

MATHIAS VIANA VICARI

**O ENSINO DA 1ª e 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA EM UMA ABORDAGEM
INVESTIGATIVA DESENVOLVIDA EM TORNO DO MOTOR DE STIRLING**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Vicari, Mathias Viana, 1988-
V628e O ensino da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica em uma
2018 abordagem investigativa desenvolvida em torno do Motor de
Stirling / Mathias Viana Vicari. – Viçosa, MG, 2018.
vii, 122 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Inclui apêndices.

Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 73-76.

1. Física - Estudo e ensino. 2. Termodinâmica. 3. Máquinas
térmicas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Física. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física.
II. Título.

CDD 22. ed. 530.07

MATHIAS VIANA VICARI

O ENSINO DA 1ª E 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA EM UMA ABORDAGEM INVESTIGATIVA DESENVOLVIDA EM TORNO DO MOTOR DE STIRLING

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

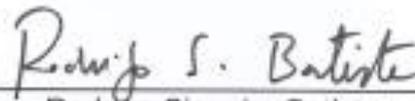
APROVADA: 09 de novembro de 2018.



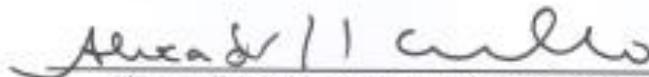
Alvaro José Magalhães Neves



Paulo Henrique Dias Menezes



Rodrigo Siqueira Batista



Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho
(Orientador)

***Dedico a minha esposa Nayara e ao Peter,
por serem a minha vida!***

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Alexandre Tadeu, pelos encontros sempre produtivos, pelas longas conversas proveitosas com ricas ideias, paciência desde a graduação, pela força, confiança, incentivo e credibilidade em relação ao trabalho.

A minha esposa Nayara e ao Peter por toda força, paciência, exemplos e experiências compartilhadas no desenvolvimento desse trabalho, pois sempre estiveram ao meu lado, me inspirando a buscar sempre mais o meu melhor.

A Deus, aos meus pais, Enir e Maria Angela, minha irmã Mariana e em especial aos meus avôs Nilson e Matias e exemplares avós Iris e Petita.

As bandas inglesas Iron Maiden, Led Zeppelin e Pink Floyd pelos extraordinários solos das guitarras que me ajudaram na escrita.

Aos meus queridos sogros Nilton e Elza por todo respeito e paciência.

Aos meus amigos, Luiz Alberto Bluesman que sempre me inspirou com boas conversas, acordes de guitarra, confiança e risadas, Rodrigão pelo incentivo e carinho e ao Álvaro pelas conversas e risadas.

Aos professores da banca Paulo Menezes, Rodrigo Siqueira e Álvaro Neves que contribuíram em muito para o enriquecimento desse trabalho.

Aos meus colegas, alunos, ex alunos e amigos do antigo Colégio Salesiano Dom Helvécio e do Colégio Nossa Senhora do Carmo, em especial ao Natan pelas ricas conversas sobre a natureza, meus ex alunos Gabriel, Martim, Victor e Leo.

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

"A ciência está destinada a desempenhar um papel cada vez mais preponderante na produção industrial. E as nações que deixarem de entender essa lição hão inevitavelmente de ser relegadas à posição de nações escravas: cortadoras de lenha e carregadoras de água para os povos mais esclarecidos"

Lord Rutherford

RESUMO

VICARI, Mathias Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2018. **O ensino da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica em uma abordagem investigativa desenvolvida em torno do Motor de Stirling.** Orientador: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

O objetivo da pesquisa foi desenvolver e aplicar uma sequência didática, com abordagem investigativa e problematizadora e analisar o seu impacto no processo de ensino aprendizagem dos discentes através de instrumentos que indiquem a alfabetização científica, facilitando a compreensão da natureza, da ciência e suas dimensões tanto sociais quanto históricas para despertar nos jovens o interesse pela Física. No desenvolvimento da aplicação da sequência pedagógica, privilegiou-se a relação social, no caso: o incentivo aos debates, trocas de conhecimentos, reflexões, análises, interpretações, relação da Física com fatos cotidianos, avaliações somativas (tradicionais) e utilização de Mapas Conceituais como instrumento de avaliação formativa como indicador da alfabetização científica dos alunos. Escolhemos a 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica como tema, devido a sua importante contribuição para a sociedade, tanto no passado quanto atualmente. A sequência didática foi aplicada em duas turmas de 2º ano (A e B) e duas turmas do 3º ano (A e B) do Ensino Médio de um colégio particular de um município do interior de Minas Gerais. O método consistiu em cinco etapas diferenciadas que resultaram em um total de oito aulas de cinquenta minutos. Por meio da análise dos resultados obtidos, constatou-se que a metodologia adotada corroborou no desenvolvimento e aplicação da matéria Termodinâmica e por fim, verificamos que os alunos foram capazes de associar os problemas iniciais ao desenvolvimento dos experimentos, bem como na aplicação do conhecimento e dos indicadores da alfabetização científica.

ABSTRACT

VICARI, Mathias Viana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November 2018. **The teaching of the 1st and 2nd Laws of Thermodynamics in an investigative approach developed around the Stirling Engine.** Advisor: Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho.

The objective of the research was to develop and apply a didactic sequence, with an investigative and problematizing approach and to analyze its impact on the learning process of students through instruments that indicate scientific literacy, facilitating the understanding of nature, science and its dimensions both social and historical factors to arouse interest in physics in young people. In the development of the application of the pedagogical sequence, the social relation was favored in the case: the incentive to debates, exchanges of knowledge, reflections, analyzes, interpretations, relation of physics with daily facts, summative (traditional) evaluations and use of Conceptual Maps as an instrument of formative evaluation as an indicator of students' scientific literacy. We chose the 1st and 2nd Law of Thermodynamics as a theme, due to its important contribution to society, both past and present. The didactic sequence was applied in two classes of the second year (A and B) and two classes of the third year (A and B) of the High School of a private school in a municipality in the interior of Minas Gerais. The method consisted of five differentiated stages that resulted in a total of eight fifty-minute lessons. By means of the analysis of the obtained results, it was verified that the adopted methodology corroborated in the development and application of the thermodynamic matter and, finally, we verified that the students were able to associate the initial problems to the development of the experiments, as well as in the application of the knowledge and indicators of scientific literacy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 ENSINO POR INVESTIGAÇÃO	4
3 A TERMODINÂMICA	10
3.1 A 1ª Lei da Termodinâmica.....	10
3.1.1 O Ciclo de Carnot.....	16
3.2 2ª Lei da Termodinâmica.....	19
3.2.1 Enunciados de Kelvin-Planck e Clausius.....	19
3.2.2 Entropia.....	20
3.3 Ciclo Termodinâmico de Stirling.....	22
3.3.1 O rendimento do Motor de Stirling.....	30
4 O ENSINO DA TERMODINÂMICA POR INVESTIGAÇÃO	31
4.1 Sequência didática sobre máquinas térmicas e os três momentos pedagógicos.....	31
4.1.1 Primeiro Momento Pedagógico: Problematização inicial.....	32
4.1.2 Segundo Momento Pedagógico: Organização do conhecimento.....	33
4.1.3 Terceiro Momento Pedagógico: Aplicação do conhecimento.....	34
4.2 A Teoria da mediação de Vygotsky e o Ensino de Física.....	35
4.3 Aprendizagem Significativa e Mapas Conceituais.....	38
5 METODOLOGIA	42
5.1 Síntese.....	49
6 RESULTADOS E ANÁLISES	50
6.1 Descrição das turmas e resultados.....	50
6.2 Descrição dos Mapas Conceituais construídos pelos estudantes.....	62
6.2.1 Mapas Conceituais de categoria F.....	62
6.2.2 Mapas Conceituais de categoria M.....	65
6.2.3 Mapas Conceituais de categoria A.....	67
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A: TESTE 1	77
APÊNDICE B: TESTE 2	79
APÊNDICE C: SITE COM ARQUIVOS ELETRÔNICOS	81
APÊNDICE D: PRODUTO EDUCACIONAL MNPEF	82

1 INTRODUÇÃO

No Brasil o ensino da Física na educação básica ainda se caracteriza, tipicamente, por abordagens que fazem uso excessivo da matemática e em alguns momentos são desprovidas de significado para o estudante. Essas abordagens associam à Física, como disciplina escolar, dificuldade de compreensão e pouca relevância para a vida, sendo incapazes de despertar a curiosidade e o interesse dos alunos, elementos estes motivadores da aprendizagem (LOZADA; MAGALHÃES, 2005; CONCHETI, 2015). A nossa experiência como professor do ensino médio corrobora esta perspectiva sobre o ensino da Física.

O ensino de Física ainda é um processo em evolução. Se olharmos para o passado até os dias atuais, muitas formas de abordagens de ensino ou metodologias foram modificadas devido a sua ineficácia ou fracasso, enquanto propostas de ensino e aprendizagem (GASPAR, 1995).

Com o propósito de auxiliar na aprendizagem e estimular a participação dos alunos do ensino médio nas aulas de Física desenvolvemos, em linguagem multimídia e na abordagem do ensino por investigação, um conjunto de sequências didáticas para o ensino da Termodinâmica. A linguagem multimídia possibilita o uso de diferentes mídias, textos, sons, imagens, vídeos e simulações, numa única tecnologia de apresentação e está presente na vida dos alunos por meio do convívio destes com smartphones e computadores.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) em parceria com o Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência (PIBID) - Licenciatura em Física da Universidade Federal de Viçosa – Campus Viçosa (MG). Ambos os programas objetivam envolver licenciados e licenciandos em experiências metodológicas e práticas docentes inovadoras. Ambos programas foram realizados com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A metodologia proposta foi elaborada em torno de vídeos de curta duração, exibindo experimentos, e de simulações computacionais, encontra fundamentos nos trabalhos de Vygotsky, Ausubel e de Delizoicov e Angotti. O uso da linguagem

multimídia se fundamenta na teoria da mediação de Vygotsky (2011), que considera a linguagem um instrumento essencial para o fluxo do pensamento que elabora o aprendizado por meio da interiorização do diálogo que o indivíduo estabelece com o meio. A sistemática da metodologia encontra fundamento na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (1980), segundo a qual o indivíduo organiza o conhecimento de forma ordenada e hierarquizada e na metodologia de Delizoicov e Angotti (1994), estruturada em três momentos pedagógicos distintos: (i) problematização inicial; (ii) organização do conhecimento; e (iii) aplicação do conhecimento.

Esta metodologia de ensino busca o desenvolvimento de diversas habilidades cognitivas dos alunos e a compreensão do método científico, além do conhecimento dos conteúdos da Física. A sua efetividade foi avaliada por testes e por meio da análise de mapas conceituais construídos pelos alunos. Os mapas conceituais permitem a reelaboração do conhecimento, perpassa e revisita os dois últimos momentos pedagógicos além de prover uma forma de avaliação individual dos alunos.

A metodologia proposta inclui um vídeo de curta duração como elemento central, que mostra o funcionamento do motor de Stirling, e que estabelece a problematização inicial. O produto educacional desta dissertação (Apêndice 2) apresenta a descrição dos materiais necessários, o passo a passo da montagem do arranjo experimental e a execução do experimento. Todo o arranjo experimental é de construção muito simples, permitindo que o aluno ou o professor o reproduza até mesmo em casa, de forma segura e com baixo custo.

Após a exibição do experimento, o professor promove a análise e discussão dos resultados, fomentando que os alunos elaborem hipóteses, retirem conclusões de forma autônoma e compreendam o fenômeno investigado. A exibição de simulações computacionais PhET relacionadas ao tema experimental e disponibilizadas pela Universidade do Colorado, EUA, oferece uma forma virtual de experimentação e exercitação, que pode ser usada de maneira complementar. Esse é o endereço da simulação (https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/gas-properties).

