



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS – CCEA
CAMPUS VII – GOVERNADOR ANTÔNIO MARIZ
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS EXATAS

AS MULTIDEFINIÇÕES DO CONCEITO DE ENTROPIA: VISÃO
TERMODINÂMICA E ESTATÍSTICA

LUIZ RUFINO DE FRANÇA FILHO

PATOS – PARAÍBA
2012

LUIZ RUFINO DE FRANÇA FILHO

**AS MULTIDEFINIÇÕES DO CONCEITO DE ENTROPIA: VISÃO
TERMODINÂMICA E ESTATÍSTICA**

Monografia para obtenção do título de Graduado em
Licenciatura em Ciências Exatas com habilitação em
Física, apresentada à Universidade Estadual da
Paraíba.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos De Assis Junior

**PATOS – PARAÍBA
2012**

F814m FRANÇA FILHO, Luiz Rufino de.

As multidefinições do conceito de Entropia: visão
termodinâmica e estatística. / Luiz Rufino de França
Filho. Patos: UEPB. 2012.
62f

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso -
(TCC) - Universidade Estadual da Paraíba).
Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos de Assis Júnior.

1. Física 2. Ensino de Física
I. Título II. Assis Júnior, Pedro Carlos de.

CDD 530.7

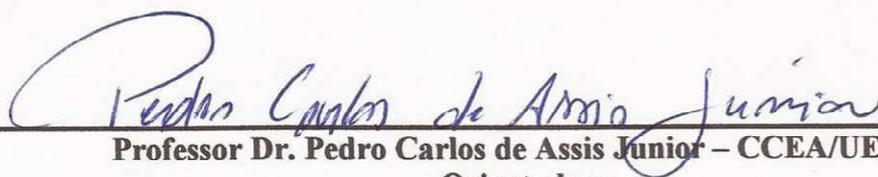
LUIZ RUFINO DE FRANÇA FILHO

**AS MULTIDEFINIÇÕES DO CONCEITO DE ENTROPIA: VISÃO
TERMODINÂMICA E ESTATÍSTICA**

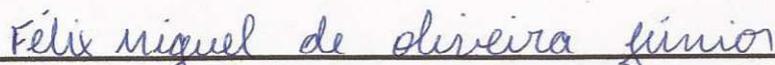
Monografia aprovada em 28/06/2012

Monografia para obtenção do título de
Graduado em Licenciatura em Ciências Exatas
com habilitação em Física, apresentada à
Universidade Estadual da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA

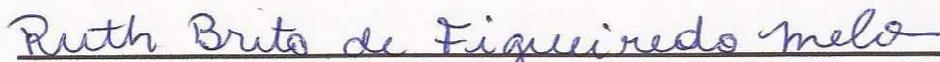

Professor Dr. Pedro Carlos de Assis Junior – CCEA/UEPB

Orientador



Professor Félix Miguel de Oliveira Junior – CCEA/UEPB

Examinador



Professora Msc. Ruth Brito de Figueiredo Melo – CCEA/UEPB

Examinador

PATOS – PARAÍBA

2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me permitir realizar todos os objetivos que até aqui alcancei.

A minha namorada Maria José de Brito Rocha, que a conheci no curso, e que me acompanha até os dias de hoje.

Aos meus queridos pais Luiz Rufino de França e Maria Soares da Silva de França, que me apoiaram fielmente.

A meus irmãos, em especial Adnilton (in memoriam), que me incentivou sempre.

Aos colegas da turma de Ciências Exatas que sempre estiveram lado a lado nas dificuldades durante esses quatro anos e meio.

A todos que compõe a UEPB.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado nas minhas dificuldades e sempre me confortando nos momentos difíceis.

A minha namorada, Maria, constantemente ao meu lado nessa jornada, junto comigo nos momentos de dificuldade, que me suporta até hoje. (TE AMO!!)

A todos os meus familiares, que sempre me deram força e incentivo.

Ao professor Pedro Carlos de Assis Júnior, pela grandiosa orientação deste trabalho, me incentivando a sempre buscar mais conhecimento.

A coordenação do curso de Ciências Exatas, em especial Aninha.

A todos os meus colegas da turma, em especial Joel, Alan Cabral, Mailson, Francivaldo, Francileudo, pela amizade e companheirismo.

A todos do quadro de professores e funcionários da UEPB, que trabalharam para o bom funcionamento do curso.

RESUMO

O conceito de Entropia está presente em vários ramos da ciência e foi primeiramente definido pelo engenheiro Sadi Carnot na revolução industrial, na busca por máquinas térmicas mais eficazes, daí então, sendo estudada por vários outros estudiosos. Neste trabalho realizamos uma investigação sobre como está sendo apresentado o conceito de entropia em alguns livros de Física do Ensino Médio e Superior, observando sua definição na íntegra. Fizemos uma abordagem critico-histórica da forma como está exposto nos livros didáticos. Observamos que este conceito é aplicado em outras áreas da ciência tornando-o classificado como de multidefinições. Apresentamos o conceito de entropia generalizada que viola o conceito de aditividade, um dos postulados da entropia, bem como o que é não extensividade na termodinâmica. Observamos a metodologia utilizada por alguns docentes das escolas abrangidas pela pesquisa. A metodologia desse trabalho inicia-se por pesquisas bibliográficas que abordam a história e o conceito de entropia. Citamos como fontes importantes da pesquisa: livros, artigos, periódicos, etc.. Num segundo momento, analisamos os livros de Física adotados pelas escolas pesquisadas, que em geral, são os mais usados em escolas públicas e universidades do estado da Paraíba, nos atentando em averiguar como tais bibliografias definem o conceito de entropia. Por conseguinte, fizemos uma pesquisa com professores e alunos do Ensino Médio de escolas públicas, onde foram feitas indagações sobre a definição do conceito de entropia, metodologia utilizada pelo professor em relação a esse conteúdo, e a aplicação em outras áreas do conhecimento. Vimos que os livros não dão respaldo suficiente a este conceito. Ao nível básico, o conceito de entropia é pouco discutido e até mesmo em alguns casos, não é nem mesmo mencionado. A pesquisa mostrou que a escolaridade dos professores está mudando, atualmente as escolas possuem em seu quadro de docentes mais professores com nível superior, o que torna preocupantes o fato deles possuírem pouca familiaridade com o conceito de entropia. Será que a formação das licenciaturas em Física está pecando na sua formação básica? Enfim, é necessário promover maior atenção sobre o conceito de entropia tanto no Ensino Médio quanto no Superior, como também discuti-lo mais profundamente. Diante desta problemática, torna-se importante conscientizar os professores para que se faça uma boa discussão sobre o tema, até mesmo promovendo minicursos para os mesmos com a intenção de mostrar a importância fundamental desse conceito.

PALAVRAS-CHAVE: Entropia, Conceito de entropia, Multidefinições e Ensino de Física.

ABSTRACT

The concept of entropy is present in many branches of science and was first defined by the engineer Sadi Carnot in the industrial revolution, in the search for more efficient thermal machines, then give been studied by several other scholars. In this study we conducted an investigation into how it is being presented the concept of entropy in some books of the Physics of the Higher Education and High School, noting its definition in its entirety. We did a critic historic approach as it stands exposed in the textbooks. We observed that this concept is applied in other areas of science making it classified as lot definitions. We presented the concept of generalized entropy that violates the concept of additivity, one of the postulates of Entropy, as well as what is not in thermodynamic extensivity. We observed the methodology used by some teachers of the schools covered by the survey. The methodology of this work begins with research literature that addressed the history and concept of entropy. Mentioned as important sources of research: books, articles, journals, etc.. Secondly, we analyze the physics books adopted by the schools surveyed, that in general are most commonly used in public schools and universities in the state of Paraiba, in paying attention to ascertain how such bibliographies define the concept of entropy. Consequently, we did a survey of teachers and high school students from public schools, where inquiries were made about the definition of entropy, the methodology used by the teacher in relation to this content and application in other areas of knowledge. We saw that the books do not give sufficient support to this concept. At the basic level, the concept of entropy is rarely discussed and maybe not even mentioned. Research has shown that the education of teachers is changing; now the schools have on your table teachers more teachers with higher education, which makes the worrying fact that they have little familiarity with the concept of entropy. Does the undergraduate training in Physics is sinning in your basic training? Ultimately, it is necessary to promote greater attention to the concept of entropy as in the High School as in the Higher Education, as well as discuss it further. Before this problem, become important awareness the teachers for doing a good discussion on the topic, even for short courses promoting them with the intention of showing the fundamental importance of this concept.

KEYWORDS: Entropy. Concept of entropy. Lot definitions. Physics teaching.

SUMÁRIO

LISTA DE GRÁFICOS	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE QUADROS	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ENTROPIA NA TERMODINÂMICA EXTENSIVA E NÃO EXTENSIVA	5
2.1 Entropia na Termodinâmica Extensiva.....	5
2.1.1 Postulados	5
2.1.2 Ciclo de Carnot	6
2.1.3 Relação entre a entropia e os processos reversíveis	7
2.1.4 Relação entre a entropia e os processos irreversíveis.....	9
2.1.5 A segunda lei da termodinâmica e a entropia	13
2.1.5.1 Compressão livre.....	14
2.1.5.2 O enunciado de Kelvin-Planck para a segunda lei.....	14
2.1.5.3 O enunciado de Clausius para a segunda lei.....	14
2.1.6 Entropia e a desordem	15
2.1.7 Visão microscópica da entropia	16
2.1.8 Definição microscópica da entropia	18
2.1.9 Entropia e a seta do tempo	20
2.2 A entropia na termodinâmica não extensiva ou generalizada	20
3 A ENTROPIA E SEU USO EM OUTRAS ÁREAS DA CIÊNCIA	22
3.1 Teorias da informação e a entropia	22
3.2 Degradação do meio ambiente.....	22
3.3 A influencia da entropia na economia	23
3.4 A entropia dos buracos negros segundo Hawking e o universo.....	24
4 METODOLOGIA	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 Análise Bibliográfica de alguns livros de Ensino Médio e Superior.....	27
5.1.1 O conceito de entropia nos LEM.....	27
5.1.2 O conceito de entropia nos LES.....	29
5.2 Classificação dos livros analisados em termos de classe	32
5.3 Resultado da pesquisa com alunos e professores de escolas públicas.....	34
5.4 Discussão.....	37

6 CONCLUSÃO	39
7 REFERENCIAS	40
ANEXOS	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Escolaridade dos professores	34
Gráfico 2. Definição do conceito de entropia por parte dos alunos.....	35
Gráfico 3. Alunos que mencionam o uso do conceito de entropia em outras áreas da ciência	35
Gráfico 4. Atualização das bibliografias utilizadas nas escolas	36
Gráfico 5. Forma da definição do conceito de entropia nos livros utilizados	36
Gráfico 6. Uso de livros complementares pelos professores.....	37

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação do Ciclo de Carnot.....	6
Figura 2a. Processo cíclico de um gás ideal.....	8
Figura 2b. Série de ciclos de Carnot.....	8
Figura 2c. Dois caminhos do ponto a ao ponto b.....	8
Figura 3a. Blocos separados.....	11
Figura 3b. Blocos em contato.....	11
Figura 4. Seis moléculas de um gás em uma caixa isolada.....	16
Figura 5. Gráfico do número de microestados.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Seis moléculas em uma caixa.....	18
Tabela 2. Entropia em cada configuração	19

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Conceito de entropia em termos de classes.....	32
Quadro 2. Distribuição dos autores de acordo com as classes	33

1 INTRODUÇÃO

Como qualquer outra ciência, a termodinâmica não nasceu atemporal. Suas raízes mais profundas são encontradas em trabalho de Euler (1753), Black (1757), Lambert (1779) e Lavoisier (1784). No começo do século XIX tem-se Biot (1804), Fourier (1808/22) e Laplace (1816/22). Entretanto o trabalho de Sadi Carnot [1], em 1824, pode ser considerado o marco inicial da termodinâmica. A partir de então a teoria recebeu várias contribuições, algumas vezes erráticas [2], sendo modificada entre 1850 e 1854 através da fundamental substituição da teoria calórica pelo conceito de que calor e trabalho são uniformes e universalmente interconvertíveis, conforme experimentalmente demonstrado por Joule em 1847. Costuma-se denominar termodinâmica clássica à teoria que Rudolf Clausius, Lord Kelvin e Rankine edificaram entre 1850 e 1854, acrescida de trabalhos publicados posteriormente, especialmente por Clausius em 1862 na sua famosa equação de desigualdade ($\Delta S \geq 0$), onde S é conhecido como entropia do sistema.

O termo entropia apareceu pela primeira vez na literatura, por volta de 1865, na Alemanha, proposto por Rudolf Clausius para representar uma medida da energia num sistema termodinâmico como função das transferências de calor e da temperatura. Para a formulação deste conceito, Clausius, baseou-se no trabalho desenvolvido por Sadi Carnot e Lord Kelvin na teoria do engenho a vapor. Descreveu a fração de calor que se pode transformar em energia mecânica por energia livre e a perda de energia (energia que não pode ser transformada em trabalho útil) por meio de um novo termo: entropia, que tem origem na palavra grega entropien que significa degradação. Neste período, foi construída com a ajuda de outros físicos a ciência que hoje conhecemos como termodinâmica clássica. A termodinâmica tem como objetivo o estudo de grandezas macroscópicas e das relações entre si, sem referência à estrutura microscópica subjacente. A entropia foi interpretada na termodinâmica como sendo a medida da irreversibilidade dos processos físicos. Outra consequência imediata é que a entropia é considerada como sendo um parâmetro macroscópico do sistema nessa época.

