lançar um dado ou os dois para ter certeza que todos os eventos ocorram?

Apêndice C: Tabela 01

TABELA 01:

Experimento: Lançamento de dados **Grupo:** _____

Nº de integrantes: _____

36 Lançamentos de 2 dados simultâneos			
Nº de Lançamentos	Dado 01	Dado 02	Soma das Faces
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			

Apêndice D: Tabela 02

TABELA 02:

Experimento: Lançamento de dados

Grupo: _____

Nº de integrantes: _____

Somas Possíveis Para 02 Dados (MACROESTADO)	Pares Obtidos nos Lançamentos (MICROESTADO)	Nº de Soma Possíveis Para 02 Dados (MULTIPLICIDADE)	Probabilidade De Cada Macroestado	Probabilidade Teórica / Máxima	Entropia/k ($S/k = \ln W$) Boltzmann	Entropia em Função da Probabilidade ($S = -p \log p$) Shannon
2				$1/36 = 2,7\%$		
3				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
4				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
5				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
6				$5/36 = 13,8\%$		
7				$6/36 = 1/6 = 16,6\%$		
8				$5/36 = 13,8\%$		
9				$4/36 = 1/9 = 11,1\%$		
10				$3/36 = 1/12 = 8,3\%$		
11				$2/36 = 1/18 = 5,5\%$		
12				$1/36 = 2,7\%$		
Total de Lançamentos (Espaço amostral – Tabela 1)				36		

QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE

CARO ALUNO, AGORA QUE CHEGAMOS AO FINAL DESTA OFICINA, SOLICITO QUE VOCÊ RESPONDA AS QUESTÕES ABAIXO PARA VERIFICARMOS A CONTRIBUIÇÃO DA ESTRATÉGIA DIDÁTICA UTILIZADA PARA O ENSINO DA FÍSICA.

Turma: _____ **Data:** _____

13. É comum no dia a dia as pessoas tratarem os conceitos de calor e de temperatura como sendo iguais. Você concorda com isso? Justifique sua resposta, dizendo o porquê de tal afirmação.

- **Responda as questões 3, 4 e 5 escolhendo apenas uma das alternativas.**

14. Não é difícil em dias de alta temperatura, presenciarmos alguém fazendo a seguinte afirmação: “estou com calor” ou “eu tenho calor”. Conceitualmente falando em função de seus conhecimentos de física térmica, você concorda com tal afirmação? Justifique sua resposta a partir da definição de calor.

15. O que acontece com a temperatura de um bloco de gelo em processo de derretimento, ou seja, passando do estado sólido para o líquido (em fusão) quando fornecermos calor a ele.

16. Julgue a veracidade das seguinte proposição marcando V para verdade e F para falsa, a partir da análise da seguinte afirmação: *se dois corpos de tamanhos diferentes estiverem em contato e com a mesma temperatura, e ambos isolados do meio ambiente*, pode-se dizer que:

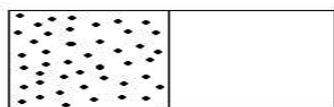
- () O corpo maior é o mais quente.
- () O corpo maior cede calor para o corpo menor.
- () Não há troca de calor entre os corpos.

17. Tem-se duas barras de alumínio: uma a 40°C e outra 60°C. Sabendo-se que elas foram colocadas em contato. O que se verifica após certo tempo? Explique.

-
18. Temos duas canecas de alumínio ligadas e isoladas do meio ambiente, uma com 2 litro de água a uma temperatura de 60°C e outra, também com 2 litro de água a uma temperatura de 30°C . Encostando uma na outra, verifica-se que após certo tempo, ambas encontram-se a uma temperatura média de 45°C . Você acredita que o processo inverso possa ocorrer espontaneamente, ou seja, que as massas de água, ambas agora a 45°C , voltem às temperaturas que anteriormente eram de 60°C e 30°C ? Justifique.



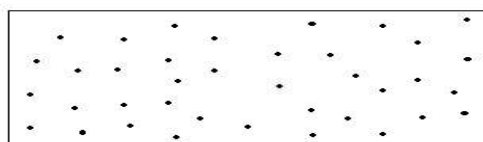
19. Na caixa abaixo, de um lado, há um gás e do outro foi retirado tudo que havia, produzindo vácuo. Se retirarmos a separação, o que irá acontecer com as moléculas do gás? Faça desenhos representativos nos espaços abaixo, mostrando como as partículas do gás estavam antes, imediatamente após termos removido a separação e depois de um minuto. Explique com suas palavras o que significam os seus desenhos.



Imediatamente depois de
removida a separação.

Após um minuto.

-
20. Considerando que as moléculas de um certo gás ocupam todo o volume da caixa abaixo, é possível que elas espontaneamente se concentrem todas de um único lado do recipiente como na situação descrita no item anterior? Explique.



-
21. Considere as seguintes situações:

- a)** Gelo derretendo; **b)** A refrigerante que fica choca; **c)** Uma vela que derrete;
d) Um homem envelhecendo; **e)** Uma planta crescendo; **f)** Leite esfriando na xícara.

A – Podemos afirmar que os exemplos acima citados, tratam de processos irreversíveis?

B – Das situações anteriormente descritas, quais representam fenômenos que podem ser revertidos através de uma ação? Qual tipo de ação? Explique.

C – Quais representam fenômenos totalmente irreversíveis?

22. Se, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, a energia total do Universo se conserva, explique porque o governo faz campanhas de racionamento.

23. Você acredita que seja possível usar a energia elétrica de um dínamo, gerada a partir da energia potencial gravitacional da queda d'água de um reservatório, para fazer funcionar uma bomba d'água, com o objetivo de recuperar esta água e devolver novamente para o reservatório, possibilitando dessa forma uma geração contínua de energia? É possível a existência de um dispositivo de geração de energia elétrica alto suficiente? Justifique sua resposta dizendo o porquê da mesma.

24. Seu quarto, hoje, passou por uma faxina geral: além de limpo, os objetos estão todos em seus devidos lugares. Levando-se em consideração que somente daqui a uma semana, ele será arrumado novamente, imagine-se tirando uma fotografia dele por dia, durante estes próximos sete dias.

d) O que você provavelmente irá notar ao final desses sete dias?

e) Podemos dizer neste caso que a entropia do *sistema quarto* aumentou? Explique.

f) Considerando que as modificações ocorridas em seu quarto, não foram abruptas, mas gradativas ao longo desses sete dias, é possível afirmar que a medida da entropia nos três primeiros dias foi menor que no decurso de uma semana inteira? Justifique sua resposta.

13. (UCS-2011) Um recente filme que no Brasil recebeu o nome de “O Curioso Caso de Benjamin Button”, protagonizado pelo ator Brad Pitt, conta a história curiosa de um personagem que nasce velho e, à medida que o tempo passa, vai rejuvenescendo. Se pensarmos no envelhecimento humano como um processo energeticamente irreversível, qual título alternativo do filme ficaria coerente com as leis da Física?

- f) A Curiosa Obediência à Equação de Clapeyron
- g) O Extraordinário Caso da Violação da Segunda Lei de Newton
- h) O Estranho Caso de Violação da Segunda Lei da Termodinâmica
- i) O Incomum Caso de Confirmação da Primeira Lei da Termodinâmica
- j) O Intrigante Caso de Violação da Terceira Lei de Newton