A sequência didática em linguagem multimídia facilita a ordenação da aula e estabelece a sequência de ações a executar, em acordo com a estratégia previamente elaborada pelo professor. O material desenvolvido aborda o estudo da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e, com o auxílio de um projetor, pode ser exibido em sala de aula, em partes ou em seu conjunto.

Na sequência da aula a organização do conhecimento passa por nova visualização do vídeo, pela formulação de explicações a partir das evidências experimentais e da argumentação, que levam os alunos elaborarem modelos conceituais coerentes com os modelos científicos aceitos para a Termodinâmica.

A aplicação do conhecimento se dá através da resolução de exercícios escritos, e/ou da produção de mapas conceituais e/ou da exibição das simulações, agora de forma interativa, possibilitando que os alunos variem parâmetros experimentais, prevejam os resultados, com base nos conceitos físicos aos quais foram apresentados, e confirmem suas previsões por meio da evolução das simulações. Os exercícios escritos e a produção de mapas conceituais provêm um meio para avaliação individual dos alunos bem como para reelaboração do conhecimento que acabaram de agregar. Os mapas conceituais oferecem ainda um meio precioso para avaliação da metodologia de ensino, pois permitem uma detalhada verificação da aprendizagem e dos elementos utilizados no ensino. Nesse sentido, elaboramos uma série de quesitos, cuja presença nos mapas pode ser verificada e seu teor avaliado pelo professor em uma escala de pontos predefinida.

Os mapas conceituais se baseiam em estruturas nas quais o aluno organiza as ideias e os conceitos científicos trabalhados em sala de aula, ressignificando esses conceitos. A junção do conceito de mapas conceituais e da metodologia de ensino por investigação favorece e enriquece o ambiente de aprendizagem, tornando a aula diferenciada e agradável, facilitando a compreensão dos alunos e, com isso, provendo prazer em estudar Física.

A aplicação da sequência didática revelou que sua divisão em duas sequências didáticas, uma para a 1ª Lei da Termodinâmica e outra para a 2ª Lei da Termodinâmica, era mais adequada. Assim a sequência didática foi reelaborada na forma de duas sequências didáticas que estão armazenadas em um site para download (<https://mathiasvianavicari.wixsite.com/motorstirling>), conforme consta no APÊNDICE C.

Neste capítulo 1, tentamos situar o leitor no contexto do trabalho, na estratégia didática e na motivação que levou ao seu desenvolvimento. No capítulo 2 é apresentada uma discussão com respeito à abordagem didática do ensino por investigação. No capítulo 3 descrevemos as Leis da Termodinâmica juntamente com o ciclo termodinâmico do motor de Stirling. Este último, pouco abordado em livros do

Ensino Médio, mas que a nosso ver se constitui em um valioso recurso auxiliar para o ensino da 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica podendo ser facilmente adotado nas aulas de Física. No capítulo 4 são apresentados os fundamentos estratégicos utilizados na confecção da sequência didática. No capítulo 5, apresentamos os fundamentos epistemológicos nos quais se apoiam a nossa metodologia de ensino, os objetivos e a metodologia utilizados na pesquisa. No capítulo 6, apresentamos os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. As considerações finais são apresentadas no capítulo 7, seguido das referências bibliográficas utilizadas na escrita desta dissertação. Nos Apêndices apresentamos o produto educacional, o endereço do site que contêm as aulas e vídeos e reproduzimos dois testes aplicados.

Vinculados à dissertação estão, em arquivos eletrônicos, o manual de construção e utilização do motor de Stirling, um filme que mostra seu funcionamento, uma sequência didática para o ensino da 1ª Lei da Termodinâmica e outra para o ensino da 2ª Lei da Termodinâmica; ambas desenvolvidas em torno do motor de Stirling.

2 ENSINO POR INVESTIGAÇÃO

O ensino por investigação (Inquiry Based Learning) é uma abordagem pedagógica que situa os questionamentos, as ideias e observações dos alunos no centro da experiência de aprendizagem (OSTDIEK; BORD, 2008; WINDSCHITL; THOMPSON; BRAATEN, 2008; CARVALHO, 2014; CARVALHO; SASSERON, 2015).

No ensino das ciências, essa abordagem pode possibilitar aos alunos se alfabetizarem cientificamente, envolvendo-os na resolução de problemas reais e no exercício da investigação. Para Chassot (2000), a alfabetização científica se dá quando o indivíduo compreende a linguagem da natureza; aquele incapaz de fazê-lo seria um analfabeto científico. O ensino por investigação usa práticas científicas como questionamentos, coleta de dados, raciocínios lógicos e de comparação, elaboração de hipóteses e suas testagens, trocas de informações e sistematização destas, elaboração de conclusões e sua socialização. O exercício da investigação capacita os alunos ao trabalho em grupo, fomenta o desenvolvimento de uma postura reflexiva, bem como da capacidade argumentativa e, a partir de uma análise crítica dos fenômenos em estudo, ajuda-os a construir o seu próprio conhecimento,

situando-os no centro do processo de aprendizagem. Acerca dessa perspectiva, Brito e Fireman (2016) declaram:

O aluno não somente aprende conceitos pela argumentação e pelo exercício da razão, mas aprende a discutir e a emitir juízo de valor aos conteúdos estudados. Em decorrência disso, ele passa a compreender os fenômenos do mundo natural, de maneira que se torna capaz de fazer uma leitura de mundo mais consciente, isto é, se alfabetiza cientificamente (BRITO; FIREMAN, 2016, p.129).

A abordagem do ensino por investigação encontra seus antecedentes nos trabalhos de Piaget, Dewey, Vygotsky e Freire, que entendem o conhecimento como domínio próprio de construção pelo sujeito, em interação com o mundo, seja ele material ou social.

Piaget (2010) estudou a origem, a evolução e os mecanismos de construção do conhecimento humano e do desenvolvimento da inteligência lógica, que permitem ao homem consubstanciar as ideias abstratas de tempo, espaço, causa e efeito. Para Piaget, é a interação entre o indivíduo e seu meio ambiente fator determinante para a criação do pensamento que promove a elaboração o conhecimento. Para Piaget (2010), o conhecimento é gerado através da interação do indivíduo com o meio, reconfigurando as estruturas cognitivas previamente existentes. A construção do conhecimento se dá por meio de processos mentais associados ao desenvolvimento biológico do indivíduo e do contato deste com o ambiente que o cerca. Esses processos mentais foram por ele denominados de assimilação, equilíbrio e acomodação (PIAGET, 2010).

A assimilação consiste na incorporação de objetos (representações do meio exterior) a estruturas cognitivas (ou esquemas mentais) preexistentes na memória por meio de processos de interpretação que conduzam à internalização dos objetos, abarcando-os às suas estruturas cognitivas. Quando as novas informações não se encaixam, um conflito cognitivo pode ser experimentado; um estado de desequilíbrio se estabelece. Para retornar a um estado de equilíbrio, é necessário a construção de novas estruturas cognitivas. Esse processo é chamado de acomodação e é o momento em que o indivíduo altera seus esquemas mentais tornando-se mais capaz em compreender aquilo que o perturba, que lhe perturbou o equilíbrio e, de acordo com Piaget, é quando a aprendizagem está efetivamente ocorrendo. O desenvolvimento cognitivo é a adaptação do indivíduo ao meio externo, como

resultado de assimilações e acomodações que se dão em um processo sequencial e contínuo, conduzindo a uma estrutura cognitiva nova, que pode englobar a precedente ou mesmo substituí-la. Esses processos se sucedem, assegurando estruturas cognitivas mais estáveis do que o anterior, a equilíbrio, em direção a uma estrutura mais abrangente (ZÔMPERO & LABURÚ, 2011).

A teoria do aprendizado de Dewey (1910) sustenta que a aprendizagem e o desenvolvimento humano ocorrem quando os indivíduos se defrontam com situações problemas, cuja solução desperta seu interesse. Ele acreditava que a instrução deveria ser baseada em tarefas e atividades integradas, significativas para a comunidade e que envolvessem os alunos em formas de ação social pragmática, que tenham valor real no mundo.

Para Dewey (1980, apud ZÔMPERO e LABURÚ, 2011, p.69) o ensino deveria ser centrado na experiência, não só a experiência vivenciada em laboratórios, mas aulas expositivas que aliem teoria e prática. Nesse sentido, o aluno torna-se elemento ativo de seu processo de aprendizagem, no qual a construção de conceitos se dará devido a suas experiências vividas. A educação consiste na contínua reelaboração da experiência por meio da reflexão, que promove um alargamento na compreensão da experiência que, por sua vez, facilita novas aprendizagens.

A ascensão do cognitivismo na educação aconteceu em meados de 1970, aportando ideias progressistas que enfatizam a importância dos aspectos socioculturais no processo de aprendizagem. Segundo Wong e Pugh, (2001, apud ZÔMPERO e LABURÚ, 2011) esses elementos sociais, revelam uma relação entre as ideias de Dewey e a de Vygotsky.

Para Vygotsky (2011) o desenvolvimento humano se dá por meio da interação do indivíduo com o meio em que está inserido. Os processos psicológicos mais complexos como a consciência e o discernimento, aspectos que nos diferenciam dos outros animais, só se formam e se desenvolvem por meio do aprendizado decorrente da interação social entre indivíduos. Ainda segundo Vygotsky é a linguagem o instrumento essencial para o fluir do pensamento que elabora o aprendizado.

Os trabalhos de Freire (1996) baseiam-se no pressuposto de que a pedagogia mais significativa é aquela que se desenvolve em torno da identificação, análise e resolução de problemas presentes no cotidiano dos alunos, sendo referida como uma pedagogia da problematização e resolução de problemas. Freire argumenta que

qualquer processo pedagógico deve se revelar significativamente útil para solução de situações problema associadas a vida dos alunos e deve permitir que eles analisem, teorizem e se envolvam intelectualmente com essas questões.

Durante as aulas, a apresentação aos estudantes de uma situação problema, uma problematização, coloca em questão os conhecimentos anteriores e promove a necessária instabilidade que conduzirá ao alargamento das fronteiras do pensamento. A eficácia do método reside no desconhecimento da solução da situação problema, cuja solução demandará várias estratégias na busca desta solução. Essa ação investigativa consciente, na qual o estudante torna-se um agente do processo intelectual da descoberta da solução é que o Piaget chama de acomodação (CARVALHO, 2014).

Por não apresentar uma resposta imediata ao aluno, a problematização na sala de aula é apontada (POZO, 1998) como um meio capaz de incrementar o aprendizado, demandando do aluno organização e método na elaboração de estratégias que conduzam a uma possível solução. Desperta nos alunos a importância da reflexão sobre a ação, conduzindo-os a agir de maneira consciente diante das questões da vida.

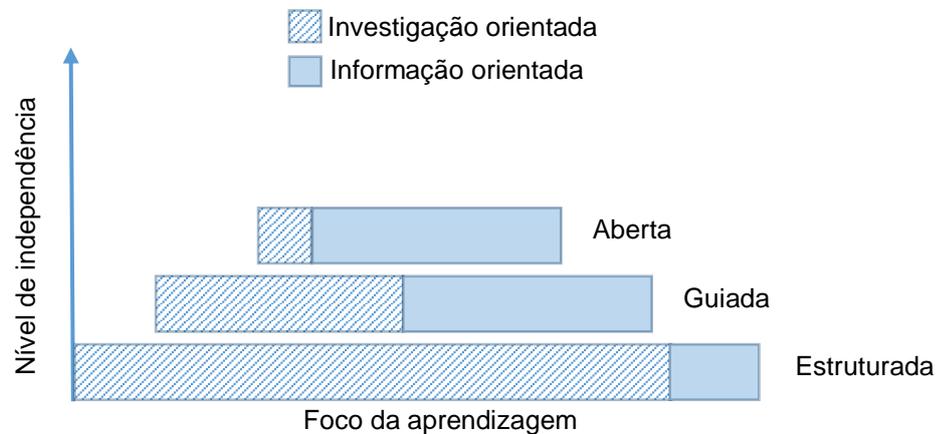
Quando essas abordagens de aprendizagem por investigação são apoiadas por uma orientação estruturada, o aluno pode crescer tanto quanto sua maturidade cognitiva permitir. O ensino sistemático guiará a assimilação e a acomodação de novas informações e, assim, uma compreensão profunda e integrada do novo saber será induzida (CARVALHO, 2014).