Durante o século XIX, uma minoria de físicos sustentava a ideia de que o calor é um movimento aleatório coletivo de muitos milhões de átomos. Quanto maior é a temperatura, mais vigoroso é o movimento atômico. Assim, a temperatura surge como uma medida da energia média de movimento dos átomos num objeto. O físico Ludwig Boltzmann (1844 - 1906) interpretou a entropia como uma desordem no nível atômico. A termodinâmica foi assim modernizada, adquirindo um novo brilho ao ser relacionado ao mundo microscópico

que começava a atrair a atenção científica no começo do século XX. O termo entropia surge com o significado de degradação de energia e relaciona os movimentos e colisões de partículas, ficando assim indissociavelmente ligada à desordem. A primeira interpretação estatística da entropia é hoje considerada a pedra fundamental da mecânica estatística. Ela é representada matematicamente pela equação de Boltzmann – Gibbs. A entropia ganha assim outra forma de interpretação, mas isto é só o começo de uma diversidade de interpretações existente até a atualidade.

Dado o grande sucesso alcançado pela interpretação de sistemas físicos determinísticos ou não, a entropia passou a ser paradigma metodológico para outras esferas do conhecimento, tais como a filosofia, a biologia, a economia, a teoria de informação (computação), o meio ambiente entre outras mais. Cada uma dessas ciências busca suas próprias versões particulares, partindo da premissa de que existem modelos físicos subjacentes à realidade física. Na economia a entropia é analisada como sendo a medida de informação e incerteza na modelação econômica. Diversos artigos foram publicados nesta área [3-4]. É possível relacionar o conceito de entropia na economia com a produção de energia. A entropia também é proposta como sendo a métrica para avaliação ergonômica de algumas empresas [5]. Outra interpretação esta associada ao desenvolvimento social. Outra poderia relacionar-se com o conceito de sustentabilidade. Já, o Claude Shannon [6], o conceito de entropia surge no contexto da Teoria de Informação ligado à necessidade de codificar uma mensagem para ser transmitida através de um canal de informação com a menor probabilidade de erro possível. O Brillouin [7] deduz a fórmula de Shannon para a quantidade de informação contida numa mensagem.

A entropia como podemos perceber possui diversas interpretações até o momento. Num nível mais avançado do conhecimento o conceito de entropia esta relacionada com a não extensividade dos sistemas físicos. Em 1988, o físico Constantino Tsallis [8] propõe um novo conceito para a entropia, “Entropia generalizada”, conhecida também como entropia não extensiva. A ideia geral da não extensividade esta relacionada com a quebra da aditividade (um dos axiomas da termodinâmica usual) dos sistemas físicos. A entropia generalizada também quebra o conceito termodinâmico de sistema isolado. A presença de características não extensivas é comum em sistemas astrofísicos, sistemas magnéticos e sistemas que apresentam evolução temporal da entropia [9-10]. No geral, ela é bastante usada em sistemas físicos de longo alcance e com memória. No momento, tem sido motivos de estudos de muitos cientistas da atualidade. A entropia também é usada para definir a energia dos buracos negros. Esta entropia é conhecida como entropia de Hawking [11].

Toda essa diversidade de interpretações mostra o tão abrangente se tornou este termo, que nos leva a refletir cada vez mais sobre seus conceitos. Alguns pesquisadores consideram que para obtermos uma boa aprendizagem exige também a criação de um ambiente de aprendizagem, em que os alunos manipulem objetos e negociem ideias entre si e os professores, criando um ambiente construtivista de aprendizagem [12], onde professores e alunos interajam entre si proporcionando assim uma boa aprendizagem. Seguindo esta ideia quanto mais refletimos sobre o conceito de entropia (professores e alunos) mais comum ele será para nós. Assim, podemos acabar com a ideia de que os princípios da termodinâmica são difíceis. A motivação também contribui para diminuir a evasão escolar, principalmente na área de ciências exatas. É importante destacar que a área das ciências exatas e da natureza deverá ser vista pelo aluno como um conhecimento que pode favorecer o desenvolvimento do seu raciocínio, de sua sensibilidade expressiva, de sua sensibilidade estética e de sua imaginação [13].

O conceito de entropia, a nível médio e superior, ainda é estudado de forma muito pouco discutida no ambiente didatizado. É quase sempre visto em um conjunto com outros conceitos da termodinâmica, em muitos trabalhos de pesquisas na área de educação em ciências físicas, história da ciência e outros. Neste trabalho, queremos promover a divulgação do conceito de entropia tanto ao nível médio quanto superior, bem como, suas aplicações em outras áreas do conhecimento trabalhando assim a multidisciplinaridade. Este trabalho enriquecerá a formação de nossos futuros profissionais do ensino e que possamos incentivá-los nas pesquisas científicas teóricas ou na história das ciências. É importante estudar a história das ciências para entendermos como se deu sua evolução, desde os primórdios até os dias atuais.

Neste trabalho temos por objetivos: realizar uma investigação sobre como está sendo apresentado o conceito de entropia em alguns livros de Física do Ensino Médio e Superior, observando sua definição na íntegra; fazer uma abordagem critico-pedagógica da forma como está exposto o conceito de entropia nos livros didáticos; observar que este conceito é aplicado em outras áreas da ciência tornando-o classificado como de multidefinições; fazer uma apresentação do conceito de entropia generalizada que viola o conceito de aditividade, um dos postulados da Entropia, bem como o que é não extensividade na termodinâmica; observar a metodologia utilizada por alguns docentes de escolas públicas do estado da Paraíba.

Nesta monografia, iniciamos, mostrando os vários conceitos da entropia na termodinâmica extensiva, dando a definição de seus postulados, como a entropia se comporta

em um processo cíclico, sua relação com a segunda lei da termodinâmica. Mostramos também a definição microscópica da entropia, onde os microestados definem seu macroestado, apresentamos a equação estatística de Boltzmann para o cálculo da entropia a nível microscópico. Definiremos também o conceito da entropia na termodinâmica não extensiva. Dando continuidade, procuramos mostrar outras áreas da ciência que se beneficiam dos conceitos da entropia para explicarem seus fenômenos. Seguindo o trabalho, expomos a metodologia utilizada para desenvolver esta monografia. No ponto seguinte, são apresentados os resultados e discussões, no qual analisamos alguns livros de Ensino Médio e Superior para averiguar as definições do conceito de entropia por eles apresentadas, e os classificamos em classes, e também mostramos os resultados de uma pesquisa feita com alunos e professores de escolas públicas do estado da Paraíba e fizemos uma discussão sobre o que foi exposto e por fim, apresentamos as conclusões e perspectivas finais.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA ENTROPIA NA TERMODINÂMICA EXTENSIVA E NÃO EXTENSIVA

2.1 Entropia na Termodinâmica Extensiva

2.1.1 Postulados

Existe um problema simples, delimitado da termodinâmica, que consiste na determinação do estado de equilíbrio que eventualmente resulta após a remoção de vínculos internos em um sistema fechado e composto. Para resolver esse problema básico foram formulados os postulados da termodinâmica [14]. Esses postulados são sugestões mais naturais e simples para dar solução concebível a esse problema.

POSTULADO I: existem estados particulares, chamados estados de equilíbrio, de sistemas simples que, macroscopicamente, são caracterizados completamente pela energia interna U , o volume V , e os números de moles N_1, N_2, \dots, N_r das componentes químicas.

POSTULADO II: existe uma função chamada entropia S dos parâmetros extensivos de algum sistema composto, definido para todos os estados de equilíbrio e possuindo a seguinte propriedade: os valores assumidos pelos parâmetros extensivos na ausência de um vínculo interno são aqueles que maximizam a entropia sobre a variedade (superfície) de estados de equilíbrio vinculados.

$$S = S(U, V, N_1, \dots, N_r) \quad (1)$$

POSTULADO III: a entropia de um sistema composto é aditiva sobre os subsistemas constituintes.

$$S(U_1, V_1, N_1; U_2, V_2, N_2) = S_1(U_1, V_1, N_1) + S_2(U_2, V_2, N_2) \quad (2)$$

A entropia é contínua e diferenciável e é uma função monotonicamente crescente da energia.

$$\left. \frac{\partial S}{\partial U} \right|_{V, N} > 0 \quad (3)$$

POSTULADO IV: a entropia de qualquer sistema anula-se no estado para o qual

$$\frac{\partial S}{\partial U}_{V, N_1, \dots, N_r} = 0 \quad (4)$$

Por tanto, o quarto postulado diz que quando a temperatura é igual à zero, a entropia também será igual à zero.

2.1.2 Ciclo de Carnot

A palavra entropia foi introduzida por Clausius no ano de 1865, derivada da palavra grega entropien que significa degradação, era encarada como a medida de “potência de transformação” ou “capacidade de transformação” de um corpo [15-16].

A conversão de trabalho em energia é um processo irreversível; a máquina térmica tem como objetivo obter uma reversão parcial desse processo, ou seja, aproveitar ao máximo o calor e transformá-lo em trabalho para que se tenha a maior eficiência possível. Para que se obtenha uma máxima eficiência, devemos evitar todo o processo irreversível. Essa exigência é suficiente para determinarmos as etapas do ciclo de Carnot.

Então podemos entender que o ciclo de Carnot é um processo cíclico e reversível que utiliza um gás perfeito, que consta de duas transformações isotérmicas e duas adiabáticas, como mostra a figura 1 a baixo.

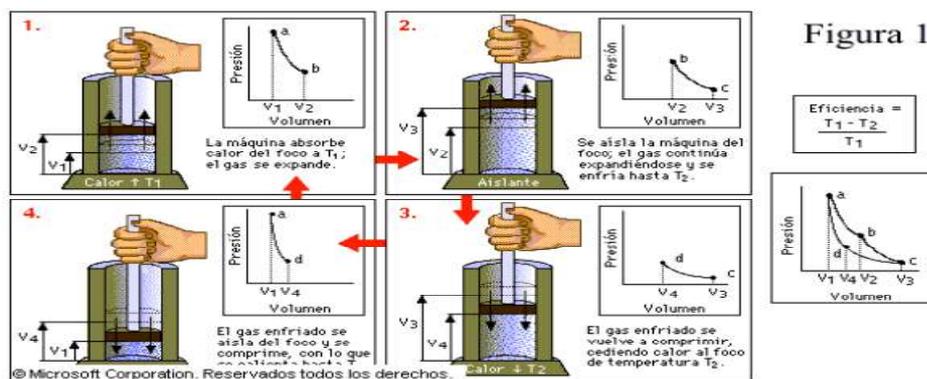


Figura 1. Representação do Ciclo de Carnot que caracteriza um processo cíclico reversível.

Pode-se observar que a variação de entropia numa máquina de Carnot específica que usa gás ideal, é igual a zero.

Na perspectiva clássica de Clausius, da termodinâmica das máquinas térmicas, a entropia era definida como sendo [15-17]:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (5)$$

2.1.3 Relação entre a entropia e os processos reversíveis

A lei zero da termodinâmica tem relação com o conceito de temperatura T e a primeira lei é relacionada com o conceito de energia interna U . Mostraremos mais adiante que a segunda lei está relacionada com a entropia.

Consideremos inicialmente um ciclo de Carnot. Para este ciclo podemos escrever a seguinte equação [15-16]:

$$\frac{|Q_A|}{T_A} = \frac{|Q_B|}{T_B} \quad (6)$$

Deixemos agora a notação de valor absoluto, uma vez que Q_A e Q_B tem sinais opostos, seja quando o ciclo de Carnot é percorrido no sentido horário, como uma máquina, ou no sentido anti-horário, como um refrigerador. Assim podemos escrever a equação (6) da seguinte maneira:

$$\frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B} = 0 \quad (7)$$

Vemos que esta equação estabelece que a soma Q/T para o ciclo de Carnot é sempre nula.

Generalizamos então a equação (7) para qualquer ciclo reversível. Para chegar a essa generalização, tem-se que substituir o ciclo reversível por um conjunto de ciclos de Carnot. Observando a figura 2a, podemos ver que mostra um ciclo reversível arbitrário superposto a uma família de isotermas. Daí, podemos fazer uma aproximação ao ciclo real ligando as isotermas por segmentos de adiabáticas escolhidas apropriadamente, para que se forme um conjunto de ciclos de Carnot, como mostra a figura 2b. Podemos ficar convencidos de que o percurso dos ciclos individuais é equivalente, em termos de calor transferido e trabalho realizado, ao percurso da linha quebrada formada pelos segmentos de isotermas e adiabáticas, que constitui uma aproximação do ciclo de Carnot. Isto é uma afirmação verdadeira, porque o ciclo de Carnot adjacente possui uma isoterma comum que é percorrida em sentidos contrários um do outro e isso acaba resultando no cancelamento do calor que é transferido e do trabalho realizado na área de superposição. Pondo intervalos de temperatura suficientemente pequenos entre as isotermas da figura 2b, pode ser feita uma aproximação ao ciclo real pela sequencia de isotermas e adiabáticas tão boas quanto desejarmos.

Escrevemos, então, para sequencia de linhas isotérmicas e adiabáticas da figura 2b, a seguinte relação,

$$\sum \frac{Q}{T} = 0 \quad (8)$$

ou, no limite de diferenças de temperaturas infinitesimais entre as isotermas podemos escrever, a integral do ciclo completo, que começa e termina no mesmo ponto arbitrário, e a relação torna-se,

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (9)$$

E, a partir da relação da equação (5), a equação (9) torna-se,

$$\oint dS = 0 \quad (10)$$

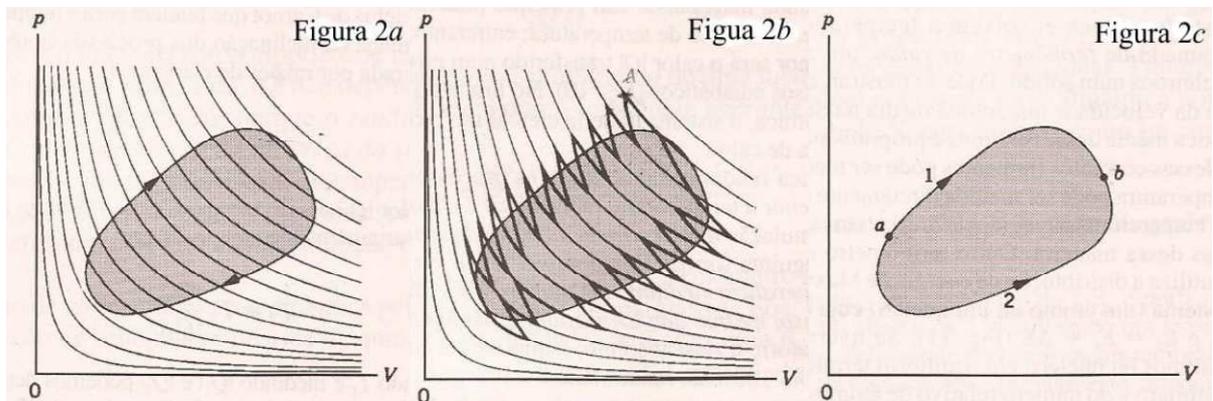


Figura 2a: Processo cíclico de um gás ideal; **Figura 2b:** Aproximando o caminho do processo cíclico por uma série de ciclos de Carnot; **Figura 2c:** Dois caminhos do ponto a ao ponto b: a variação de entropia é a mesma em ambos os caminhos.