Durante o processo de ensino aprendizagem, o professor assume um papel de fomentar a construção do conhecimento, acompanhando e orientando o aluno no seu próprio processo de investigação, entendendo o aluno como uma pessoa intelectualmente ativa. É preciso dar ao aluno a liberdade de pensar e de argumentar sobre o que está aprendendo, de construir o seu próprio conhecimento. Na escolha dos problemas deve-se considerar as experiências dos alunos, seu desenvolvimento intelectual e capacidade cognitiva.

A atuação do professor e dos alunos pode ser classificada em razão dos diferentes níveis do envolvimento destes com a atividade investigativa, conforme representado na figura 1, que mostra a investigação orientada e a informação

orientada em três diferentes níveis de independência (aberta, guiada e estruturada) da aprendizagem por investigação (STAVER; BAY, 1987).

Figura 1- Níveis do envolvimento com a atividade investigativa.



Fonte: Spronken-Smith, 2012, p.69.

- investigação estruturada – o aluno é apresentado a um problema, mas não sabe os resultados antes da atividade. Procedimentos são descritos e os materiais são selecionados para o aluno. A atividade é estruturada para permitir que o aluno descubra um relacionamento e generalize a partir de dados coletado.

- investigação guiada – na qual os professores fornecem um problema para estimular a investigação, mas os alunos são autodirigidos em termos de explorar essas questões, idealizando os procedimentos e métodos de coleta de dados. Resultados e generalizações são elaborados pelos alunos.

- investigação aberta – na qual os alunos formulam o problema e passam pelo ciclo de pesquisa completo. Os alunos envolvem-se com um tópico, formulam a pergunta, identificam o que precisa ser conhecido, coletam e analisam os dados, sintetizam as descobertas, comunicam resultados e avaliam a pesquisa.

No ensino por investigação o professor deve encorajador que os alunos abracem a investigação do problema em estudo.

Como abordagem didática, o ensino por investigação demanda que o professor coloque em prática habilidades que ajudem os estudantes a resolver problemas a eles apresentados, devendo interagir com seus colegas, com os materiais à disposição, com os conhecimentos já sistematizados e existentes. Ao mesmo tempo, o ensino por investigação exige que o professor valorize pequenas ações do trabalho e compreenda a importância de colocá-las em destaque

como, por exemplo, os pequenos erros e/ou imprecisões manifestados pelos estudantes, as hipóteses originadas em conhecimentos anteriores e na experiência de sua turma, as relações em desenvolvimento. É um trabalho em parceria entre professor e estudantes (SASSERON, 2015, p.58).

Para Carvalho (2006), citada por Zômpero e Laburú (2011), os professores devem propor questões desafiadoras e estimuladoras para que os alunos resolvam a situação com base na natureza científica.

O ensino investigativo não exige necessariamente práticas de experimentação. Deve incluir atividade baseada em problemas e a busca de uma solução através da formulação de um método científico, e sempre fomentando o aluno à reflexão. É uma proposta totalmente diferente do ensino tradicional em que o professor tem a preocupação de desenvolver listas de conteúdo, de modo expositivo favorecendo em muitos casos a aprendizagem mecânica dos conteúdos conceituais (ZÔMPERO & LABURÚ, 2011).

As práticas de devem abarcar: a) a questão problema, escolhida de forma a estimular a curiosidade científica do estudantes; b) coletas de dados; c) organização e análise dos dados obtidos, por meio da construção e análise de gráficos e textos; d) elaboração de hipóteses, construídas em um trabalho em equipe pelos alunos por meio de discussões; e) testagem das hipóteses ou sua reconstrução; f) conclusão, os alunos estabelecem respostas para a questão problema a partir da análise dos dados obtidos (ZÔMPERO & LABURÚ, 2011).

Usualmente as atividades experimentais no ensino da Física encantam tanto os professores quanto os estudantes. Experimentos espetaculosos, com luzes, cores e movimentos fascinam os estudantes; entretanto nem sempre resultam em aprendizagens significativas para a formação destes. A eficácia pedagógica de uma atividade experimental não está necessariamente atrelada à sua capacidade de despertar interesse nos estudantes, mas sim na habilidade do professor em mediar a problematização, instigar os estudantes à investigação, apontar métodos e coleta e exploração de dados, fomentar a construção de hipótese ou relações e contextualizar os conteúdos aprendidos (ARAÚJO & ABIB, 2003).

A eficácia de um processo educativo não é determinada por uma situação problema despertar curiosidade ou fascínio nos alunos, mas é um aspecto a ser considerado para se alcançar a aprendizagem. Os professores devem encontrar problemas tangíveis, que sejam relevantes para seus alunos, que permitam que eles

os compreendam e contextualizem facilmente. Portanto, nem todos os problemas são apropriados para todos os níveis de ensino. Devemos ter clareza que muitas vezes o conhecimento não decorre unicamente da observação dos fenômenos, mas da elaboração de modelos teóricos, do manejo de simulações e modelagens computacionais (SOUZA; AKAHOSHI; MARCONES; CARMO, 2013).

No estudo da Termodinâmica no ensino médio, entendemos que o motor de Stirling pode se constituir em um fascinante e instigante problema em razão de sua construção simples, dos movimentos que propicia e da abrangência de fenômenos envolvidos.

3 A TERMODINÂMICA

Neste capítulo abordaremos as Leis da Termodinâmica que alicerçam as sequências didáticas para o ensino médio que elaboramos, construídas em uma abordagem investigativa em torno do Ciclo de Stirling. Ciclo este pouco explorado nos livros do Ensino Médio e que, a nosso ver, se constitui em uma fabulosa ferramenta para estudo das Leis da Termodinâmica.

3.1 A 1ª Lei da Termodinâmica

A Termodinâmica aborda as transformações de energia entre um sistema termodinâmico e o meio que o cerca, bem como essas transformações podem estar relacionadas com as propriedades da matéria, tanto em escala microscópica quanto macroscópica (ZEMANSKY, 1978).

As transformações de energia dos sistemas termodinâmicos são sintetizadas em duas importantes leis da Física. A 1ª Lei da Termodinâmica descreve o calor como uma outra forma de energia, tal qual a energia cinética ou energia potencial, e amplia o princípio da conservação da energia para incluí-la. A 2ª Lei da Termodinâmica estabelece as limitações de que porção da energia de um sistema pode ser convertida em outras formas de energia e a existência de uma direção espontânea para esses processos de conversão, que geralmente são irreversíveis (FISHBANE; GASIOROWICZ; THORNTON, 1996).

Um gás ideal no interior de um cilindro com pistão móvel constitui um sistema termodinâmico simples, ideal para o estudo das transformações de energia. O estado deste sistema termodinâmico é caracterizado por suas variáveis de estado; a pressão (P), temperatura (T), volume (V) e número de moléculas (n). Em um gás ideal essas variáveis estão relacionadas por meio da equação $PV = nRT$, onde R é uma constante. Um processo no qual ocorrem variações no estado do sistema termodinâmico, caracterizado por essas variáveis, denomina-se processo termodinâmico.

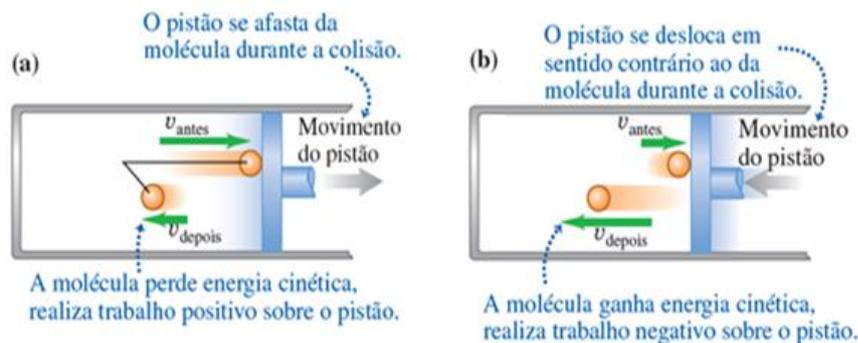
Quando dois sistemas termodinâmicos, em temperaturas diferentes, são postos em contato térmico, ou seja, existe uma troca de energia em forma de calor entre eles, separados por uma fronteira diatérmica que permite a passagem de calor sem aquecimentos, o sistema combinado alcançará certo estado final espontaneamente, com a mesma temperatura em toda a sua extensão, denominado estado de equilíbrio térmico. Caso os sistemas estivessem separados por uma fronteira adiabática estes coexistiriam em temperaturas diferentes, ou seja: quando um sistema é envolto por uma fronteira adiabática, sua temperatura é independente da temperatura da vizinhança. A fronteira adiabática tem, em Termodinâmica, um papel análogo ao da superfície sem atrito na mecânica, ou seja, idealmente consideramos que não exista dissipação de energias em forma de calor.

Um processo termodinâmico é dito reversível caso seja realizado em uma condição quase estática e na ausência de forças dissipativas. Assim o sistema passa muito lentamente por uma sucessão de estados de equilíbrio térmico, cujas variáveis de estado se diferenciam por quantidades infinitesimais, e não há transformação de energia que não seja através da realização de trabalho mecânico durante todo o processo. Um processo reversível é aquele que ocorre de tal maneira que, ao ser realizado em sentido contrário, retorna ao estado inicial passando pelos mesmos estados intermediários que no processo direto, mas em ordem inversa, sem que ocorra alterações no resto do universo. Um processo que não satisfaça estas condições é dito irreversível (ZEMANSKY, 1978).

Quando o gás ideal, em um processo reversível, sofre uma variação de volume, conforme indicado na figura 2, em que as moléculas do gás realizam um trabalho (W) sobre o pistão, expresso por:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Figura 2- (a) Trabalho realizado pelo gás (b) Trabalho realizado sobre o gás.

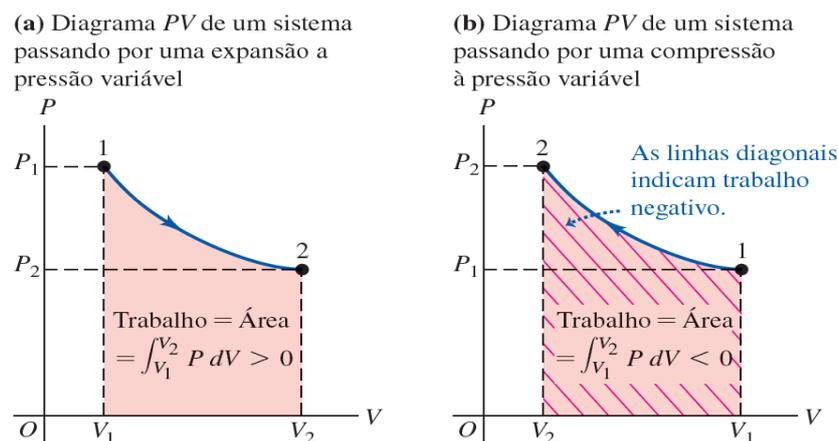


Fonte: Young & Freedman, 2016, p.281.

Em Termodinâmica o trabalho é um conceito macroscópico e seu valor pode ser positivo, quando a força exercida pelo gás empurra o pistão, ou negativo, quando o deslocamento do pistão comprime o gás. Quando as moléculas do gás empurram o pistão e o volume da câmara aumenta, o gás realiza um trabalho positivo. Quando as moléculas do gás são empurradas pelo pistão em um processo de compressão, acarretando a redução do volume da câmara, o gás realiza um trabalho negativo.

A figura 3 mostra, no plano $P \times V$, a representação gráfica dos processos entre dois estados mostrados na figura 2.

Figura 3- Trabalho realizado pela área embaixo da curva em um diagrama PV.

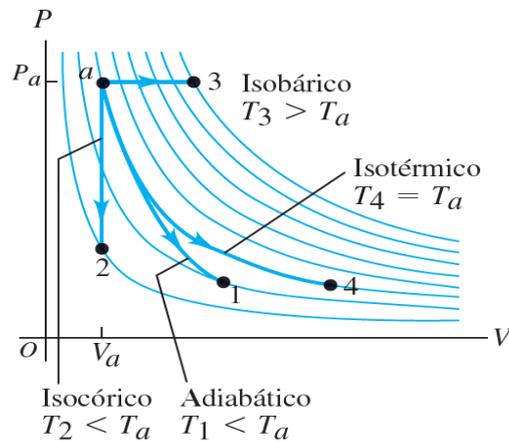


Fonte: Modificado de Young & Freedman, 2016, p.282.

O trabalho realizado é dado pela área sob a curva em um diagrama PV. O trabalho realizado no processo do estado 1 para o 2 é positivo, no processo contrário o trabalho é negativo.

A figura 4 mostra, no plano $P \times V$, a representação gráfica de alguns possíveis processos entre dois estados.

Figura 4- Quatro processos diferentes para uma quantidade constante de um gás ideal, todos iniciando no estado a.

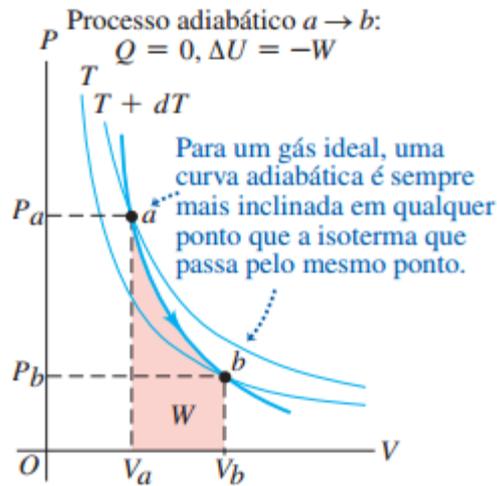


Fonte: Young & Freedman, 2016, p.293.

Os processos termodinâmicos são denominados tendo em conta uma grandeza que o caracteriza. Um processo isocórico é aquele em que o volume do sistema permanece constante e ele não realiza trabalho sobre as vizinhanças. Um processo isobárico ocorre a pressão constante, um processo isotérmico ocorre a temperatura constante. Um processo executado por um sistema envolto em uma fronteira adiabática é um processo adiabático.

Na figura 5 está representado um processo adiabático que ocorre entre dois estados de equilíbrio termodinâmico, a e b.

Figura 5- Processo adiabático entre duas isotermas.



Fonte: Young & Freedman, 2016, p.298.

A área hachurada sob a trajetória representa o trabalho adiabático ($W_{adiabático}$). Resultados experimentais mostraram que se um sistema é obrigado a passar de um estado inicial para um estado final, utilizando unicamente processos adiabáticos, o trabalho realizado é o mesmo para todas as trajetórias adiabáticas possíveis entre os dois estados. O fato de o trabalho adiabático independe da trajetória garante a existência de uma função de estado, denominada energia interna (U), cuja variação entre os estados inicial e final é igual ao trabalho.

$$W_{adiabático} = U_i - U_f = -\Delta U$$

Algo similar ocorre com o trabalho das forças conservativas, que também independe da trajetória, fato que torna possível associar ao sistema mecânico uma função energia potencial, dependente apenas da configuração do sistema, e cuja variação entre as configurações inicial e final corresponde ao trabalho realizado.

É interessante observar que nenhuma suposição ou afirmação com respeito a natureza da energia interna precisou ser feita a partir do ponto de vista molecular. Entretanto a energia interna é a soma de todas as formas de energia associadas aos componentes microscópicos do sistema.

A experiência também revelou que para processos outros que não o adiabático, o trabalho (W) realizado pelo sistema depende não somente dos estados inicial e final, mas também do caminho usado para transitar entre os estados. Nesses processos o sistema não está termicamente isolado de suas vizinhanças, mas faz contato via uma fronteira diatérmica com um ou mais sistemas, cujas temperaturas diferem da

temperatura do sistema em consideração. O trabalho não-adiabático não é numericamente igual ao trabalho adiabático, ou seja:

$$W \neq W_{adiabático}$$

A compatibilização deste resultado com o princípio de conservação da energia conduz a hipótese de que ocorre transferência de energia por meios diversos da realização de trabalho. Esta energia transferida, que só ocorre em razão da diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança, é denominada de calor (Q). Então,

$$Q = W - W_{adiabático} = W - (-\Delta U),$$

ou seja,

$$Q = W + \Delta U$$

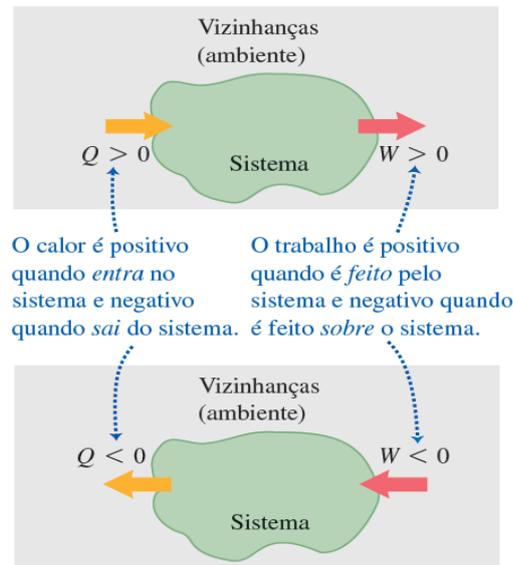
Esta última igualdade expressa a **Primeira Lei da Termodinâmica** e é uma generalização do princípio de conservação da energia para incluir a transferência de energia sob a forma de calor.

Um sistema termodinâmico pode trocar energia com sua vizinhança sob a forma de calor e trabalho, conforme representado na figura 6 abaixo. Como a diferença entre W e $W_{adiabático}$ pode ser positiva ou negativa, Q também pode ser positivo ou negativo.

Resultados experimentais mostraram que um sistema pode ser levado de um estado inicial para um final através de um número infinito de processos. Em geral, o trabalho W realizado ou sofrido pelo sistema e o calor Q que o sistema troca com a vizinhança terão valores diferentes para cada processo, ou seja, W e Q são quantidades dependentes do processo.

Um sistema termodinâmico pode trocar energia sob forma de calor, de trabalho ou de ambos com suas vizinhanças (ambiente).

Figura 6- Sistema termodinâmico e trocas de energias.



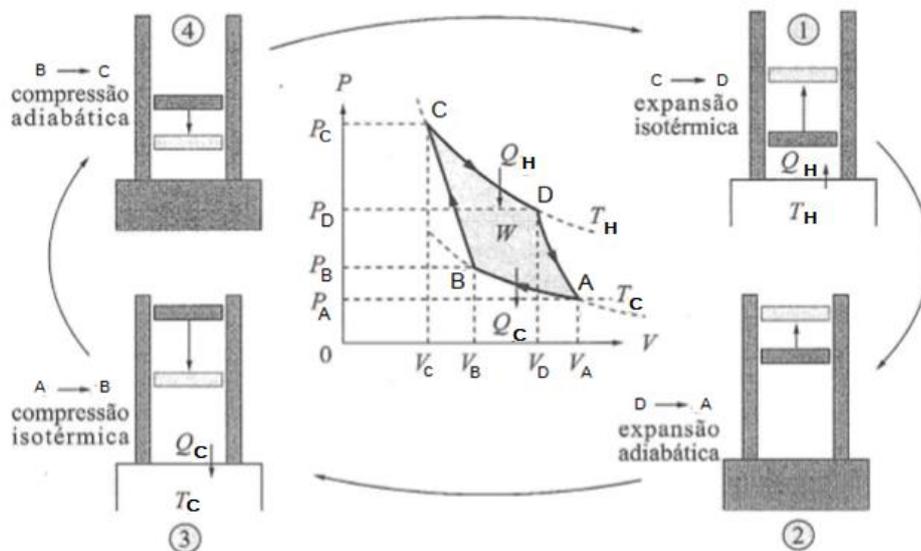
Fonte: Young & Freedman, 2016, p.280.

3.1.1 O Ciclo de Carnot

É denominado ciclo termodinâmico uma sequência de processos termodinâmicos tais que, ao transcurso de todos eles, o sistema regresse a seu estado inicial; ou seja, as variáveis de estado do sistema assumem o valor inicial.

Um ciclo de Carnot para um gás ideal é representado na figura 7, ocorrendo em quatro processos sequenciais e reversíveis.

Figura 7- Ciclo de Carnot



Fonte: Modificado de Nussenzveig, 2014, p.257.

A primeira etapa do ciclo é um processo de expansão isotérmico à temperatura T_H , do estado C para o D. Uma quantidade de calor Q_H é fornecida ao sistema por um reservatório à temperatura T_H enquanto o sistema realiza trabalho. Segue-se a este um processo adiabático, entre os estados D e A, às temperaturas T_H e T_C , e o sistema realiza trabalho sem que haja troca de calor. Mantendo contato do sistema com um reservatório de calor à temperatura T_C segue-se um processo de compressão isotérmico, entre os estados A e B, no qual o sistema cede uma quantidade de calor Q_C para o reservatório e trabalho é realizado sobre o sistema. O ciclo é completado pela escolha de um processo adiabático entre os estados B e C, no qual trabalho é realizado sobre o sistema sem troca de calor.

Embora as quantidades de calor e de trabalho sejam arbitrárias, a razão Q_H/Q_C só depende das temperaturas T_H e T_C conforme segue.

Tendo em conta que durante a expansão isotérmica de um gás ideal a energia interna não varia, a quantidade de calor Q_H absorvida pelo sistema é igual ao trabalho realizado, ou seja:

$$Q_H = \int_C^D P dV = \int_{V_C}^{V_D} \frac{nRT_H}{V} dV = nRT_H \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

onde V_C e V_D são os volumes nos estados C e D, respectivamente. De forma análoga

$$Q_C = \int_A^B P dV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT_C}{V} dV = nRT_C \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right).$$

Lembrando que para processos adiabáticos reversíveis vale a relação:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.}$$

onde γ é a razão entre os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante, temos:

$$T_H V_D^{\gamma-1} = T_C V_A^{\gamma-1} e^{T_H V_C^{\gamma-1}} = T_C V_B^{\gamma-1} \rightarrow \frac{V_D}{V_C} = \frac{V_A}{V_B}$$

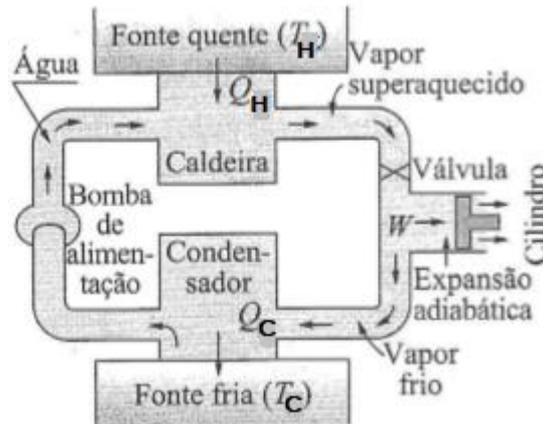
Logo,

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C}.$$

Um sistema executando um ciclo de Carnot é o protótipo de todas as máquinas térmicas cíclicas. Máquinas térmicas se caracterizam por receber calor (Q_H) de uma fonte mantida a uma temperatura mais alta (T_H), realizar trabalho mecânico (W) sobre

sua vizinhança e rejeitar calor (Q_C) para um reservatório a alguma temperatura mais baixa (T_C), conforme representado na figura 8.

Figura 8- Máquina a vapor.



Fonte: Modificado de Nussenzveig, 2014, p.252.