Segundo Halliday (1996), variáveis de estado são aquelas que não dependem do modo pelo qual o estado do sistema foi atingido, e sim dependente das coordenadas do ponto, tendo assim um valor exclusivamente do estado do sistema. Alguns exemplos de variáveis de estado são a energia interna U , a pressão P e a temperatura T . O calor Q e o trabalho W não são variáveis de estado, porque dependem da maneira em que foi atingido o estado do sistema; sabemos que, em geral, $\oint dQ \neq 0$ e $\oint dW \neq 0$, como se pode mostrar facilmente para o caso especial do ciclo de Carnot.

A propriedade de uma variável de estado dada por $\oint dX = 0$ pode também ser expressa dizendo-se que $\int dX$ (entre dois estados de equilíbrio quaisquer) tem o mesmo valor para todos os caminhos reversíveis que unem aqueles estados. Vamos mostrar para a entropia, que é também, uma variável de estado. Podemos escrever a equação (10) e observando a figura 2c, como:

$$\int_a^b dS + \int_b^a dS = 0 \quad (11)$$

sendo a e b pontos arbitrários, a primeira integral descreve o primeiro caminho e a segunda integral descreve o segundo caminho, os quais unem estes pontos. Sendo o ciclo reversível, podemos percorrer o segundo caminho no sentido oposto, ou seja, de a para b, e não de b para a, e então podemos reescrever a equação (11) da seguinte forma:

$$\int_a^b dS - \int_a^b dS = 0 \quad (12)$$

ou

$$\int_a^b dS = \int_b^a dS \quad (13)$$

Como a ordem dos limites da segunda integral da equação (12) foi mudada, então, faz-se também a mudança de sinal. A integral da equação (14) mostra que o primeiro e segundo caminhos são trajetos arbitrários, portanto, a e b, são independentes do trajeto que os unem.

A variação da entropia entre dois estados quaisquer i e f é, então,

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (14)$$

onde a integral pode ser calculada em qualquer caminho reversível que unam os dois estados.

2.1.4 Relação entre a entropia e os processos irreversíveis

A equação (14) mostra o cálculo da variação de entropia num processo reversível. Mas, na natureza, não há processos que sejam totalmente reversíveis. Como por exemplo, atrito e transferências de calor não desejadas estão sempre presentes e raramente podemos executar processos reais em processos infinitesimais. Todo processo termodinâmico, até certo grau, é irreversível.

Como sabemos que a entropia é uma variável de estado, podemos recorrer a esse fato para calcular a variação de entropia num processo reversível. A diferença de entropia entre os estados inicial e final independe do caminho escolhido para ir de i a f.

Independentemente de a natureza ter escolhido trajeto irreversível para o processo real entre i e f , podemos escolher qualquer caminho reversível que seja conveniente para calcular a mudança de entropia.

Então, para determinar a mudança de entropia num caminho irreversível entre dois estados de equilíbrio, devemos encontrar um processo reversível que unem estes dois estados e assim, fazendo o cálculo da variação de entropia, e, para fazer isso, utilizamos a equação (14).

Analisemos dois exemplos [15].

1. Expansão livre. Suponha que um gás ideal dobre seu volume, dilatando-se em um espaço vazio. $W = 0$, porque nenhum trabalho é feito contra o vácuo, como o gás está confinado em um recipiente isolado, também $Q = 0$. Concluimos, então, da primeira lei, que $\Delta U = 0$. A energia interna de um gás ideal depende apenas da temperatura, portanto, $T_i = T_f$.

A expansão livre é com certeza irreversível porque perdemos controle do sistema assim que abrimos a válvula que separa os dois compartimentos. Há uma diferença de entropia entre os estados inicial e final, mas não podemos calculá-la pela equação (14), que se aplica somente a processos reversíveis. É certo que a equação (14), não pode ser usada diretamente porque a temperatura não é definida nos estados de não equilíbrio intermediários, através dos quais o sistema envolve quando o gás começa a fluir. Além disso $Q = 0$, o que apresenta uma dificuldade adicional para usar a equação (14).

Para encontrarmos a mudança de entropia, escolhemos um caminho reversível de i a f para que seja possível conseguir realizar o cálculo. Uma escolha propícia seria uma dilatação isotérmica que levasse o gás do mesmo ponto inicial (P_i, V_i, T_i). A expansão isotérmica representa um processo muito diferente da expansão livre, mas une os dois estados de equilíbrio. Então, da equação (14), obtemos a seguinte relação:

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T} = \frac{Q}{T} = -\frac{W}{T} \quad (15)$$

onde o último passo é justificado, porque sabemos que num processo isotérmico $\Delta U = 0$ e, portanto, $-W = Q$. Sabendo que

$$W = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (16)$$

agora substituindo W na equação (15), temos que

$$\Delta S = -\frac{W}{T} = nR \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (17)$$

$$\Delta S = nR \ln 2 \quad (18)$$

Esta é a variação de entropia para uma expansão livre irreversível; observe que ΔS é positiva para o sistema.

Como não há transferência de energia para a vizinhança, na expansão livre a mudança de entropia da vizinhança é nula. Portanto, a entropia total do sistema + vizinhança cresce durante a expansão livre.

2. Transferência de calor irreversível. Temos na figura 3a dois blocos, cujas temperaturas iniciais são T_1 e T_2 . Para simplificar suponhamos que os dois blocos têm massa m e calor específico c . Removemos a parede isolante que separa os blocos e os colocamos em contato térmico, como mostra a figura 3b. Ambos atingirão a temperatura de equilíbrio T_e . Como a expansão livre, é um processo irreversível, porque perdemos o controle do processo assim que pomos os blocos em contato térmico.

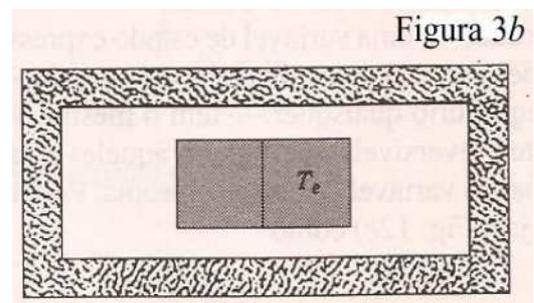
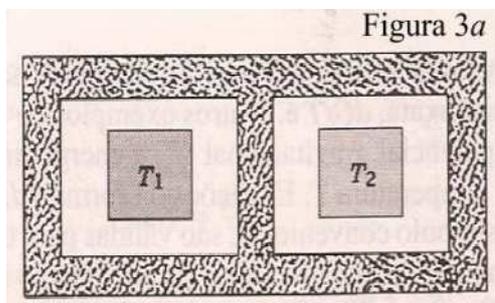


Figura 3a: Blocos separados com temperaturas iniciais T_1 e T_2 ; **Figura 3b:** Blocos em contato atingindo a temperatura de equilíbrio T_e .

Para encontrar ΔS nesse processo irreversível, temos que escolher novamente um trajeto reversível que nos leve ao estado final. Vamos considerar o bloco 1 à temperatura inicial T_1 , sendo ela a temperatura inicial mais baixa. Imagine uma série de reservatórios a temperatura $T_1, T_1 + dT, T_1 + 2dT, \dots, T_e - dT, T_e$. Iniciamos colocando o bloco 1 em contato com o primeiro reservatório, e o movemos passo a passo ao longo da sequência de reservatórios. Em cada passo uma quantidade infinitesimal dQ entra no bloco. E com certeza o processo será reversível, porque em qualquer passo podemos mover o bloco para o passo anterior e a mesma quantidade de calor é cedida do bloco para o reservatório. Cada troca

reversível de calor dQ pode ser expressa como $mc dT$, e então podemos usar a equação (14) para calcular a mudança de entropia do bloco 1:

$$\Delta S_1 = \int_i^f \frac{dQ}{T} = mc \int_{T_1}^{T_e} \frac{dT}{T} \quad (19)$$

então, a equação (19) torna-se:

$$\Delta S_1 = mc \ln \frac{T_e}{T_1} \quad (20)$$

Pode-se fazer o mesmo para o bloco 2, considerando T_2 e T_e as temperaturas entre o bloco e a série de reservatórios. Então, para o bloco 2:

$$\Delta S_2 = mc \int_{T_2}^{T_e} \frac{dT}{T} \quad (21)$$

onde dessa relação obtemos:

$$\Delta S_2 = mc \ln \frac{T_e}{T_2} \quad (22)$$

A variação total de entropia é

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = mc \ln \frac{T_e^2}{T_1 T_2} \quad (23)$$

Se T_1 for inferior, então $\Delta S_1 > 0$ e $\Delta S_2 < 0$. Para mostrar que a mudança de entropia total ΔS é sempre positiva, para isso, precisamos mostrar que $T_e^2 / T_1 T_2 > 1$. Antes temos que determinar a temperatura de equilíbrio, fazendo com que o calor total transferido seja nulo:

$$Q_1 + Q_2 = mc T_e - T_1 + mc T_e - T_2 = 0 \quad (24)$$

ou seja, $T_e = (T_1 + T_2) / 2$. Podemos escrever a quantidade $T_e^2 / T_1 T_2$ como

$$\frac{T_e^2}{T_1 T_2} = \frac{(T_1 + T_2)^2}{4 T_1 T_2} = \frac{4 T_1 T_2 + T_1 - T_2^2}{4 T_1 T_2} = 1 + \frac{T_1 - T_2^2}{4 T_1 T_2} \quad (25)$$

Observamos que esta quantidade é maior que um, sendo o último termo positivo. Logo o logaritmo na equação (23) é positivo e a variação da entropia é também positiva.

Ao colocar os dois blocos em contato, não haverá modificação na vizinhança e $\Delta S = 0$ para a vizinhança e a entropia total do sistema + vizinhança cresce, sendo assim, uma transferência irreversível de calor. Portanto, todo processo irreversível envolve, um aumento de entropia [16].

2.1.5 A segunda lei da termodinâmica e a entropia

Vimos anteriormente que nos processos reversíveis, a entropia permanece sem nenhuma alteração.

E nos processos irreversíveis, que são todos os processos naturais, a entropia geral do sistema + vizinhança deve aumentar. Pode ser que a entropia do sistema tenha uma diminuição, mas sua vizinhança sofre sempre um aumento de maior magnitude, de uma maneira que a variação total da entropia seja sempre positiva. Nenhum processo natural resulta numa diminuição da entropia total do sistema + vizinhança.

Podemos agora, dar um conceito à segunda lei em sua forma mais geral em termos de entropia [15-18] (1996; 2009),

Quando ocorre mudança de um estado de equilíbrio para outro em um processo termodinâmico, a entropia do sistema + vizinhança tende a permanecer constante ou aumentar.

Então, de acordo com este enunciado para a segunda lei, há a existência e utilidade de uma nova variável termodinâmica, ou seja, a entropia.

Quando todas as variações de entropia que ocorrem em um processo natural são somadas, a entropia aumenta ou permanece constante, ou seja, não existe nenhum processo natural com diminuição de entropia quando todas as variações de entropia estão envolvidas.

O aumento de entropia em todo processo irreversível natural mede o aumento da desordem e do caos no universo associado a esse processo.

Imaginemos a água quente e a água fria enquanto reservatórios quente e frio. Ao retirarmos calor da água quente e fornecer a água, obteremos certa quantidade de trabalho, mas quando as águas se misturam e atinge o equilíbrio térmico, a ocasião de se obter trabalho é perdida, porque não podemos mais separá-las. O que na realidade foi perdido é a disponibilidade, ou seja, a ocasião da conversão de calor em trabalho mecânico, não havendo assim nenhuma diminuição de energia. Portanto, quando a entropia aumenta, a energia para

produção de trabalho se torna menos disponível e o universo se torna mais caótico ou aleatório.

2.1.5.1 Compressão livre

Observando a figura 4 (p. 23), imaginemos que existe uma parede que separa os dois lados da caixa e para realizar uma expansão livre de um gás removemos esta parede. As moléculas que se moviam na parte direita da caixa, não encontrando nenhum obstáculo, espalhando-se pelo espaço inicialmente vazio e, por fim, colidem com a parede mais distante. Nesse processo, nem todas as moléculas retornam a outra metade, porque colidem uma com as outras, essas colisões tornam o movimento aleatório, havendo a possibilidade de retornarem ou não a sua posição inicial, preenchendo toda a caixa [18].

E há também a possibilidade de em um momento posterior, encontrar todas as moléculas em um único lado da caixa. Damos o nome a este processo de compressão livre, que é o que ocorre inversamente a expansão livre. Na compressão livre, em que $V_f < V_i$, pela equação (20), resultaria numa variação negativa de entropia do sistema, enquanto que a da vizinhança não se altera. Então, a segunda lei em termos de entropia veta a compressão livre.