Como não há variação da energia interna do gás (substância operante) a quantidade líquida de calor recebido é igual ao trabalho realizado,

$$W = |Q_H| - |Q_C|$$

O rendimento térmico η de uma máquina térmica, definido como a razão entre o trabalho produzido e a quantidade de calor recebida, é:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|}$$

Para uma máquina térmica operando em ciclos de Carnot,

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C} \rightarrow \eta = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

Portanto, em um ciclo de Carnot, o rendimento térmico depende somente das temperaturas T_H e T_C .

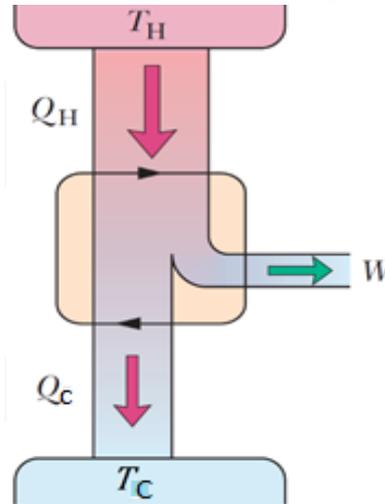
A máquina térmica de Carnot é ideal; uma máquina real é incapaz de realizar um ciclo reversível, pois parte do calor é perdido, aquecendo as paredes do cilindro e dotando o êmbolo de energia cinética. Essas perdas serão tanto maiores quanto maior seja a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria e quanto maior a velocidade do êmbolo. A reversibilidade será possível se o êmbolo se mover muito lentamente e se não houver diferença de temperatura entre o gás e as fontes quente e fria, condições estas não satisfeitas por uma máquina real. Caso uma máquina real assim operasse, trabalharia de maneira infinitamente lenta, resultando numa potência nula.

3.2 2ª Lei da Termodinâmica

3.2.1 Enunciados de Kelvin-Planck e Clausius

As características mais importantes das máquinas térmicas podem ser representadas na figura 9 e resumidas como segue (ZEMANSKY, 1978):

Figura 9- Diagrama esquemático dos fluxos de energia em uma máquina térmica.



Fonte: Modificado de Nussenzveig, 2014, p.253.

Existe algum processo ou uma sequência deles, durante os quais calor é absorvido de um reservatório externo a uma temperatura mais elevada.

Existe algum processo ou uma sequência deles, durante os quais calor é rejeitado de um reservatório externo a uma temperatura mais baixa.

Ou seja, não existe uma máquina térmica que converta o calor extraído de um reservatório quente em trabalho, sem rejeitar calor para um reservatório frio. Esses fatos experimentais são expressos no enunciado de Kelvin-Planck da segunda lei da termodinâmica, qual seja:

“É impossível a uma máquina, operando em ciclos, absorver de calor de um reservatório e convertê-lo unicamente em trabalho.”

Clausius, tendo em conta que a experiência também mostra que a transferência de calor de um reservatório frio para um reservatório quente requer trabalho, enunciou a segunda lei da termodinâmica como segue:

“É impossível a uma máquina, operando em ciclos, produzir unicamente a transferência de calor de um corpo frio para outro mais quente.”

As formulações de Kelvin-Planck e Clausius são equivalentes no sentido que a negação de uma implica na negação da outra (ZEMANSKY, 1978).

3.2.2 Entropia

A introdução do conceito de entropia oferece outro entendimento da segunda lei da termodinâmica.

Deixando de lado a notação de módulo na equação

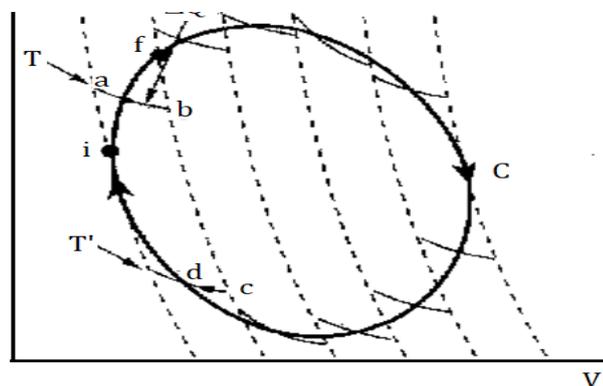
$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C}$$

e lembrando que num processo cíclico Q_C e Q_f tem sinais opostos, podemos escrever

$$\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_f}{T_f} = 0.$$

É sempre possível aproximar um ciclo termodinâmico reversível e arbitrário por um conjunto de ciclos de Carnot infinitesimais, conforme representado na figura 10, um diagrama pressão por volume, onde estão representados um ciclo reversível arbitrário juntamente com uma família de adiabáticas (curvas tracejadas) de pedaços de isotermas. Estas duas últimas compõem vários pequenos ciclos de Carnot que somados, aproximam do ciclo arbitrário. Partes adjacentes que compõem os ciclos de Carnot infinitesimais se cancelam.

Figura 10- Um diagrama P-V.



Fonte: Nussenzeig, 2014, p.265.

Assim para ínfimos ciclos de Carnot, no limite de diferenças de temperatura infinitesimais entre pares de isotermas, a sequência zigue-zagues aproxima-se do ciclo arbitrário e nesta condição

$$\oint_c \frac{dQ}{T} = 0$$

Assim dQ/T representa uma variação infinitesimal de uma variável de estado S , tal que:

$$S = \frac{dQ}{T} \quad e \quad \oint_c dS = 0$$

Tal variável S é denominada entropia do sistema, sua unidade é o joule por kelvin, cujo valor depende somente do estado do sistema.

A variação da entropia é a mesma para todas as trajetórias possíveis entre dois estados de equilíbrio quaisquer, A e B, e pode ser representada:

$$S_B - S_A = \int_A^B dS = \int_A^B \frac{dQ}{T}.$$

A variação da entropia de um sistema sujeito a processos reversíveis pode ser positiva ou negativa, dependendo se o sistema passa do estado A para o estado B ou de B para A.

Em qualquer processo adiabático reversível é nulo o fluxo de calor, entrando ou saindo do sistema ($dQ = 0$) e, em consequência, não há variação da entropia. Em processos em que há fluxo reversível de calor, entre o sistema e sua vizinhança, para cada mudança de estado o fluxo de calor para a vizinhança é igual em magnitude e de sinal contrário ao fluxo de calor para o sistema e a variação da entropia do universo é nula.

Processos irreversíveis são menos eficientes que processos reversíveis em razão das transferências de calor para fora do sistema.

A eficiência para um ciclo arbitrário é expressa por:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

e pode ser reduzida reduzindo o fluxo de calor para o sistema, $|Q_H|$, ou aumentando a quantidade de calor rejeitada, $|Q_C|$. Então, o efeito de processos irreversíveis ou espontâneos é reduzir o fluxo de calor para o sistema. Em consequência, para ciclos irreversíveis

$$\oint_c \frac{dQ}{T} < 0.$$

Este último resultado, obtido para ciclos irreversíveis, combinado com o resultado obtido para ciclos reversíveis, $\oint_C \frac{dQ}{T} = 0$, é conhecido como desigualdade de Clausius, ou seja:

$$\oint_C \frac{dQ}{T} \leq 0.$$

A desigualdade de Clausius permite avaliar a mudanças de entropia em ciclos que contenham transformações irreversíveis.

$$0 > \oint_C \frac{dQ}{T} = \int_{A \text{ irev}}^B \frac{dQ}{T} + \int_{B \text{ rev}}^A \frac{dQ}{T} = \int_{A \text{ irev}}^B \frac{dQ}{T} + (S_A - S_B)$$

logo

$$(S_B - S_A) > \int_{A \text{ irev}}^B \frac{dQ}{T}$$

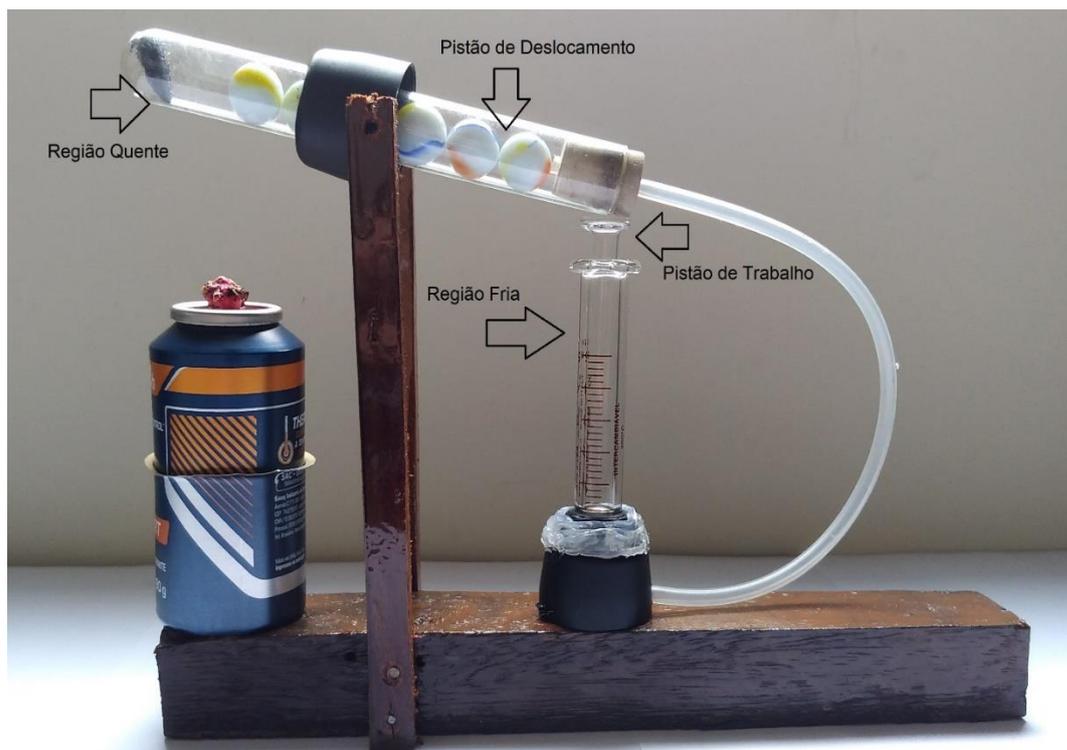
Então a diferença de entropia entre dois estados de equilíbrio ligados por um processo irreversível é maior $\int_{A \text{ irev}}^B \frac{dQ}{T}$. Assim, a segunda lei da Termodinâmica pode ser formulada em termos da entropia:

“Em qualquer processo termodinâmico, que vai de um estado de equilíbrio para outro, a entropia do universo aumenta ou permanece constante.” (ZEMANSKY, 1978).

3.3 Ciclo Termodinâmico de Stirling

O motor de Stirling é uma máquina térmica que funciona em ciclo fechado, tendo como substância operante uma porção de ar contida em duas câmaras cilíndricas ligadas por uma mangueira. Na figura 11 está uma foto do protótipo de motor de Stirling que construímos e operamos (ZEMANSKY, 1978; ORGAN, 2007; GÜÉMEZ, FIOLEAIS, 1998).

Figura 11- Fotografia de nosso protótipo de motor de Stirling.