2.1.5.2 O enunciado de Kelvin-Planck para a segunda lei

Nos processos cíclicos, a variação de entropia do sistema deve ser nula num ciclo completo de operação. Numa máquina perfeita, na qual há a conversão total de calor em trabalho, a vizinhança libera calor Q à temperatura T , resultando numa variação de entropia Q/T , que é negativa. Numa máquina perfeita a variação total de entropia do sistema + vizinhança seria negativa, e, a existência de uma máquina perfeita violaria o conceito da segunda lei em termos de entropia [15].

2.1.5.3 O enunciado de Clausius para a segunda lei

Assim como numa máquina perfeita, em um refrigerador perfeito, a entropia não muda num ciclo completo, mas a vizinhança libera calor $-Q$ a uma temperatura T_B e absorve o calor Q à temperatura T_A . Portanto, a variação total de entropia da vizinhança [16-18] é,

$$\Delta S = Q \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) \quad (26)$$

Como $T_A > T_B$, a variação de entropia é negativa, ou seja, um refrigerador perfeito também violaria o enunciado da segunda lei em termos de entropia.

2.1.6 Entropia e a desordem

Segundo Young & Freedman (2008), a entropia fornece uma previsão quantitativa da desordem. Dá-se uma ideia de medida da quantidade da desordem de um sistema físico. Para entendermos melhor, vamos considerar uma expansão isotérmica de um gás ideal. Adicionamos uma quantidade de calor dQ e deixamos o gás expandir-se apenas enquanto sua temperatura permanecer constante. Sabe-se que a energia interna de um gás ideal depende somente da sua temperatura, a energia interna também é constante: logo, pela primeira lei da termodinâmica, o trabalho dW realizado pelo gás é igual ao calor dQ fornecido ao gás. Podendo ser representado matematicamente como:

$$dQ = dW = PdV = \frac{nRT}{V} dV \quad (27)$$

então,

$$\frac{dV}{V} = \frac{dQ}{nRT} \quad (28)$$

O gás atinge um estado mais desordenado depois da expansão, isso acontece porque as moléculas se movimentam em um volume maior, fazendo com que suas posições tornem-se aleatórias. Logo, a variação relativa do volume dV/V constitui uma estimativa de desordem, e a equação anterior mostra que essa razão é proporcional à grandeza dQ/T . Introduzimos o símbolo S para entropia do sistema, e definimos a variação infinitesimal da entropia dS durante um processo reversível infinitesimal em uma temperatura absoluta T e chegamos à relação dada pela equação (5).

Se uma quantidade total de calor Q é fornecida num processo isotérmico reversível a uma temperatura absoluta, a variação da entropia é dada por:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (29)$$

é o que chamamos de processo isotérmico reversível. A unidade da entropia é dada por 1 J/K , que é uma unidade de energia dividida por uma unidade de temperatura. Uma temperatura maior implica um movimento mais aleatório das moléculas. Estando a substância com movimento molecular pequeno, o fornecimento do calor Q produz um aumento fracionário substancial no movimento e no estado aleatório das moléculas. Se a substância já estiver quente, quando a mesma quantidade de calor é fornecida, é produzido um aumento relativamente menor no já elevado movimento molecular existente. Então, o quociente Q/T caracteriza de modo apropriado o aumento da desordem no interior de um sistema quando o calor flui para ele.

2.1.7 Visão microscópica da entropia

Consideremos agora uma distribuição de moléculas de um gás entre os dois lados de uma caixa isolada. Analisemos este problema que por meio da mecânica estatística, podemos calcular a variação de entropia durante a expansão livre de um gás ideal [16-17-18].

Podemos observar na figura 4, uma caixa que contém seis moléculas iguais de um gás. E em qualquer instante uma dessas moléculas vai estar no lado direito ou esquerdo da caixa. Como os dois lados da caixa são iguais, possuindo assim o mesmo volume, a probabilidade de que a molécula esteja no lado esquerdo é igual a um meio, e a probabilidade de que esteja no lado direito também é a mesma.

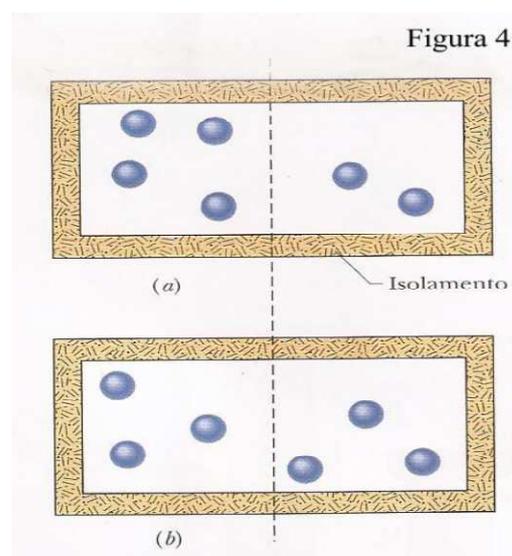


Figura 4: Seis moléculas de um gás em uma caixa isolada. Em (a) mostra o arranjo da configuração III da tabela 1 e em (b), o que corresponde a configuração IV.

A tabela 1 mostra as sete possíveis configurações para as seis moléculas da caixa. Por exemplo: imaginemos todas as moléculas no lado esquerdo da caixa ($n_1 = 6$) e no lado direito não tendo nenhuma ($n_2 = 0$). Então, pode-se fazer com que uma configuração seja obtida de várias maneiras diferentes. Esses diferentes arranjos das moléculas são chamados de microestados [16-18].

Para calcular o número de microestados que correspondem a uma mesma configuração, suponhamos que temos N moléculas, distribuídas com n_1 moléculas em um lado da caixa e n_2 no outro. Imagine que as moléculas sejam colocadas manualmente uma a uma. Se $N = 6$, selecionamos a primeira molécula de seis formas diferentes, ou seja, podemos escolher qualquer uma das seis moléculas para colocar na primeira posição da configuração. Já para a segunda molécula, temos cinco formas diferentes e fazemos assim por diante.

E assim, calculamos o número de microestados de um sistema através da seguinte equação [18]:

$$W = \frac{N!}{n_1! n_2!} \quad (30)$$

Onde W é a multiplicidade da configuração e o resultado é o número de microestados. Por exemplo, na configuração III temos:

$$W_{\text{III}} = \frac{6!}{4! 2!} = \frac{720}{24 \cdot 2} = 15 \quad (31)$$

Então para a configuração III, o número de microestados é igual a 15.

A hipótese fundamental da mecânica estatística é a seguinte: todos os microestados são igualmente prováveis.

Para valores muito altos de N , está explícito que o número de microestados é extremamente grande, mas praticamente todos os microestados, pertencem à configuração na qual as moléculas estão divididas em proporções iguais nos dois lados da caixa, havendo entre eles um pico central (fig. 5). Mesmo que os valores de pressão e temperatura permaneçam constantes, as moléculas estão em constante agitação, “visitando” todos os possíveis microestados com a mesma probabilidade. Entretanto, como muito poucos microestados estão fora do pico central, pode supor que as moléculas estão divididas igualmente entre os dois lados da caixa.

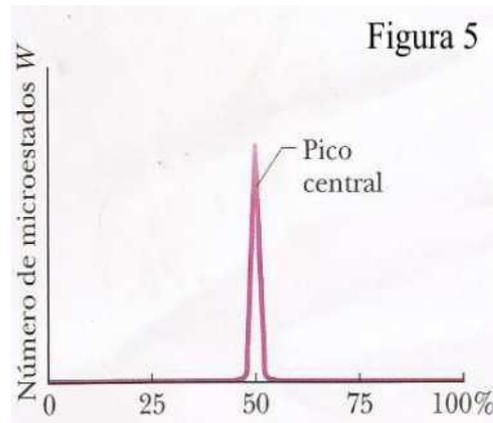


Figura 5: Gráfico do número de microestados em função do percentual de moléculas do lado esquerdo da caixa, para um grande número de moléculas. Esses microestados formam o pico central do gráfico.

Tabela 1. Seis moléculas em uma caixa

CONFIGURAÇÃO			Multiplicidade de W (número de microestados)	Cálculo de W
Número	n_1	n_2		
I	6	0	1	$6!/(6! 0!) = 1$
II	5	1	6	$6!/(5! 1!) = 6$
III	4	2	15	$6!/(4! 2!) = 15$
IV	3	3	20	$6!/(3! 3!) = 20$
V	2	4	15	$6!/(2! 4!) = 15$
VI	1	5	6	$6!/(1! 5!) = 6$
VII	0	6	1	$6!/(0! 6!) = 1$

2.1.8 Definição microscópica da entropia

Imaginemos uma xícara de café sendo agitada por uma colher, que logo em seguida é retirada. Com o tempo, a circulação do líquido se extingue e a viscosidade faz com que a energia do fluido em rotação seja dissipada em energia interna das moléculas. No início, há um movimento ordenado do café. No seu estado final de equilíbrio acontece um movimento molecular aleatório. A circulação ordenada das moléculas é um estado de baixa probabilidade, enquanto que o movimento desordenado representa um estado de probabilidade elevada. No processo natural o sistema de baixa probabilidade evolui para o de alta probabilidade.

Essa transformação é um processo natural irreversível, caracterizado por um aumento de entropia do sistema.

No ano de 1877, o físico austríaco Ludwig Boltzmann, encontrou uma relação entre a entropia e o movimento aleatório das moléculas. Esses movimentos aleatórios são os microestados do sistema. E a relação é a seguinte [16-18]:

$$S = k \ln W \quad (32)$$

onde k é a constante de Boltzmann, S a entropia do sistema e W o número de microestados do sistema. Esta famosa equação está gravada no túmulo de Boltzmann.

Sendo que S e W estão relacionadas a partir de uma função logarítmica. A entropia total de dois sistemas é a soma das entropias envolvidas. A probabilidade de acontecer dois eventos independentes é o produto das probabilidades individuais. Como $\ln ab = \ln a + \ln b$, o logaritmo é a forma mais lógica de estabelecer uma relação entre essas grandezas.

Voltando ao exemplo da caixa com seis moléculas de gás, a entropia de todas as configurações do sistema é mostrada na tabela 2, calculadas a partir da equação (32). A configuração IV possui uma entropia elevada, devido ao grande número de multiplicidades ou microestados.

Ao usar a equação (30) (p. 26) quando queremos determinar o número de microestados W , a calculadora poderá mostrar uma mensagem de erro ao tentar obter o fatorial de um número maior que algumas centenas. Mas, para evitar esse pequeno problema, podemos utilizar uma aproximação muito eficiente, conhecida como aproximação de Stirlin. Não usamos para $N!$ e sim para $\ln N!$, que é o que precisamos para a equação (32). A aproximação de Stirlin [18] é:

$$\ln N! \approx N \ln N - N \quad (33)$$

Tabela 2. Entropia em cada configuração

CONFIGURAÇÃO			Multiplicidade de W (número de microestados)	Entropia 10^{-23} J/K
Número	n_1	n_2		
I	6	0	1	0
II	5	1	6	2,47
III	4	2	15	3,74
IV	3	3	20	4,13
V	2	4	15	3,74
VI	1	5	6	2,47
VII	0	6	1	0

2.1.9 Entropia e a seta do tempo

É a variação de entropia que nos explica porque os sistemas caminham naturalmente num sentido único e não em outro: os sistemas evoluem sempre com o tempo, de modo que a entropia total do sistema + vizinhança cresça [15-18]. Vamos citar um pequeno exemplo:

Imaginemos uma casa; quando saímos para fazer uma viagem e a deixamos totalmente limpa, em seguida, trancamo-la e viajamos por alguns dias ou meses, e no retorno, ao abri-la, observamos que a casa está empoeirada, ou seja, totalmente suja. Isso acontece devido à entropia do ambiente aumentar, seguindo rigorosamente a seta do tempo. Ou, o nosso ciclo de vida, onde nascemos, crescemos, vamos ficando cada vez mais velhos e por fim morremos. Também ocorre devido ao aumento da entropia do nosso corpo no decorrer dos anos da nossa vida.

Mesmo se quisermos estabilizar ou paralisar a entropia, ela continua seguindo naturalmente seu caminho, independente daquilo que possamos realizar para impedir sua alteração.

2.2 A entropia na termodinâmica não extensiva ou generalizada

Ao propor um novo conceito para a entropia, Constantino Tsallis (1988), rompeu um dos postulados da termodinâmica extensiva, e chamou esse novo conceito de entropia generalizada. Em sua proposição, violou o terceiro postulado, que verifica a aditividade de sistemas termodinâmicos [8-19] (1988; 2000).

Neste novo enunciado para a entropia, outros sistemas termodinâmicos são contemplados, que até então não podiam ser estudados na termodinâmica clássica. Ao considerar um sistema composto por dois outros subsistemas independentes (A) e (B), como o terceiro postulado verifica a aditividade dos sistemas, a entropia do sistema composto é dada pela soma das entropias de cada subsistema [20], então:

$$S^{(A|B)} = S^A + S^B \quad (34)$$

Em sua formulação, Tsallis apresenta que um sistema composto possui generalização na sua entropia:

$$S_q^{A|B} = S_q^A + S_q^B + 1-q S_q^A S_q^B \quad (35)$$

onde q é o índice entrópico que caracteriza a generalização. Verificando possíveis valores para q , e, ao tomar $q = 1$, percebe-se que o sistema recupera a aditividade. No formalismo de Tsallis, outras variáveis também podem ser generalizadas. Observa-se também que o termo $1 - q$, é o que nos dá a medida de não aditividade ou não extensividade. Ao assumir valores para $q < 1$, diz-se que o sistema é superaditivo e para valores de $q > 1$, o sistema será subaditivo [21] (2006).

Sendo violada a aditividade, isso representa o rompimento com um conceito básico na termodinâmica, o de sistema isolado. Sendo os subsistemas colocados em contato um com o outro, cada subsistema dá a sua contribuição. Na construção do sistema $A \cup B$ da equação (35), o subsistema (A) contribui com $S_q^A + 1/2(1 - q)S_q^B$ e o subsistema (B) com $S_q^B + 1/2(1 - q)S_q^A$. Fazendo essas observações e verificando as equações (3) e (4) percebe-se que o sistema composto antes de ser formado, os subsistemas já sentia um ao outro, portanto, não eram isolados.