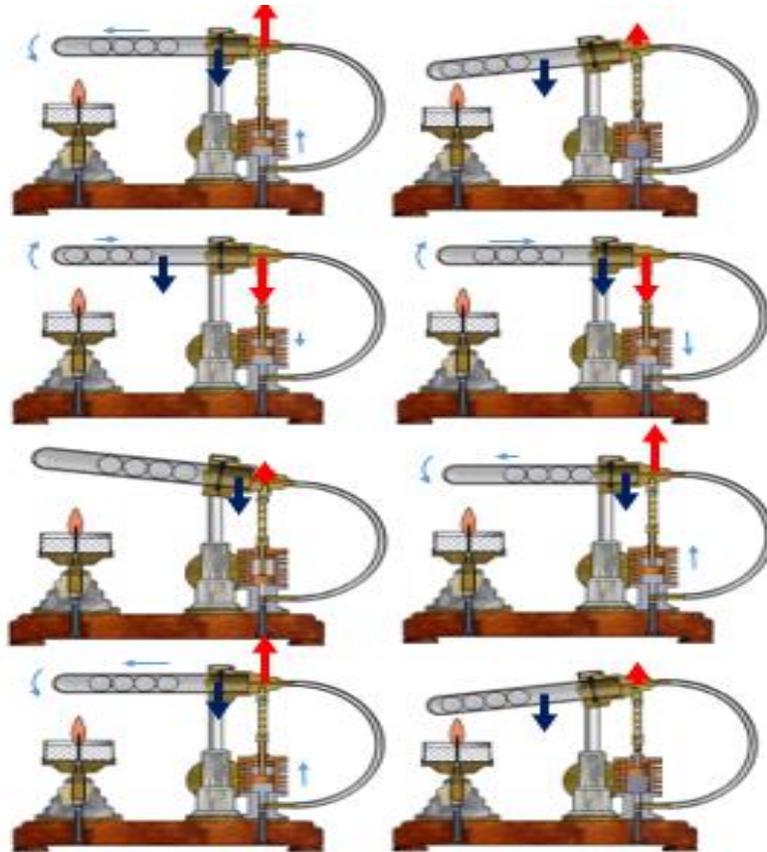
Fonte: Modelo elaborado pelo autor (2018).

Uma das câmaras é constituída por um tubo de vidro (tubo de ensaio) que tem uma das suas extremidades lacrada e a outra tampada por uma rolha com furo que, por meio da mangueira, permite a conexão desta à outra câmara. Esta última (uma seringa de vidro) é dotada de um êmbolo de trabalho. Dentro do tubo de vidro estão algumas bolas de vidro, livres para se movimentar, que constituem o denominado êmbolo de deslocamento. Um eixo fixado ao tubo de vidro permite que este execute um movimento angular no plano vertical quando impulsionado pelo êmbolo da seringa, em razão da expansão e contração do ar contido no sistema.

A extremidade fechada do tubo de vidro está próxima a uma chama que aquece o ar no interior do tubo, próximo à extremidade lacrada. O aquecimento resulta na expansão do ar contido na câmara da seringa, que empurra o embolo desta ocasionando um deslocamento angular do tubo de vidro. A inclinação do tubo permite que as bolas de vidro ocupem o lugar do ar próximo a extremidade lacrada. O ar é então deslocado para longe da fonte de calor e ao esfriar, se contrai, puxando o êmbolo da seringa. Em consequência o tubo sofre um deslocamento angular em sentido oposto, promovendo o deslocamento das bolas de vidro para longe da fonte de calor e o aquecimento do ar, que se expande, recomeçando o ciclo.

Na figura 12 representamos as diferentes configurações assumidas por um motor de Stirling durante um ciclo de trabalho.

Figura 12- Representação artística de um motor de Stirling em diferentes estágios de um ciclo trabalho.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>.

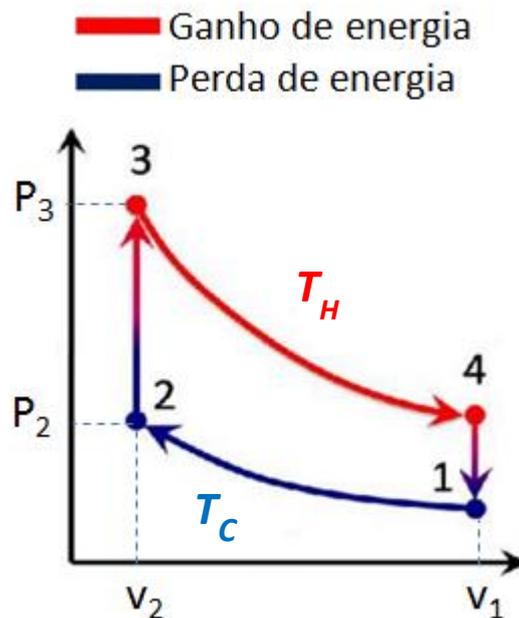
Então a expansão e contração cíclicas da substância trabalho promove o deslocamento angular do tubo de vidro.

O motor Stirling é uma máquina térmica que obedece a um ciclo termodinâmico reversível e fechado, convertendo calor em trabalho a partir da expansão e da contração de um gás, que alterna entre um gradiente térmico.

A Figura 13 representa o Ciclo Stirling ideal, no qual se destacam os processos como se segue:

- (1 → 2) Compressão isotérmica;
- (2 → 3) Aquecimento isocórico;
- (3 → 4) Expansão isotérmica;
- (4 → 1) Resfriamento isocórico

. Figura 13- Representação do ciclo termodinâmico de Stirling.



Fonte: Modelo elaborado pelo autor (2018).

Nosso caso é o motor de Stirling, uma combinação de quatro processos termodinâmicos reversíveis, ou seja, quatro tempos de funcionamento, o sistema e a vizinhança retornam ao seu estado inicial depois de completado o ciclo.

Admitindo que o atrito das partes móveis é desprezível, que as paredes da câmara são adiabáticas e que o gás é ideal.

As Leis de Charles, Boyle e Gay-Lussac, descrevem os comportamentos do gás sendo considerado ideal dentro do tubo.

Pela lei geral dos gases, temos:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$P_1 \rightarrow$ Pressão inicial

$P_2 \rightarrow$ Pressão final

$V_1 \rightarrow$ Volume inicial

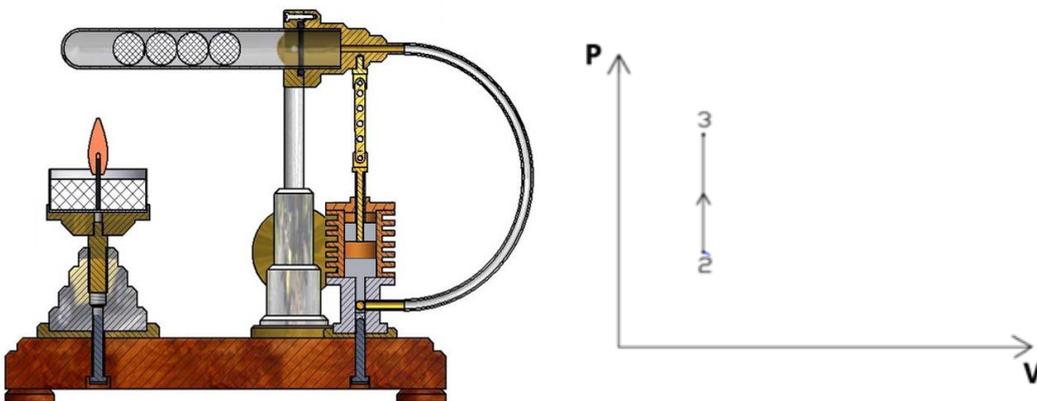
$V_2 \rightarrow$ Volume final

$T_1 \rightarrow$ Temperatura inicial

$T_2 \rightarrow$ Temperatura final

1. Aquecimento isovolumétrico (2 → 3): Ocorre a volume constante e envolve transferência de calor da fonte quente para o ar contido dentro do cilindro do motor, como representado na figura 14. O calor (Q_{23}) é absorvido pelo fluido de trabalho e a temperatura é aumentada de (T_C) para (T_H). Nenhum trabalho é feito. A pressão e a temperatura do gás aumentam durante esta fase. O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar através do canal de conexão para o volume quente, onde o gás é aquecido e sua pressão aumenta. Porém é importante notar que o volume nesse processo é constante;

Figura 14- Aquecimento isovolumétrico em motor Stirling.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>.

Matematicamente:

$$V_1 = V_2 \text{ e } T_2 > T_1 \text{ (Aquecimento)}$$

Então:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$$

Observamos que:

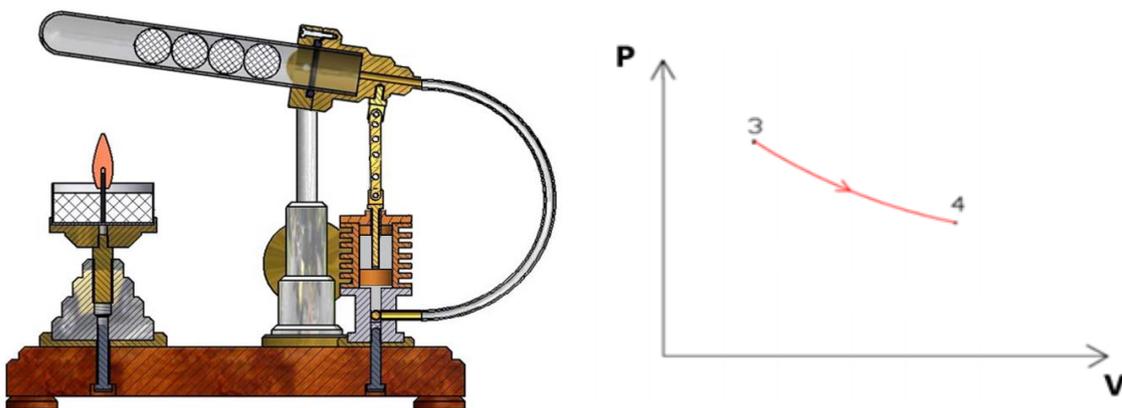
$$P_2 > P_1$$

A função do deslocador (bolinhas de gude):

O volume permanece constante, mas o deslocador, ao descer, envia o gás da parte inferior (fria) para o topo (quente).

2. Expansão isotérmica (3 → 4): O trabalho é realizado pelo gás que presente no motor sofre uma expansão aproximadamente isotérmica, enquanto uma quantidade igual de calor (Q_{34}) é adicionada ao sistema a partir de fontes externas de aquecimento (queima de carvão, velas etc.). O volume aumenta enquanto a pressão diminui, como representado na figura 15. É durante essa transformação que a energia motriz é produzida. Ambos os pistões se movimentam para a direita, devido a expansão do gás. O gás é aquecido pela fonte quente com o objetivo de se obter uma expansão a temperatura constante;

Figura 15- Expansão isotérmica em motor Stirling.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>.

Matematicamente:

$$T_1 = T_2 \text{ e } V_2 > V_1$$

Então:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}$$

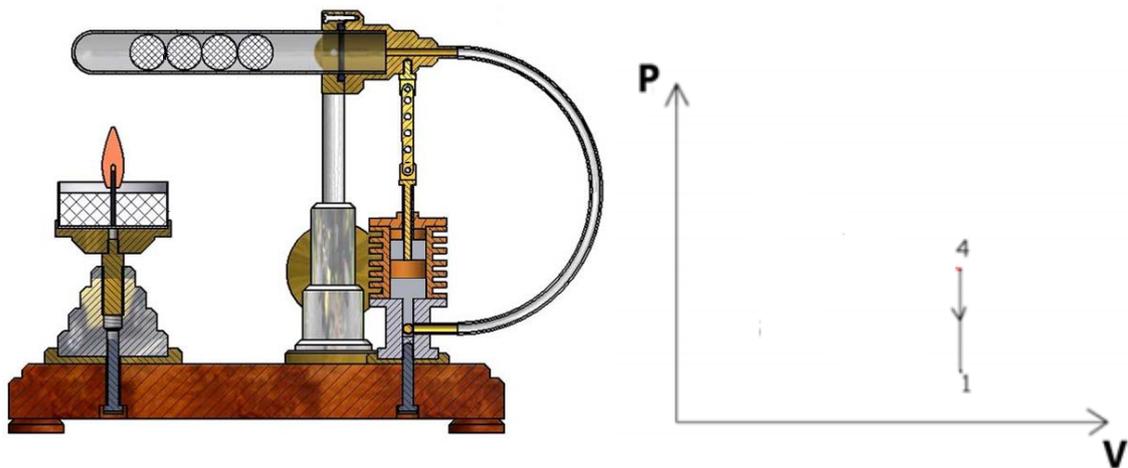
Observamos que:

$$V_2 > V_1, \text{ resulta que } P_2 < P_1$$

Através do gráfico, o estado 3 para o 4 provoca uma redução da pressão sobre o gás. O deslocador (bolinhas de gude) segue o pistão do motor durante a expansão para que o gás permaneça em contato apenas com a fonte quente.

3. Resfriamento isovolumétrico (4 → 1): O gás presente no motor transfere calor para o meio externo, (a fonte fria) recupera energia térmica, mantendo-se a volume constante. O calor (Q_{41}) é rejeitado pelo gás e há redução de temperatura de (T_H) a (T_C). Nenhum trabalho é feito. A temperatura e a pressão diminuem durante esta fase, como representado na figura 16. O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar pelo canal de conexão para o volume frio, onde o gás é resfriado. Quando o gás é resfriado, sua pressão reduz até a pressão inicial. É importante notar que o volume neste processo é constante;

Figura 16- Resfriamento isovolumétrico em motor Stirling.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>.

Matematicamente:

$$V_1 = V_2 \text{ e } T_2 < T_1 \text{ (Resfriamento)}$$

Então:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$$

Observamos que:

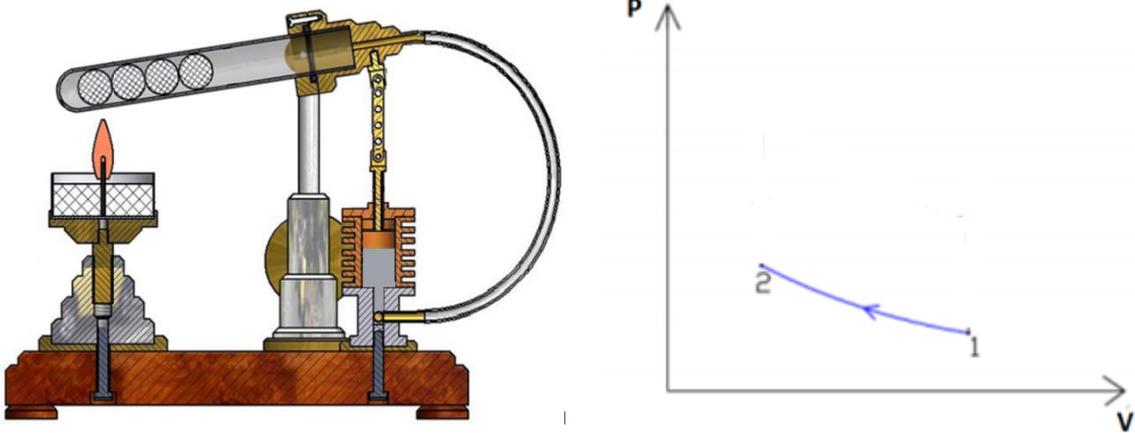
$$P_2 < P_1$$

O volume permanece constante, mas o deslocador (bolinhas de gude), ao subir, envia o gás da parte superior (quente) para a parte inferior (fria).

4. Compressão isotérmica (1 → 2): O trabalho é realizado sobre o gás, enquanto uma quantidade igual de calor (Q_{12}) é rejeitada pelo sistema para a fonte de

resfriamento, nesse processo o gás contido dentro do cilindro do motor é contraído e sua pressão aumenta grandemente, em um processo que ocorre em temperatura constante. O gás esfria e se contrai em temperatura constante (T_c), como representado na figura 17. A pressão do gás aumenta enquanto o seu volume diminui. É preciso fornecer energia mecânica para o gás nesse período. O pistão de trabalho é movimentado para a esquerda e o gás é comprimido. O gás é resfriado, com objetivo de realizar a compressão a temperatura constante;

Figura 17- Compressão isotérmica em motor Stirling.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>.

Matematicamente:

$$T_1 = T_2 \text{ e } V_2 < V_1 \text{ (Compressão)}$$

Então:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}$$

Observamos que:

$$V_2 < V_1, \text{ resulta que } P_2 > P_1$$

O deslocador (bolinha de gude), durante a compressão, permanece no topo para que o gás esteja sempre em contato apenas com a fonte fria.

3.3.1 O rendimento do Motor de Stirling

A eficiência do motor de Stirling pode ser calculada tendo em conta o trabalho líquido ($W_{Líquido}$) e o calor total de aquecimento (Q_{Total}) e assumindo o gás como ideal.

O trabalho líquido é igual a soma do trabalho recuperado (positivo) durante a expansão e o trabalho fornecido (negativo) durante a compressão

$$W_{Líquido} = W_{34} + W_{12}$$

Note que: $W_{34} > 0$ e $W_{12} < 0$.

$$W_{Líquido} = \int_{V_1}^{V_2} P \, dv + \int_{V_2}^{V_1} P \, dv \quad \text{onde} \quad P = \frac{n.R.T}{V}$$

$$W_{Líquido} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n.R.T_H}{V} \, dV + \int_{V_2}^{V_1} \frac{n.R.T_C}{V} \, dV$$

Logo:

$$W_{Líquido} = n.R.(T_H - T_C). \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

O calor de aquecimento é fornecido durante o aquecimento isocórico e durante a expansão isotérmica.

$$Q_{Total} = Q_{23} + Q_{34}$$

Durante a expansão isotérmica, o calor fornecido é igual ao trabalho recuperado durante essa mesma fase:

$$Q_{34} = \int_{V_1}^{V_2} P \, dV$$

$$Q_{34} = n.R.(T_H). \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Durante o aquecimento isocórico, quando o gás é aquecido de T_C para T_H , o calor é fornecido é expresso por:

$$Q_{23} = n.C_v.(T_H - T_C)$$

onde C_v é a capacidade de térmica molar a volume constante do gás.

O calor total fornecido é então:

$$Q_{Total} = n.C_v.(T_H - T_C) + n.R.(T_H). \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Assim a eficiência ou rendimento do ciclo de Stirling

$$\eta = \frac{W_{\text{Líquido}}}{Q_{\text{Total}}}$$

pode ser escrito como

$$\eta = \frac{n \cdot R \cdot (T_H - T_C) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{n \cdot C_v \cdot (T_H - T_C) + n \cdot R \cdot (T_H) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Que resulta em:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \frac{R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{C_v \cdot \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Resultando, portanto, em uma eficiência menor que a do ciclo de Carnot.

Caso a razão V_1/V_2 permaneça constante e as temperaturas T_H e T_C sejam muito próximas a eficiência do ciclo de Stirling se equipara à de Carnot. Isto também ocorre caso a energia útil para o aquecimento isocórico seja inteiramente recuperada durante o resfriamento isocórico por meio de um regenerador, que é um dispositivo que toma energia do fluido de trabalho durante uma parte do ciclo e a devolve de volta integralmente durante outra parte.

Em ambas as aproximações o termo $C_v \cdot (T_H - T_C)$ desaparece e a eficiência torna-se:

$$\eta \approx \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right)$$

Na realidade, a eficiência do motor Stirling será sempre inferior à eficiência do ciclo Carnot.

4 O ENSINO DA TERMODINÂMICA POR INVESTIGAÇÃO

4.1 Sequência didática sobre máquinas térmicas e os três momentos pedagógicos

Com o propósito de aplicar o Ensino por Investigação desenvolvemos uma sequência com várias etapas. para o ensino da 1ª e 2ª leis da termodinâmica, elaboradas em linguagem multimídia. A linguagem multimídia possibilita o uso de diferentes mídias, textos, sons, imagens, vídeos e simulações, numa única tecnologia de apresentação e está presente na vida dos alunos através do seu convívio com celulares e computadores, etc.

Nossa metodologia foi elaborada em torno do motor de Stirling e de seu funcionamento e se fundamenta na teoria da Mediação, de Vygotsky e na metodologia de Delizoicov e Angotti (1994). Esta última é estruturada em três momentos pedagógicos distintos: (i) problematização inicial; (ii) organização do conhecimento; e (iii) aplicação do conhecimento.

4.1.1 Primeiro Momento Pedagógico: Problematização inicial

No primeiro momento, trataremos da problematização inicial. Os discentes, observando os fenômenos físicos existentes em vídeos e simulações, irão utilizar seus conceitos intuitivos, com base no que já sabem ou não, para relacionar os fenômenos observados com aplicações do cotidiano. Esta etapa é caracterizada pela compreensão e apreensão da posição dos alunos frente ao conteúdo que será estudado, tendo o professor papel relevante nas discussões. No primeiro momento:

São apresentadas questões e/ou situações para discussão com os alunos. Sua função, mais do que simples motivação para se introduzir um conteúdo específico, é fazer a ligação desse conteúdo com situações reais que os alunos conhecem e presenciam, para as quais provavelmente não dispõem de conhecimentos científicos suficientes para interpretar total ou corretamente. (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p.54).

A problematização e as discussões colocam em xeque as concepções alternativas que o aluno traz consigo e faz com que este sinta a necessidade de adquirir outros conhecimentos para a resolução do problema proposto, despertando o seu interesse científico.

O professor deve elaborar questões instigadoras na forma de pequenos desafios e apresentá-las aos alunos, ou seja, lançar mais perguntas do que fornecer respostas, incentivando os discentes a buscarem meios para resolver os problemas, estimulando-os a interagirem entre si e com o conteúdo em estudo (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994). A figura 18 apresenta alguns slides que compõem a sequência didática no primeiro momento pedagógico.

Figura 18- Slides do primeiro momento pedagógico.

<p>MNPEF Ministério Nacional Profissional do Ensino de Física</p> <p>SBF SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA</p> <p>Aula 1: 1ª Lei da Termodinâmica</p> <p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA</p>	<p>Observe o vídeo:</p> 
<p>Vamos ver novamente!</p> 	<p>Para pensar!</p> <ul style="list-style-type: none"> • O movimento se dá quando há aquecimento? • O ar no interior do sistema (tubo de ensaio, mangueira e seringa) aumenta de volume? E a pressão varia? Como? • Quando as bolinhas vão para o fundo do tubo de ensaio o volume do ar diminui? Por quê? • A energia é criada, destruída ou transformada? • Existe realização de Trabalho? • Poderia ser uma Máquina Térmica?

Fonte: O autor (2018).

4.1.2 Segundo Momento Pedagógico: Organização do conhecimento

Neste momento, “o conhecimento em Ciências Naturais, necessário para a compreensão do tema e da problematização inicial, será sistematicamente estudado sob orientação do professor” (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p.55).

A figura 19 apresenta slides que compõem a sequência didática no segundo momento pedagógico.

Figura 19- Slides do segundo momento pedagógico.

Organizando as ideias!

4. Compressão isotérmica (1 → 2): O trabalho é realizado sobre o gás, enquanto uma quantidade igual de calor (Q_{21}) é rejeitada pelo sistema para a fonte de reservatório, nesse processo o gás mantém dentro do cilindro do motor a constante a sua pressão absoluta gradualmente, em um processo que ocorre em temperatura constante (T_2). A pressão do gás aumenta enquanto o seu volume diminui. É preciso fornecer energia mecânica para o gás nesse período. O ponto de trabalho é incrementado para a esquerda e o gás é comprimido. O gás é comprimido, com objetivo de realizar a compressão a temperatura constante.

Ciclo de Stirling

Podemos construir internamente processos termodinâmicos de modo que formem um ciclo fechado, você tem isso durante um motor dos automóveis que opera em quatro tempos e outro estado.

Neste caso é o motor de Stirling, ele é uma combinação de quatro processos termodinâmicos reversíveis, ou seja, quatro tempos de funcionamento, o sistema e a vibração retornam ao seu estado inicial depois de completado o ciclo.

Organizando as ideias!

Fonte: O autor (2018).

Neste momento são apresentados e definidos os conceitos desenvolvimento na disciplina. Podem ser utilizadas várias técnicas de ensino de modo que os estudantes se apropriem do conhecimento científico (conceitos, definições, leis e relações.) e possam ser capazes de responder às questões estabelecidas na problematização inicial, expandindo seus conhecimentos para melhor interpretar e aplicar o seu conhecimento para a interpretação dos fenômenos.