3 A ENTROPIA E SEU USO EM OUTRAS ÁREAS DA CIÊNCIA

3.1 Teorias da informação e a entropia

Dentro de teorias da informação a entropia pode ser tida como uma medida de incerteza. A entropia de uma fonte discreta de informação é dada pela esperança matemática da informação própria dos símbolos da fonte, ou seja, o produto do ganho de informação de cada símbolo pela sua probabilidade de ocorrência. A entropia da fonte é sensível à quantidade de símbolos que a fonte é capaz de emitir. Com Shannon [6], o conceito de entropia no aspecto da teoria da informação está ligado à necessidade de transmitir uma mensagem e codificá-la ao ser enviada por um canal de informação com a menor probabilidade de erro possível.

Supondo que tenhamos resultados possíveis e sua probabilidade de ocorrência seja p_1, \dots, p_n . Para que se tenha uma medida de incerteza e ela exista, e se existir haverá informação, seja $S(p_1, \dots, p_n)$, Shannon se baseou em três propriedades [22]:

1ª PROPRIEDADE: a função S deve ser contínua nos p_i ;

2ª PROPRIEDADE: se $p_1 = \dots = p_n = 1/n$ então S_n deve ser uma função monótona crescente. Com acontecimentos equiprováveis haverá uma maior opção, ou incerteza no resultado, quando existem mais resultados prováveis.

3ª PROPRIEDADE: Se uma escolha for subdividida em duas escolhas sucessivas então a entropia original deve ser a soma ponderada das duas entropias individuais.

Observando essas três propriedades, Shannon descobriu uma equação para o cálculo da entropia [23-24], que é dada por:

$$S = -k \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (36)$$

Esta equação é chamada de equação de Shannon. E com ela, pode-se obter a quantidade de informação contida numa mensagem.

3.2 Degradação do meio ambiente

A degradação de energia é dada a partir de processos irreversíveis, e em consequência desse fato, ocorre a degradação ambiental. Se o homem ao usar energia para gerar trabalho e melhorar sua qualidade de vida, irá produzir energia de baixa qualidade a

qual pela irreversibilidade, reduz a qualidade do meio ambiente com a produção de lixo, poluição do ar gerada da soltura de fumaça dos carros, indústrias, incêndios em matas, por exemplo, acarretando também na poluição dos recursos hídricos, a opção de se utilizar de fontes energéticas não renováveis, isso tudo reduz as fontes de sustentabilidade da vida [25-26].

Os fatores que compõem o meio ambiente como, por exemplo, toda a biosfera, tende a manter um nível de ordem interna, levando a um estado de baixa entropia [25]. Nesse contexto ecológico temos a entropia como sendo uma medida de degradação, dirigindo-se a destruição da qualidade do meio ambiente.

3.3 A influencia da entropia na economia

Para muitos autores da área de economia, a entropia tem um papel fundamental no estudo dessa ciência; afirmam que a entropia é um fator provoca a escassez. A economia se comportando como um sistema aberto não se aplica a lei da entropia, a qual se refere a sistemas isolados. O cálculo da variação de entropia para os sistemas econômicos abertos pode ser feita da seguinte forma [27]:

$$\Delta S = \Delta S_e + \Delta S_i \quad (37)$$

Sendo ΔS_i para sistemas isolado e sempre positivo ΔS pode assumir qualquer sinal. E se $\Delta S < 0$, implica dizer que a entropia do sistema diminui.

Nas palavras de Montenegro [28], o conceito de entropia na economia pode ser aplicado em duas áreas: as que têm semelhança com a termodinâmica, como a degradação das habilidades produtivas e aquelas que se referem ao conteúdo de informação e se utiliza a verificação de dados.

Como exemplo de degradação de habilidades produtivas, imaginemos uma fazenda com vários hectares de plantação de uma cultura qualquer, se no decorrer do ano as chuvas forem em grande abundancia ou escassez de chuva. Nos dois casos haverá um aumento da entropia naquele local. Sendo assim, observamos que haverá perda na produção causando certo impacto na economia pela escassez desse produto.

3.4 A entropia dos buracos negros segundo Hawking e o universo

Os buracos negros foram descobertos no ano de 1796, por Pierre Simon Laplace. Pela Teoria Geral da Relatividade, buraco negro é uma região do espaço da qual nada, nem mesmo objetos que viajem a velocidade da luz e nem mesmo a luz pode escapar, e eles provém da deformação espaço-tempo, esta por sua vez proveniente de matéria maciça e altamente compacta.

Então, o conceito de entropia dado por Hawking atribuído aos buracos negros é a medida de número de estados internos que o buraco negro poderia ter sem parecer diferente para um observador externo ao olhar sua massa, rotação e carga. Para obter a entropia, ele observou a interação entre área do horizonte do buraco negro, gravitação quântica e termodinâmica. Propondo então, uma equação para calcular a entropia do buraco negro [11], sendo ela da seguinte forma:

$$S = \frac{1}{4} \frac{Akc^3}{\hbar G} \quad (38)$$

Conhecida como a equação de Hawking para entropia do buraco negro. Onde A é a área do horizonte de eventos do buraco negro, $\hbar = h/2\pi$, k é a constante de Boltzmann e G é a constante gravitacional de Newton e o índice 1/4, é a relação existente entre a área do círculo da esfera e a área da superfície da esfera.

Em relação ao universo, a entropia chegará a um estado máximo causando a morte térmica do universo, onde os buracos negros contribuem para que haja um aumento dessa entropia.

4 METODOLOGIA

Ao analisar o conceito da entropia, vimos que está presente em outras áreas da ciência. Fizemos uma análise das multidefinições do conceito de entropia no âmbito da termodinâmica e da física estatística, onde está apresentada a equação primordial para a termodinâmica estatística. Avançamos na utilização dos conceitos da entropia em outras áreas da ciência, como na informática, nos estudos sobre degradação do meio ambiente, no estudo sobre o universo e na economia. Acreditamos na existência de outras áreas além das aqui citadas, que se beneficiam desse conceito para explicarem os seus problemas. Foi feita também uma análise de como é definido e abordado o conceito da entropia em alguns livros de Ensino Médio. E, em algumas bibliografias não aparece o conceito no qual fazemos referencia. Em outro momento, fizemos a análise dos livros mais adotados pelas universidades nos cursos de graduação em Física. Posteriormente, foi feita uma atividade com professores e alunos do Ensino Médio de escolas públicas. Esta atividade tem o intuito de verificar o que os alunos sabem sobre a problemática do conceito da entropia e a importância dada pelos professores em relação a esse conceito.

Noutra ocasião fizemos uma análise qualitativa de como está definido o conceito da entropia em livros de Ensino Médio e Superior. Nesta ocasião, visamos à forma de como está sendo abordado o conceito da entropia levando em consideração a relação com processos reversíveis e irreversíveis, a relação com a segunda lei da termodinâmica; a clareza na apresentação de informações importantes para o entendimento do conceito; descrição da entropia aplicada a outras áreas da ciência; relações do conceito a fatos de conhecimento comum a todos. Para Ausubel [29], “o fator mais importante que influi na aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe”. Nas palavras de Ausubel, se os alunos estiverem com um conhecimento prévio ou fatos que lhes são comuns, irão aprender e definir com mais facilidade qualquer que seja o conceito.

A aprendizagem significativa é alcançada quando uma nova informação é adicionada a uma estrutura cognitiva particular e específica, prévia, conhecida como subsunçor. A teoria cognitiva de Ausubel tem como proposta uma aprendizagem em sala com base em três pontos importantes: 1) o prévio conhecimento do aluno sobre o que será abordado, 2) o material utilizado tem de ser significativo para o discente, 3) e o aluno relacionar o conteúdo com o que ele já conhece. A teoria de Ausubel tem como principal objetivo expor como acontece o processo de aprendizagem em sala de aula de maneira significativa [30].

Na atividade de pesquisa quantitativa (ver anexos A e B) realizada com sete (07) professores e cinquenta (50) alunos de segundo ano de nível médio com idade entre treze e quinze anos, de ambos os sexos, com intuito de avaliar o conhecimento dos mesmos sobre o conceito de entropia, desde os conceitos que diz respeito à própria Física como também em outras áreas do conhecimento. Em alguns livros de física básica, o conceito é abordado de forma muito simples tanto no Ensino Médio como no Superior. Em outras bibliografias sentimos que abordam este conceito de forma mais completa. Vemos que é necessária a abordagem de forma mais ampla do conceito de entropia, estendendo a outras áreas das ciências exatas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Bibliográfica de alguns livros de Ensino Médio e Superior

Neste ponto, faremos uma análise das bibliografias de alguns Livros do Ensino Médio (LEM) (ver anexo C) e as de alguns Livros do Ensino Superior (LES) (anexo D). Na análise, buscamos as relações e correlações entre os autores de LEM e LES. Com isso pode-se observar como vem sendo apresentado os conceitos de entropia nos mesmos.

5.1.1 O conceito de entropia nos LEM

Tópicos de Física 2: Villas Bôas, Helou Doca e José Biscuola

O livro de Villas Bôas [31] apresenta o conceito de entropia de forma tradicional comumente expresso nos livros didáticos de EM e ES. Antes de o conceito ser apresentado, ele afirma que a entropia, assim como energia interna e temperaturas, é uma variável de estado termodinâmico. Então, define a entropia como: “medida de desordem e os sistemas físicos tendem para estados cada vez mais desordenados, podemos inferir que em processos naturais, a entropia do Universo vem aumentando ao longo do tempo”, (p. 130).

Ainda diz que é outra maneira de conceituar a segunda lei da termodinâmica. E para calcular a variação de entropia usa a seguinte equação:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (39)$$

Física Conceitual (versão traduzida): Paul G. Hewitt

Em Hewitt [32], faz referencia a qualidade de energia, onde a mesma se deteriora transformando-se em energias menos úteis: “outra forma de expressar isso é dizer que a energia ‘organizada’ (concentrada e, portanto, energia de alta utilidade ou qualidade) acaba degenerando em energia ‘desorganizada’ (com baixa utilidade ou qualidade)”, (p. 321), ou seja, quanto mais se degrada a energia maior é a entropia.

Assim como Villas Bôas (2007), Hewitt diz que a entropia mede o grau da desordem de um sistema. Ainda faz uma associação entre a qualidade de energia e a entropia para obter um melhor entendimento sobre o conceito.

Então pode-se afirmar que Hewitt, ao fazer essa associação com a qualidade de energia, faz uma menção à degradação do meio ambiente. Quanto pior e maior o gasto de energia, mais se degrada o meio ambiente.

Física ciência e tecnologia 2: Carlos Magno A. Torres, Nicolau Gilberto e Paulo Antônio

Ao analisar o livro de Torres [33], antes de mostrar o conceito de entropia, percebeu-se que ele tece um conceito sobre energia degradada, assim como fez Hewitt utilizando do mesmo pensamento, e, mensura sobre a tendência que os processos naturais tomam. Este conceito de energia degradada, chamando-o de **princípio da degradação de energia**, afirma ser outra formulação para segunda lei da termodinâmica, o contrario de Villas Bôas³⁰ e o enuncia da seguinte forma: “a quantidade de energia utilizável no Universo diminui à medida que ele evolui”, (p. 111).

Para explicar o enunciado da entropia, o autor faz referencia a processos naturais que estão em ordem e com o tempo tendem a uma forma desordenada, que de modo natural a desordem sempre aumenta. Por outro lado Torres, ao contrario de todos os autores citados anteriormente, menciona que a ideia de ordem e desordem está atrelada aos conceitos estatísticos. Também afirma que a entropia cresce quando ocorre um aumento de desordem no sistema.

Conexões com a Física 2: Blaidi Sant’Anna, Gloria Martini, Hugo Carneiro Reis e Walter Spinelli

No livro de Sant’Anna [34], inicia com explicação do que seriam processos irreversíveis e exemplifica ao misturar água fria com água à temperatura ambiente. Comenta sobre perda de energia de um sistema, e que a energia total do sistema se conserva de acordo com a primeira lei da termodinâmica e que há degradação de energia de acordo com a segunda lei da termodinâmica.

Considera que ao fazer a mistura de água quente com água fria, acontece o aumento da desordem do sistema, ou seja, antes da mistura e depois de acontecer o equilíbrio térmico, as moléculas de água estão num grau mais ordenado do que durante a mistura.

O conceito de entropia no livro de Sant’Anna é definido como sendo: “característica intrínseca de todo e qualquer sistema, aumenta à medida que a desordem dos fenômenos aumenta” (p. 192). Ou seja, para este autor, a entropia além de estar ligada a um sistema, é uma medida de desordem do mesmo. Limita-se a calcular a entropia apenas para

transformações isotérmicas, pois afirma que: "... os recursos de cálculo matemático que temos no ensino médio não nos são suficientes para definir essa grandeza para transformações não isotérmicas" (p. 193), então, o autor está consciente de que há várias possibilidades para o cálculo da entropia e precisa de recursos de nível superior para suprir essa necessidade e ainda em notas de leitura complementar, menciona a entropia a nível microscópico sendo uma característica estatística e deu como característica estatística, a impossibilidade dos processos naturais acontecerem no sentido inverso, e cita Boltzmann como mentor dessa característica estatística.

Observamos que Sant'Anna enxerga a entropia como uma função não limitada, onde há várias maneiras de obter o seu cálculo, seja a nível macroscópico ou microscópico.

Apresentamos aqui uma análise de como esses livros de Ensino Médio trazem a definição do conceito de entropia. A característica de cada um de como abordam este importante conceito.

5.1.2 O conceito de entropia nos LES

Fundamentos de Física 2: David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker

Halliday [18] inicia fazendo uma associação da entropia com processos irreversíveis, mencionando ser uma propriedade que determina o sentido dos processos irreversíveis. Dessa forma deduzimos que a entropia determina se um processo é reversível ou irreversível. "Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis. A entropia nunca diminui" (p. 253).

Coloca também que a entropia é uma função de estado, onde apenas pode ser demonstrado através de experimentos. Ainda sim, Halliday, assim como encontramos em alguns livros de ensino médio e de superior também, afirma ser uma forma de enunciar a segunda lei da termodinâmica e utiliza o ciclo de Carnot para explicar e demonstrar o conceito. Citando sobre o significado da entropia e a seta do tempo, sendo discutido muito brevemente.

Discute-se ainda o processo de entropia numa visão de desordem atômica. Em que a física estatística assume o papel estruturante para uma boa formalização deste conceito. Cita Boltzmann e que a nível microscópico, a entropia está relacionada com os microestados possíveis de um sistema, e por fim, apresenta a equação primordial da termodinâmica estatística, equação (32) citada anteriormente.

Física II: Young e Freedman

Assim como Halliday [18], para Young [16], a entropia é uma função de estado, e, exprime uma previsão quantitativa de desordem ao fornecer calor a um corpo: “o calor fornecido a um corpo faz sua desordem aumentar porque ocorre um aumento de velocidade média de cada molécula e, portanto o estado caótico aumenta” (p. 293).

Para os processos irreversíveis, ele afirma que sempre haverá um aumento de entropia e é uma grandeza que não se conserva e nos processos reversíveis a entropia medirá a desordem apenas de um lado do sistema e isso também ocorre para medir a energia interna de um sistema.

Como em outros livros, Young, dá um enunciado alternativo para a segunda lei, nas suas palavras: “... quando todas as variações de entropia que ocorrem em um processo são somadas, a entropia aumenta ou permanece constante” (p. 298).

Também dá respaldo a entropia a nível microscópico, mostrando antes o que é macro e micro estado. Ele diz que (p. 299):

Podemos extrair a seguinte conclusão geral: em qualquer sistema, o estado microscópico mais provável é aquele com maior número de estados microscópicos correspondente, que é também o estado macroscópico com a maior desordem e a maior entropia.

Com isso ele afirma existir estados microscópicos para estados macroscópicos. E para calcular a entropia em níveis microscópicos, também como outros autores, ele faz referencia a equação (32), criada por Boltzmann.

Física para cientistas e engenheiros, vol. 1: Paul A. Tipler e Gene Mosca

O autor Tipler [17] assim como os outros autores citados acima, coloca a entropia como uma função de estado, e está relacionada com os processos irreversíveis, no qual nesse processo o sistema sai de um grau mais ordenado e parte um grau menos desordenado, e, ainda faz uma relação com a disponibilidade de energia, se houver perda de energia para realização de trabalho útil, não há energia utilizável, ou seja, a entropia aumenta. E afirma a entropia ser uma medida do nível de desordem de um sistema: “existe uma função termodinâmica chamada de entropia S que é uma medida do grau de desordem de um sistema” (p. 650).

Para este autor, como a entropia é uma medida do grau de desordem, faz associação com o conceito de probabilidade, nas palavras de Tipler: “essencialmente, um

estado mais ordenado tem probabilidade relativamente baixa, enquanto um estado menos ordenado tem uma probabilidade relativamente alta”, (p. 658).

E para se aplicar a segunda lei da termodinâmica a esses processos, deve se considerar a segunda lei como um enunciado probabilístico e associa o número de moléculas ao que seja sistema microscópico ou macroscópico. E por fim apresenta a equação desenvolvida por Boltzmann.

Física 2: para cientistas e engenheiros: Raymond A. Serway

O livro do Serway [35] de início coloca que o termo entropia é uma função de estado e está relacionada com a segunda lei da termodinâmica. O autor de início mensura que irá definir a entropia numa escala macroscópica, como foi definida pela primeira vez por Rudolf Clausius, em 1865.

O autor coloca que o termo entropia ganhou maior dinamismo a partir do desenvolvimento da mecânica estatística, onde esse método de análise proporcionou uma forma diferente de definir o conceito de entropia. Ou seja, passou-se a definir a entropia numa escala microscópica ou de microestados. Diante do exposto, vale lembrar que Serway mensura também que “os sistemas isolados tendem para a desordem, e a entropia é uma medida dessa desordem” (p.143).

Em relação à medida de desordem, Serway apresenta a definição de tal conceito como verdade conhecida para diversos autores de livros em geral, que “a entropia do universo aumenta em todos os processos naturais” (p.143) e que uma propriedade importante da entropia é que: “a entropia do universo permanece constante num processo reversível” (p.143).

Vale lembrar que um dos principais resultados da mecânica estatística é a de os sistemas isolados tenderem para a desordem segundo Serway, e que a entropia como dito anteriormente, é uma medida dessa desordem.

Discutem-se posteriormente os processos de configuração de estados, reportando-se a Boltzmann que achou um método de calcular a entropia, S , mediante a importante relação dada pela equação (32).

Define degradação da energia sem qualquer referência ao termo entropia. Onde de início define que: “a tendência de a natureza evoluir para um estado de desordem afeta a capacidade de um sistema efetuar trabalho” (p.148). Feito isso, mostra exemplos de degradação associando primordialmente a conversão de energia.

Neste ponto fizemos a análise desses livros de Ensino Superior, e verificamos como os autores expõem o conceito de entropia em nível Superior.

5.2 Classificação dos livros analisados em termos de classe

Um aspecto relevante foi à maneira como os LEM e os LES analisados tratam o conceito de entropia, não existindo uma forma específica. Essas várias maneiras podem influenciar em um entendimento inadequado deste conceito.

Como se trata de um conceito científico, cada autor se relaciona de uma forma. Ao abordar o conceito de entropia, constatamos que vários outros conceitos estão ligados, tais como: reversibilidade, irreversibilidade, energia, transferência de energia, energia interna, contato térmico, número de microestados possíveis e interação térmica. Além de todos esses conceitos interligados, exige-se também um bom entendimento do conceito de entropia que seja tratado e considerado em diferentes contextos.

Todas as literaturas aqui apresentadas são representativas de LEM e LES, selecionados para a análise, as quais podem ser classificadas em três classes que correspondem ao tipo que devemos considerar para tentar caracterizar o termo em questão. Definimos as seguintes classes:

Quadro 1. Conceito de entropia em termos de classes

CLASSE 1	Entropia como degradação de energia. Neste contexto a entropia é associada ao conceito de energia. Dito como indisponibilidade ou degradação de energia, ou seja, quanto mais se desperdiça ou degrada a energia, maior a entropia.
CLASSE 2	Entropia como aumento de desordem. Aqui o conceito de entropia, está associado com o conceito de desorganização, ou seja, quanto menor a ordem de um sistema, maior a entropia. A entropia é caracterizada como grau desordem de um sistema.
CLASSE 3	Entropia e estatística. Nesta classe, a entropia está definida a nível microscópico, ou seja, associada ao número de microestados possíveis de um mesmo sistema se apresentarem como medida estatística.

No quadro 2, mostraremos a distribuição dos autores em termos das classes descritas no quadro 1. Seguiremos a mesma ordem de apresentação dos autores que tratam do conceito, feita na análise de cada livro para que haja uma melhor compreensão.

Quadro 2. Distribuição dos autores de acordo com as classes

AUTOR	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3
Villas Bôas et. al.		X	
Paul G. Hewitt	X	X	
Carlos Magno A. Torres et. al.	X	X	X
Blaidi Sant'Anna et. al.		X	X
David Halliday et. al.		X	X
Young e Freedman		X	X
Paul A. Tipler e Gene Mosca	X	X	X
Raymond A. Serway	X	X	X

Ao investigar o conceito de entropia, percebemos a diferença na metodologia que os autores utilizam para apresentar este conceito e apesar das diferenças todos convergem para um conceito único ou conceitos que o complementem, em outras literaturas nem se quer é mencionado o conceito. Assim como um dos autores ressalta que para definir o conceito de entropia completamente é necessário o conhecimento de cálculos superiores, sendo esta uma atitude positiva, não limitando o pensamento e o conhecimento do aluno ao aprofundar-se no assunto.

No que diz respeito à utilização do conceito de entropia em outras áreas da ciência, nos mostra como se tornou tão abrangente este conceito, o que nos leva a dar respaldo em procurar a maneira mais didática de abordar seus conceitos em sala de aula. Alguns pesquisadores da área de ensino de física, assim como Grandini e Grandini¹², consideram que para obter uma boa aprendizagem é preciso criar um ambiente de aprendizagem e que os alunos e os professores interajam entre si trocando ideias e conhecimentos, dando origem a um ambiente de aprendizagem construtivista. Seguindo essa ideia devemos iniciar uma discussão mais profunda sobre o conceito de entropia, levando em consideração toda a problemática de ensino para que ocorram mudanças significativas na forma de apresentação do conceito de entropia.

5.3 Resultado da pesquisa com alunos e professores de escolas públicas

Nesta pesquisa, foram detectados alguns problemas que podem afetar o aprendizado dos alunos, em termos de estrutura física da escola e de materiais escolares, fatos esses que podem contribuir para a não inserção desses alunos em cursos de nível superior, em contrapartida o nível de escolaridade dos professores que estão atuando nas escolas públicas está mudando, isso é visível no gráfico 1 abaixo:

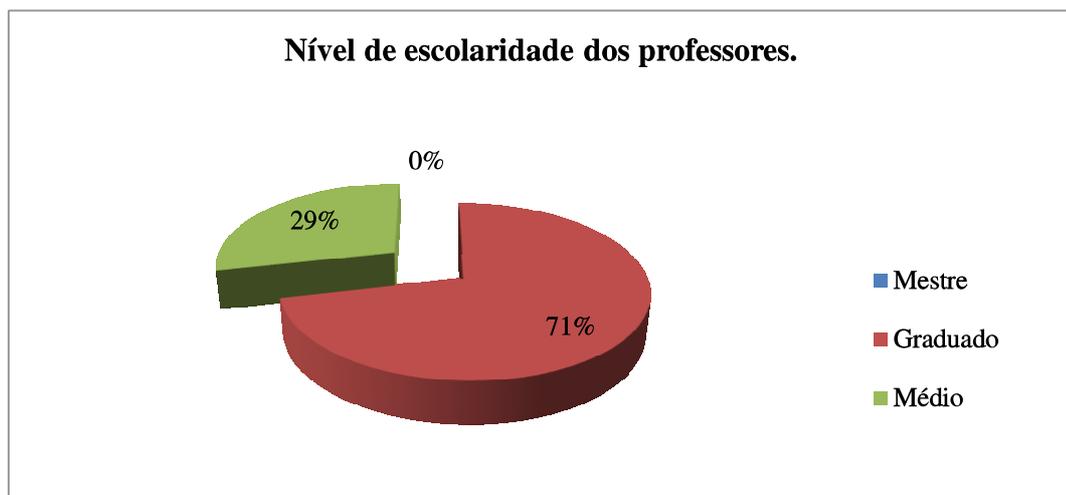


Gráfico 1. Escolaridade dos professores.

Sabemos que ter profissionais qualificados é de extrema importância para que ocorra melhor produção naquilo que se quer desenvolver. Aqueles que não possuem formação acadêmica ainda não estão atentos para a problemática das implicações pedagógicas que sua profissão exige como também não possui competência suficiente para suprir as problemáticas de ensino, tais como a que estamos expondo neste trabalho.

Foi questionado aos alunos se estudaram sobre termodinâmica, e todos responderam que sim, inclusive demonstraram que estudaram sobre as leis que a regem, dando suas definições satisfatoriamente. No gráfico 2, mostra que quando perguntados sobre a definição do conceito de entropia, nenhum dos alunos conseguem defini-lo totalmente, vamos conferir os números:

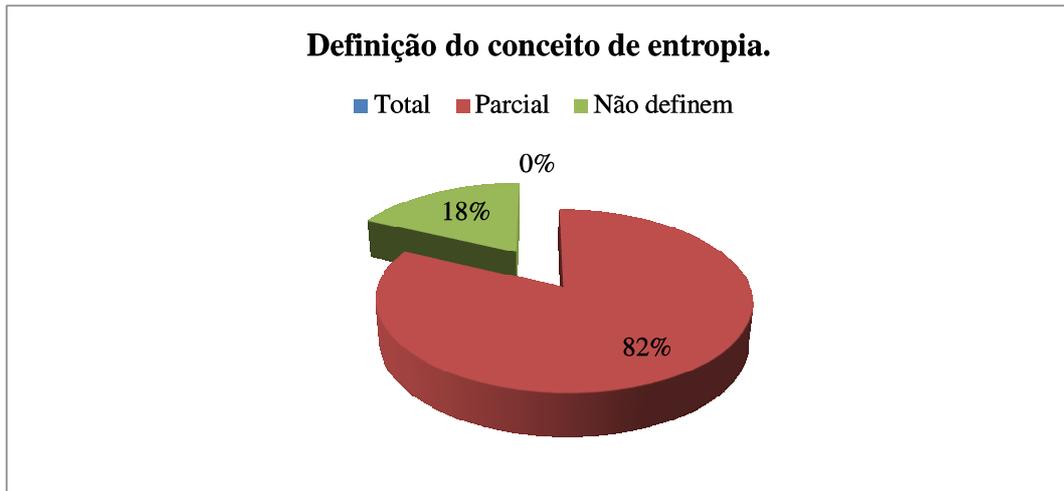


Gráfico 2. Definição do conceito de entropia por parte dos alunos.

Os alunos enfatizaram que seu professor não aborda de forma completa, apenas de forma superficial. Mas, mesmo assim de forma superficial e não se atentando para a abrangência do conceito, um número considerável de alunos puderam citar outras áreas do conhecimento que se beneficiam do conceito de entropia para explicar fenômenos que as cercam, como mostra o gráfico 3:

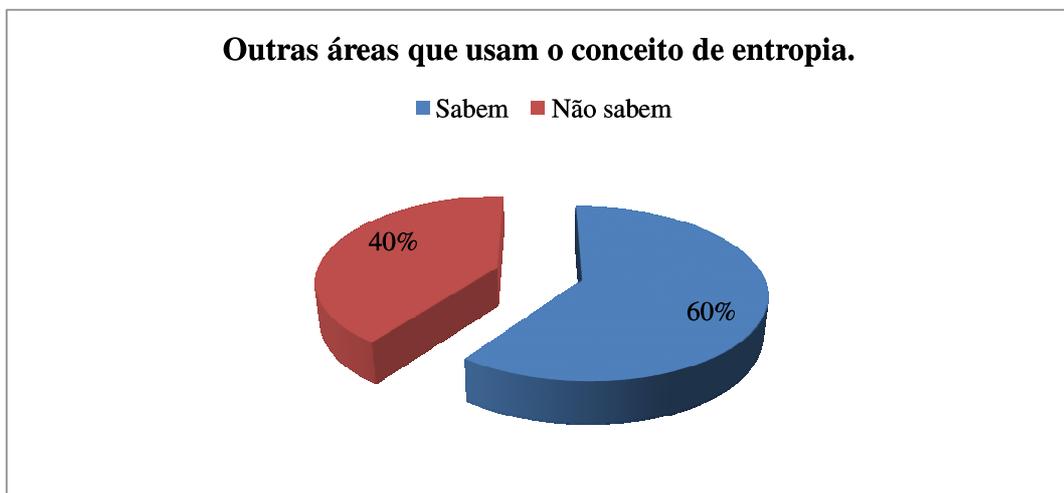


Gráfico 3. Alunos que mencionam o uso do conceito de entropia em outras áreas da ciência.

Isso demonstra que alguns alunos, por vontade própria vão à busca de aumentarem seus conhecimentos, independentemente de seu professor ter mostrado o conteúdo ou não. Os alunos reforçam seu aprendizado em sala buscando outras literaturas para complementar as que a escola disponibiliza.

O conteúdo de termodinâmica sendo mostrado de forma superficial, especificamente o conceito de entropia, não enfatiza a importância que o mesmo possui. A não contextualização fica explícita, quando os estudantes afirmam não assimilar a entropia

com o seu cotidiano. Sendo que ela está presente em várias situações, como por exemplo, um copo de vidro ao cair no chão e se quebrar, caracterizando um processo irreversível.

Em relação aos livros didáticos utilizados pelos professores, mostrarem ser de edições atualizadas. Isso é um fator positivo, pois alguns livros traz o conceito de forma mais completa em relação a outros de edições mais antigas, podemos verificar essa atualização no gráfico 4, a seguir:

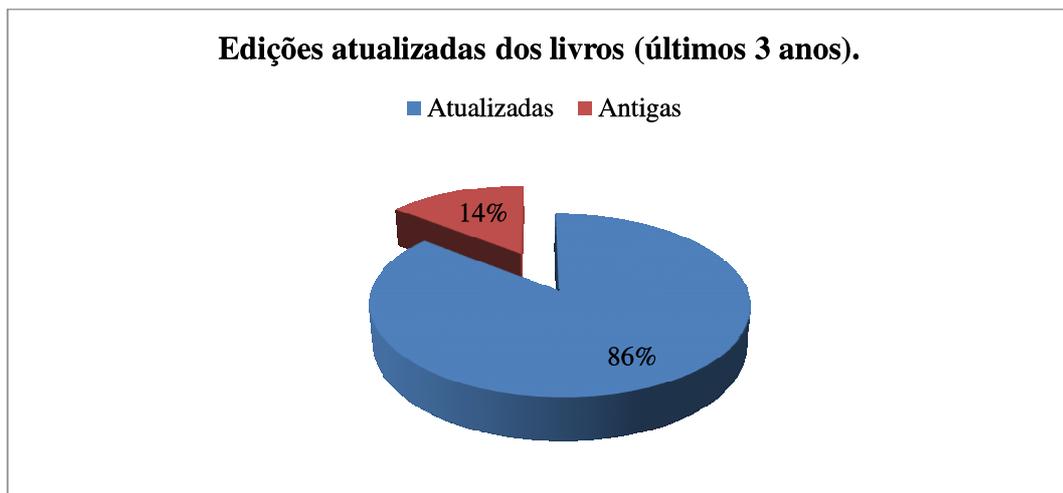


Gráfico 4. Atualização das bibliografias utilizadas nas escolas.

Ainda investigando sobre os livros, foi questionada aos docentes a maneira de como vem sendo demonstrado o conceito de entropia nos livros que as escolas pesquisadas utilizam. Os números são mostrados no gráfico 5:



Gráfico 5. Forma da definição do conceito de entropia nos livros utilizados.

Como em alguns livros nem todos os conteúdos estão inseridos completamente, com olhar especial ao conceito de entropia, o gráfico 6, mostra que os professores se utilizam

de livros complementares para completar os conteúdos a serem trabalhados e até mesmo para adicionar conteúdos além daqueles que lhes são postos na ementa da disciplina.



Gráfico 6. Uso de livros complementares pelos professores.

Em uma auto avaliação com respeito ao conceito de entropia, conceito esse que não se restringe apenas a Física, que também está presente em várias outras áreas da ciência, todos os professores afirmaram não conhecer totalmente sobre a grandeza que envolve o termo entropia, isso se torna preocupante, pelo fato de a maioria dos docentes possuírem nível superior e não ter familiaridade com o conceito de entropia. Em contrapartida, possuem um sentimento de que devem cada vez mais buscar fontes de conhecimento e aumentar suas competências pedagógicas e assim fazer com que seus alunos saiam com um melhor aprendizado, tendo em vista que a Física está presente no nosso dia a dia, desde o acordar ao deitar.

A teoria da Transposição Didática, proposta pelo sociólogo Michel Verret, em 1975, e explorada por Brockington e Pietrocola [36], vem como um instrumento de investigação analisando o processo pelo qual o saber produzido pela ciência se transforma naquele em que é inserido nos livros didáticos que estão em sala de aula, compreende na passagem do saber científico para o saber escolar, verifica como acontece às transformações sofridas pelo saber produzido pela ciência até ser transformado em objeto de ensino. Podemos comparar como de fato está inserido o conceito de entropia nos livros de Ensino Médio.

5.4 Discussão

À medida que a ciência avança, vemos a necessidade de se obter cada vez mais conhecimento sobre tudo o que nos cerca, e o conceito de entropia é um desses temas da

ciência cada vez mais presente em nossa vida. Percebe-se que os autores não dão respaldo suficiente para a abrangência do termo entropia, de modo a não divulgarem de forma completa este conceito, seja nos livros de Ensino Médio ou de Superior. É importante lembrar que alguns dos livros utilizados pelas universidades para compor suas ementas do curso de graduação Física, são traduções de edições antigas. Mas neste trabalho, investigamos o conceito de entropia em edições mais recentes destas mesmas bibliografias, e vimos que quase não há diferença entre as definições que as mesmas apresentam. Nas palavras de Sant'Anna e Menegolla [37], “qualquer ciência tem como objetivo a formação da pessoa como totalidade”. De acordo com esses pesquisadores, a ciência tem papel importante no crescimento intelectual das pessoas. Pensando nisso devemos então, difundir cada vez mais o conceito que aqui estamos discutindo, devido sua importância e como está inserido na ciência, e também como fala o autor, todos devem conhecê-lo em sua totalidade.

O conceito de entropia pode ser discutido de forma mais abrangente no Ensino Médio, ressaltando para que seja apresentado de maneira mais básica, devido aos poucos recursos matemáticos que o termo exige para ser discutido com visão mais profunda e o aluno poderá despertar o interesse em estudar mais sobre a Física que é tida como uma das disciplinas mais difíceis em sua jornada de estudos. Sabemos que naturalmente, os processos tendem a irreversibilidade, como por exemplo, ao abrir uma torneira, a água que cai não retorna para a mesma de forma espontânea, ou na mistura de água fria com água quente, ao atingirem o equilíbrio térmico não podemos mais distinguir uma da outra, caracterizando assim um processo irreversível. Também podemos dar como exemplo, a perda de energia para o meio, isso ocorre por efeito térmico. São acontecimentos que estão presentes em nosso dia a dia, que podem ser discutidos no Ensino Médio de forma didática e contextualizados, como por exemplo, a entropia no meio ambiente, onde podemos observar a sua degradação, esse tema é uma discussão mundial nos dias atuais. Enxergamos o quanto é importante ensinar de forma satisfatória o conceito de entropia no Ensino Médio, devido a grande abrangência do termo em outras áreas do conhecimento e a tendência é cada vez mais se discutir sobre este tema por estar relacionado a tantos fenômenos que estão a nossa volta.

6 CONCLUSÃO

Muitos conceitos centrais na ciência física apresentam definições complexas e difíceis de serem implementadas e assimiladas pelos estudantes no Ensino Médio e até mesmo no Ensino Superior. Os professores possuem uma tendência a seguir fielmente os conteúdos apresentados nas literaturas que adotam tanto para o Ensino Médio quanto para o Superior. Observamos que na maioria dessas obras, não é feita uma apresentação da entropia em outras áreas da ciência. O conceito de entropia sendo colocado como um conceito complexo, sugerimos que seja apresentado nos níveis de Ensino Médio e Superior, em diferentes contextos e níveis de complexidade, à medida que o estudo for avançando, aumentamos também o nível de apresentação do conceito, para que seja mostrado de forma completa e satisfatória; como no caso do conceito de entropia não generalizada, que não é discutida em nenhum dos LES analisados, pode ser feita a inserção de mais esta definição do conceito da entropia nesses livros; essa é mais uma sugestão que aqui expomos.

Sabendo que as ciências exatas e da natureza é uma área considerada difícil, visando à interdisciplinaridade, podemos diminuir a evasão escolar e divulgando a aplicação em outras áreas do conhecimento, isso contribui para que os alunos tenham motivação e estudem mais essa área. É importante ressaltar que as ciências exatas e da natureza deverá ser vista pelos alunos como conhecimento visando o desenvolvimento do seu raciocínio, sensibilidade de expressão, sensibilidade estética e sua imaginação¹³. Pensando nisso, vemos a importância de iniciarmos uma discussão mais abrangente sobre o conceito de entropia. Observando essa problemática de ensino, podem-se ocorrer efetivas mudanças no Ensino Médio e Superior. Levando em consideração a destruição do meio ambiente, podemos desde cedo conscientizar os estudantes para que procurem formas limpas e renováveis de recursos naturais, tendo em vista o avanço tecnológico esses recursos estão cada vez mais difíceis. Levando discussões dessa natureza para a sala de aula no Ensino Médio, podemos tornar o aluno mais curioso e nas universidades os cursos de termodinâmica se tornarem mais atrativos. Consideramos que esta investigação contribui para a área de ensino de Física, além de fornecer subsídios para estudos complementares.

Diante de todas as informações aqui contidas, de como é abrangente o conceito de entropia, as dificuldades que são encontradas na abordagem deste conceito, até mesmo dos docentes em conhecer o termo, pode-se sugerir minicursos voltados para o tema com intuito de suprir essas dificuldades e divulgação ampla do conceito da entropia.

7 REFERENCIAS

- [1] CARNOT, S. **Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines propres à Développer cette Puissance**. Paris: Bachelier, 1824.
- [2] TRUESDELL, A. C. **Tragicomical History of Thermodynamics: 1822-1854 Vol. 4 de Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences**. New York: Springer-Verlag, 1980.
- [3] FEENHOLTZ, R. **Diversity of Equity Markets**, *Journal of Mathematical Economics*. 1999. v. 31. p. 393-417.
- [4] GARNER, W.; MCGILL, W. **The Relation Between Information and Variance Analysis**. *Psychometrica*, 1956. p. 219-228.
- [5] HOROWITZ, A.; HOROWITZ, H. **Entropy, Market Processes and Competition in the Brewing Industry**. *Journal of Industrial Economics*, 1968. p. 196-211.
- [6] SHANNON, C. E. **A Mathematical Theory of Communication**. In: *J. Bell Sys, Tech.* v. 27, p. 379-656, 1948. Disponível em: <<http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/peper.htm>>. Acesso em 23 abr. 2012.
- [7] BRILLOUIN, Leon. **Science and Information Theory**. New York: Academic Press, 1954.
- [8] TSALLIS, C. **Possible generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics**. *J. Stat. Phys.*, 1988. p. 479-487. v. 52.
- [9] SAMPAIO, L. C.; ALBUQUERQUE, M. P.; MENEZES, F. S. **Nonextensivity and Tsallis statistics in magnetic systems**. *Physical Review B*, 1997. p. 5611-5614. v. 55.
- [10] TONG, S. et al. **Nonextensive entropy measure of EEG following brain injury from cardiac arrest**. *Physica A*, 2002. p. 3-628, v. 305.
- [11] BASTOS FILHO, J. B.; ARAÚJO, R. M. X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 2007. v.29, n. 4. p. 527-533.
- [12] GRANDINI, N. A.; GRANDINI, C. R. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 2004. p. 251-256. v. 26.
- [13] BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília, 1997.
- [14] CALLEN, H. B. **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics**. 2 ed. John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [15] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. **Física 2**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- [16] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física II: Termodinâmica e ondas**. Tradução e revisão técnica: Adir Moyses Luiz. 12. ed. Sao Paulo: Addison Wesley, 2008.
- [17] TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

- [18] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRAME, K. **Fundamentos de Física 2: gravitação, ondas e termodinâmica.** vol. 2. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [19] TSALLIS, C. **As Distribuições de Lévy.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, n. 2, p. 156-162, 2000.
- [20] BORGES, E. P. **Irreversibilidade, Desordem e Incerteza: Três Visões da Generalização do Conceito de Entropia.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 4. p. 453-463, 1999.
- [21] TSALLIS, C. **Is the Entropy S_q Extensive or Nonextensive?** Astrophys Space Sci. 305:261-271, 2006.
- [22] MARTINS, J. M. A. **Um olhar sobre a entropia.** Monografia, Universidade de Aveiro, 2000/2001.
- [23] BARÃO, M. **Entropia, entropia relativa e informação mútua.** Universidade de Evora, 2003.
- [24] ESQUEF, I. A.; ALBUQUERQUE, M. P.; ALBUQUERQUE M. P. **Fundamentos de teoria da informação.** Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2003.
- [25] BRANDI, A. P.; BARLETTE, V. E. **Degradação ambiental: uma abordagem por entropia.** Disciplinarum Scientia. S. Maria. vol. 2. n. 1. 2001, p. 161-170.
- [26] TRONCONI, P. A.; VOLOTA, R.; AGOSTINELLI, M; RAMPI, F. **Energia, entropia e os termos do problema.** Trechos selecionados do livro: **Pianeta in prestito. Energia, entropia, economia.** (p. 36-63). Pregoio: Macroedizioni, 1991, (1996).
- [27] MUELLER, C. C. **Economia, entropia e sustentabilidade: abordagens e visões do futuro da economia de sobrevivência.** Est. Econ., São Paulo, v. 29. n. 4. p. 513-550, 1999.
- [28] MONTENEGRO, A. **Información y entropía em economia.** Revista de Economía Institucional. v. 13. n. 25. p. 199-221, 2011.
- [29] AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D., HANESIAN, H. **Psicología Educativa: un punto de vista cognoscitivo.** México: Trillas, 1983.
- [30] MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem.** São Paulo: EPU, 1999a.
- [31] VILLAS BÔAS, N. et. al. **Tópicos de física 2: termologia, ondulatória e óptica.** vol. 2, 18. ed. reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2007
- [32] HEWITT, P. G. **Física Conceitual.** vol. único. 9. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2002.
- [33] TORRES, C. M. A. et. al. **Ciência e tecnologia.** vol. 2. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.
- [34] SANT'ANNA, B. et. al. **Conexões com a Física.** vol. 2, 1 ed. São Paulo: Moderna, 2010.
- [35] SERWAY, Raymond A. **Física 2: para cientistas e engenheiros.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

[36] BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. **Investigações em Ensino de Ciências**. 10, 1, 2005.

[37] SANT'ANNA, I. M.; MENEGOLLA, M. **Didática: aprender a ensinar**. Coleção Escola e Participação. vol. 5. ed. 7. São Paulo: Loyola, 2002.

ANEXOS

ANEXO A

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
CURSO: LICENCIATURA PLENA EM CIÊNCIAS EXATAS**

ESTA É UMA ATIVIDADE PURAMENTE DE PESQUISA, QUE VISA ÚNICA E EXCLUSIVAMENTE, AVALIAR O MODELO DIDÁTICO USADO PARA APRESENTAR O CONCEITO DE ENTROPIA NA TERMODINÂMICA. SERÁ MANTIDO O ANONIMATO DOS DOCENTES E DA INSTITUIÇÃO.

QUESTIONÁRIO DESTINADO A DOCENTES DO ENSINO MÉDIO

1. Grau de escolaridade do professor. () Graduado () Mestre () Doutor () Não possui formação acadêmica
2. Grau de escolaridade no qual já ensinou ou ensina atualmente.
() Ensino Fundamental () Ensino Médio () Graduação () Pós-Graduação.
3. Com respeito ao livro didático adotado por você ou pela instituição de ensino, você:
() Não o segue completamente.
() Segue rigorosamente apenas o livro didático adotado.
() Segue o livro didático adotado e faz complementos com outros livros.
4. Se você usa livros complementares, responda:
() O livro não contém os conteúdos a serem trabalhados
() Utiliza desses livros para completar os conteúdos a serem trabalhados
() Os usa para adicionar outros conteúdos além dos que irão ser trabalhados
5. Em relação ao conceito de entropia o livro utilizado:
() Não define o conceito de entropia na termodinâmica
() Define parcialmente o conceito de entropia na termodinâmica
() Define completamente o conceito de entropia na termodinâmica
6. Os livros utilizados são de edições atualizadas (últimos 3 anos)?
() Sim () Não
7. O conceito de entropia pode se relacionar com qual das leis termodinâmicas?
() Lei Zero
() Primeira Lei
() Segunda Lei
() Terceira Lei

8. As definições de reversibilidade e irreversibilidade, pode se relacionar com o conceito de entropia?

() Sim () Não

9. Você é capaz de citar outras áreas do conhecimento que usam o conceito de entropia?

10. Cite um processo reversível e outro irreversível que ocorre na natureza.

11. Usando o conceito de entropia, qual a relação dele com as máquinas térmicas e porque elas não possuem um rendimento de 100%?

12. Você já estudou sobre a termodinâmica não extensiva (ou generalizada)?

() Sim () Não

13. Caso respondeu sim no item anterior, qual dos postulados da termodinâmica extensiva, é violado pela termodinâmica não extensiva?

14. Você é capaz de reconhecer a entropia na termodinâmica não extensiva?

15. O que significa o índice entrópico q da entropia generalizada?

16. Depois de responder a todos os questionários anteriores, como você se auto avalia a respeito da termodinâmica e em especial ao conceito de entropia?

ANEXO B

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SOCIAIS APLICADAS
LICENCIATURA PLENA EM CIÊNCIAS EXATAS**

ESTA É UMA ATIVIDADE PURAMENTE DE PESQUISA, QUE VISA ÚNICA E EXCLUSIVAMENTE, AVALIAR O MODELO DIDÁTICO USADO PARA APRESENTAR O CONCEITO DE ENTROPIA NA TERMODINÂMICA. SERÁ MANTIDO O ANONIMATO DOS DISCENTES E DA INSTITUIÇÃO.

QUESTIONÁRIO DESTINADO A DISCENTES DO ENSINO MÉDIO

1. Você já estudou termodinâmica? () Sim () Não

2. Você sabe ou ouviu falar sobre as leis da termodinâmica? () Sim () Não

3. Quais leis possuem a termodinâmica?

4. Defina o conceito de entropia.

5. Qual a relação da entropia com a segunda lei da termodinâmica?

6. Qual a relação da entropia com seu cotidiano?

7. Os livros que você estudou traz o conceito de entropia?

() Sim () Não

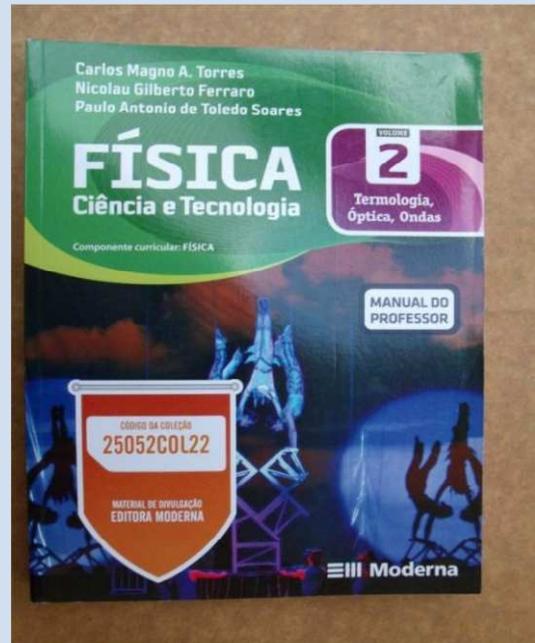
8. Os livros que você usou são edições atualizadas? Indique os anos das edições e os autores.

ANEXO C

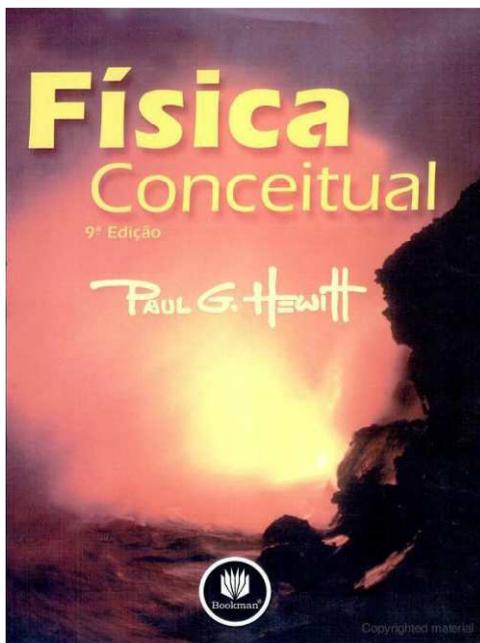
LIVROS DE ENSINO MÉDIO ANALISADOS



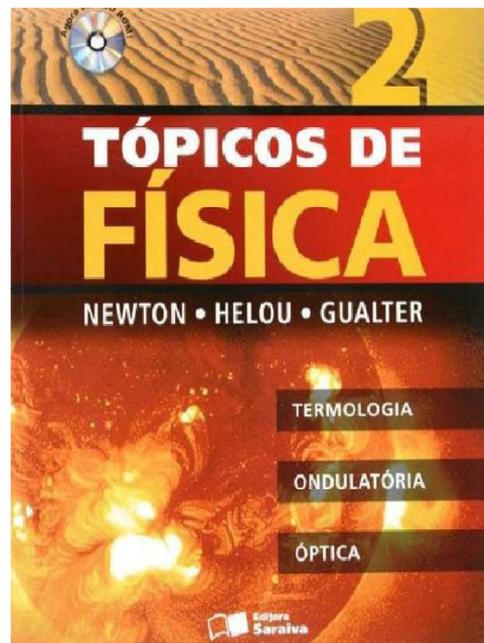
Conexões com a Física Volume 2: Editora Moderna



Física Ciência e Tecnologia Volume 2: Editora Moderna



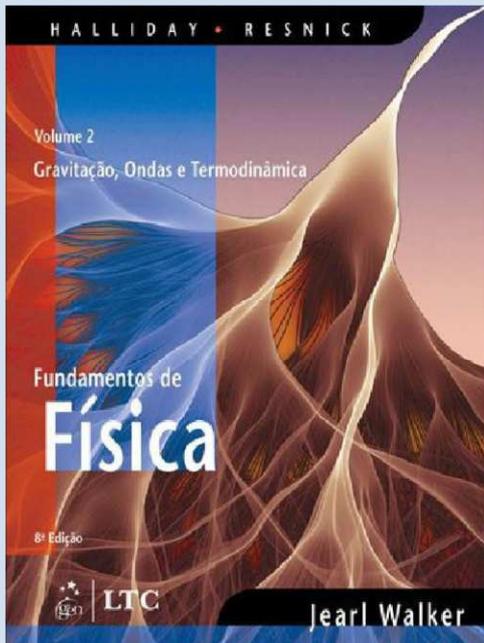
Física Conceitual: Editora Addison Wesley



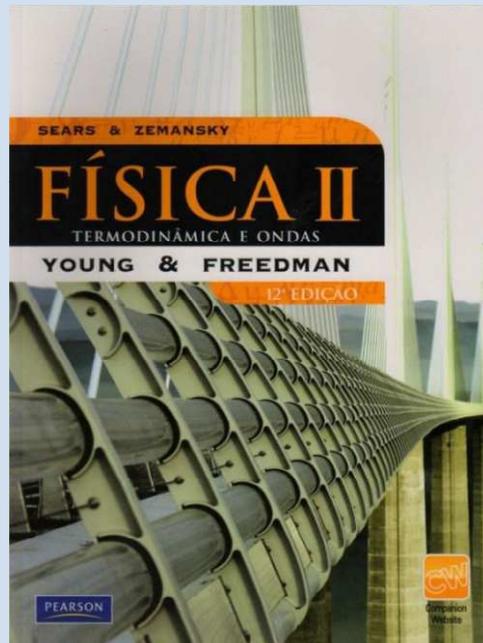
Tópicos de Física: Editora Saraiva

ANEXO D

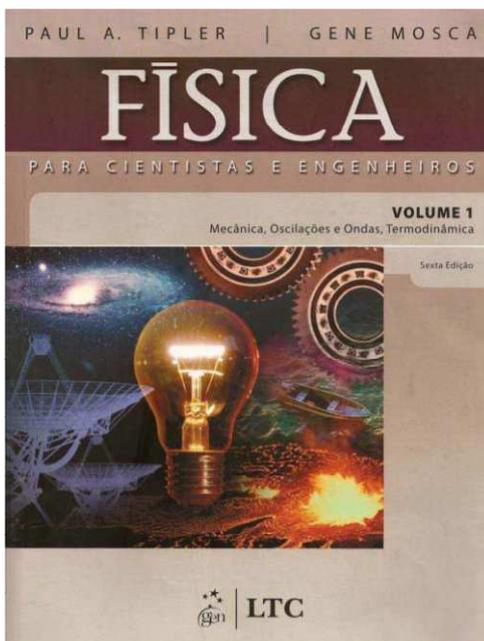
LIVROS DE ENSINO SUPERIOR ANALISADOS



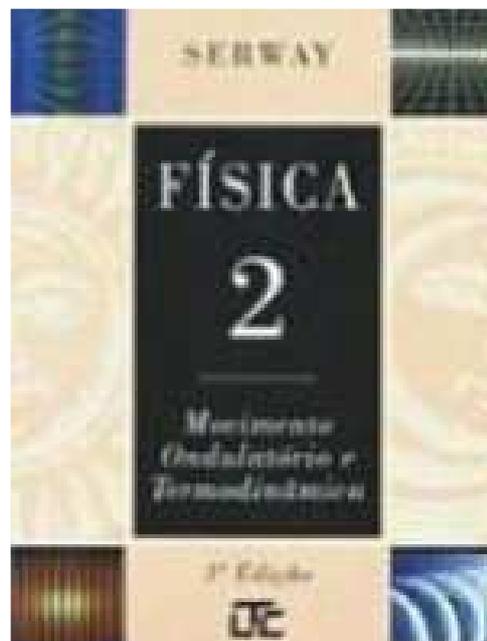
**Fundamentos de Física Volume 2: Editora
LTC**



Física II: Editora Addison Wesley



**Física Para Cientistas e Engenheiros
Volume 1: Editora LTC**



**Física 2: para cientistas e engenheiros:
Editora LTC**