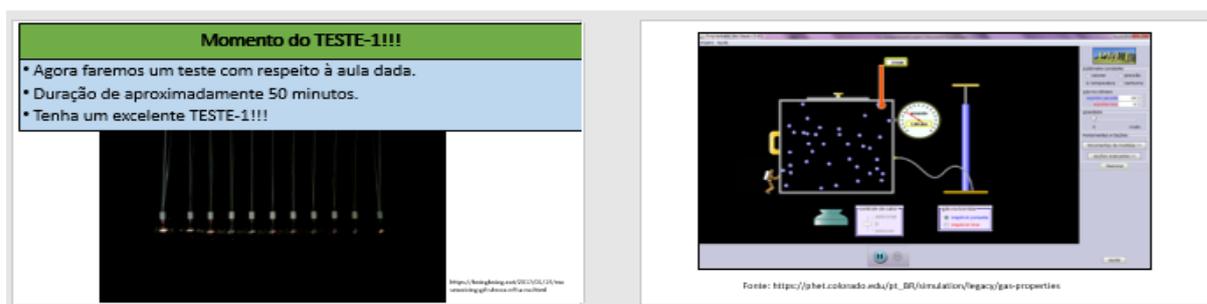
4.1.3 Terceiro Momento Pedagógico: Aplicação do conhecimento

O objetivo deste momento é aplicar o conhecimento, que foi construído na problematização inicial, em situações que podem ser compreendidas e sustentadas por meio do aprendizado em questão. De acordo com os autores, este momento:

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram o seu estudo, como outras situações que não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p.55).

Apresentamos na figura 20 slides que compõem o terceiro momento pedagógico da sequência didática. Da mesma maneira que no segundo momento pedagógico, diversas técnicas de ensino podem ser aplicadas nesse momento. Pode-se, por exemplo, verificar através das retomadas das questões e da situação problema inicial, se houve uma mudança na elaboração das respostas ou se foi possível a resolução de questões que antes não puderam ser respondidas. Não há uma obrigação de uma resposta objetiva para todas as perguntas, pois não se garante a resolução de todas as questões com o conhecimento adquirido até o momento, o mais importante é buscar a reflexão ou o discernimento para a interpretação dos fenômenos no nosso cotidiano (DELIZOIVOV; ANGOTTI, 1994).

Figura 20- Slides do terceiro momento pedagógico.



Fonte: O autor (2018).

4.2 A Teoria da mediação de Vygotsky e o Ensino de Física

A opção pela linguagem multimídia se apoia na teoria do desenvolvimento cognitivo de Vygotsky, que se caracteriza em ser mediadora e construtivista, bem como a sua importância para o entendimento de como a aprendizagem se consolida na mente através das relações sociais e culturais.

Segundo Vygotsky, o desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais. Mas isso só acontece através da mediação que acarreta na internalização de experiências ou atividades e comportamentos sociais, históricos

e culturais. Tal fato acontece indiretamente, sendo mediada por meio dos instrumentos e signos. Os Instrumentos são tudo aquilo que pode ser usado para fazer ou executar alguma coisa, ampliando as possibilidades do homem perante ao mundo. Os signos são algo que significa alguma coisa diferente de si mesmo e são exclusivamente humanos (MOREIRA, 2017).

A linguagem é toda composta de signos, alguns objetos que observamos concretamente não são impossíveis ao homem imaginá-los sem vê-los, é justamente essa capacidade de construções mentais, a abstração, que é fundamental para a aquisição do conhecimento.

A diferença dos animais para nós é que construímos palavras, sons com significados e a linguagem em si, uma estrutura lógica que possibilita a comunicação entre indivíduos (GASPAR, 2014).

Segundo Vygotsky (2001), aqueles que possuem conhecimento, o transferem para aqueles que querem adquiri-los por meio da linguagem. Pensando no ensino, Vygotsky destaca que o professor é importante para a aprendizagem, devido ao fato de ser uma peça fundamental entre o aluno e o conhecimento, sendo o responsável por fazer o estudante ter uma compreensão clara e sólida do processo estudado. É através das interações alunos-alunos, professor-alunos e aluno-objeto de conhecimento que se torna possível a construção mental de um modelo para a situação problema e sua internalização, ou seja, o desenvolvimento cognitivo, a aprendizagem é uma atividade conjunta, mas os momentos de internalização são reflexivos e individuais.

Para Vygotsky:

“O aprendizado adequadamente organizado resulta em desenvolvimento mental e põe em movimento vários processos de desenvolvimento que, de outra forma, seriam impossíveis de acontecer” (VYGOTSKY, 1991, p.101).

Os estudantes devem construir suas próprias ideias por meio das interações sociais, mas com a ajuda de pessoas experientes para compreenderem com a internalização na estruturação da aprendizagem se o significado que atribuiu para o signo é socialmente aceito. Segundo Moreira (2017), o conhecimento é forjado externamente, através das relações sociais, para depois ser internalizado. Quanto mais signos e instrumentos forem utilizados e apreendidos, mais desenvolvidas se tornam as funções mentais superiores.

Para Vygotsky (2001), os experimentos teriam o objetivo de iluminar os processos, sendo que a metodologia experimental deveria oferecer oportunidades de diversas atividades observadas ao invés de serem rigidamente controladas. Nesse sentido as ações são mais importantes do que as soluções (DRISCOLL, 1995 apud MOREIRA, 2017).

Para Gaspar (2005) a teoria de Vygotsky para o processo de ensino e aprendizagem se resume em uma analogia: A transferência cognitiva de um conceito citado pelo professor aos seus alunos pode ser relacionada à uma transferência de um programa de um computador para outro. Como ocorre entre computadores ordenados por impulsos eletromagnéticos, entre o professor e o aluno esse fenômeno não ocorre diretamente. Por não ocorrer diretamente a forma pela qual o aluno pode receber o “programa” do professor, o meio que possibilita essa informação entre o professor e o aluno seria a linguagem, intervenção verbal e simbólica usada na transferência. Diferentemente dos computadores, o cérebro humano constrói a memória de que precisa enquanto instala o programa, as estruturas cognitivas vão sendo criadas em nossa mente à medida que o conceito é ensinado ou está sendo aprendido (GASPAR, 2005).

A ferramenta cognitiva para esse processo segundo Vygotsky é a imitação, e a necessidade indispensável do parceiro mais capaz:

“A imitação, se concebida no sentido amplo, é a forma principal em que se realiza a influência da aprendizagem sobre o desenvolvimento. A aprendizagem da fala, a aprendizagem na escola se organiza amplamente com base na imitação. Porque na escola a criança não aprende o que sabe fazer sozinha, mas o que ainda não sabe e lhe vem a ser acessível em colaboração com o professor e sob sua orientação” (VYGOTSKY, 2001, p. 331).

Resumindo, para que essa colaboração seja possível, através da interação social, devem existir parceiros mais capazes que possuem o conhecimento e o transfiram aos parceiros menos capazes que o almejam (GASPAR, 2005).

4.3 Aprendizagem Significativa e Mapas Conceituais

A teoria de Ausubel da aprendizagem é dita significativa quando um novo conceito adquire novos significados através de estruturas cognitivas preexistentes no indivíduo, conhecidas como subsunçores. Esses ancoradouros para a nova informação são responsáveis pela interação entre o novo conhecimento e o que já existia, que em consequência acaba sendo modificado. À medida que o conhecimento prévio do assunto, ou do conceito, serve de base para a assimilação de novos significados, ele também se modifica se tornando cada vez mais estável devido ao fato de novos subsunçores se formarem e interagirem entre si, reestruturando o conhecimento e acarretando na aprendizagem significativa (MOREIRA, 2010).

O estudante deve ter vontade de aprender, a aprendizagem será mecânica se o indivíduo quiser memorizar o conteúdo de forma arbitrária e literalmente. Para ocorrer a aprendizagem significativa o estudante deve ter uma disposição para a aprendizagem, ou seja, disposição para se relacionar com o novo conhecimento.

Uma aprendizagem na qual não existe uma atribuição de significados ao novo conhecimento que permitam relacioná-lo com os conhecimentos preexistentes, é mecânica, não significativa. Esse tipo de aprendizagem é temporária, pois, o conhecimento foi armazenado de maneira arbitrária na mente do indivíduo. Esse conhecimento não irá interagir com a estrutura cognitiva existente na mente do indivíduo e, como dito acima, o novo conhecimento não servirá de base para a atribuição de novos significados aos conhecimentos anteriores.

Na aprendizagem significativa, Moreira (2010) salienta que os conceitos interagem com os novos conteúdos, sustentando na atribuição de novos significados que também se modificam. Essa mudança é progressiva, resultando em um subsunçor mais elaborado, capaz de servir de âncora para a aquisição de novos conhecimentos, processo este que Ausubel chama de diferenciação progressiva.

Na aprendizagem significativa, também ocorre o estabelecimento de relações entre conceitos, ou seja, elementos que já existem na estrutura cognitiva com um certo grau de clareza, adquirem novos significados levando a uma nova organização dessa estrutura. Essa recombinação de elementos é referida como reconciliação integrativa.

Na aprendizagem significativa, há uma mudança tanto na nova informação como no subsunçores que se relacionam, resultando na assimilação de significados. Segundo Moreira e Masini (2001) a assimilação ocorre quando um conceito

potencialmente significativo é assimilado sob uma perspectiva mais inclusiva que já existe na estrutura cognitiva do aluno. A assimilação é compreendida como um relacionamento entre os aspectos preexistentes da estrutura cognitiva e a nova informação que são modificadas no processo. A teoria ausubeliana apresenta três formas de aprendizagem significativa: a subordinada, superordenada e a combinatória.

Para Ausubel, a maior incidência de aprendizagem significativa se dá no tipo subordinada. A nova ideia aprendida se encontra hierarquicamente subordinada a ideia que já existe. Coll, Marchesi e Palácios (2007) destacam que a estrutura cognitiva está organizada hierarquicamente e os conceitos se conectam entre si através das relações de subordinação, indo dos mais gerais aos mais específicos.

Para Ausubel, Novak e Hanesian (1980) a nova aprendizagem será superordenada quando se aprende uma nova proposição que acarreta no surgimento de várias ideias ou conceitos, ocorrendo organização indutiva ou envolvendo a síntese de ideias compostas.

Na forma combinatória o novo conceito é mais amplo e inclusivo que os conceitos subsunçores anteriores. Observa-se essa forma quando um conceito mais geral, do que alguns já estabelecidos, é adquirido e passa a ser assimilado. A aprendizagem de novas proposições que não apresentam relação subordinada nem superordenada com ideias relevantes já adquiridas anteriormente na estrutura cognitiva do estudante é denominada aprendizagem combinatória. Na aprendizagem significativa combinatória, a ideia nova e as ideias já estabelecidas não se relacionam hierarquicamente, mas se encontram no mesmo nível de hierarquia, não sendo nem mais e nem menos específica e inclusiva do que outras ideias. Diferentemente das proposições subordinadas e superordenadas, a combinatória não se relaciona a nenhuma ideia particular da estrutura cognitiva (POZO,1998).

Existem várias alternativas para averiguarmos a ocorrência da aprendizagem significativa, como atividades de aprendizagem sequencialmente vinculadas, servindo de apoio a etapas posteriores da atividade, resolução de problemas e a utilização dos mapas. A atividade educativa do professor deverá focar no desenvolvimento cognitivo dos estudantes, priorizando os conhecimentos prévios, servindo assim de ancoragem para as novas ideias e conceitos, constituindo a base fundamental para do processo de aprendizagem (MOREIRA E MASINI, 2001).

Uma estratégia para verificação da aprendizagem significativa está no uso dos mapas conceituais, entendido por Moreira e Buchweitz (1993) como instrumento didático que mostra as relações entre os conceitos que são ensinados e aprendidos.

Os mapas conceituais foram desenvolvidos na década de 1970 por Joseph Novak e seus colaboradores, na Universidade de Cornell nos Estados Unidos, e decorre da teoria cognitivista de David Paul Ausubel, criada em 1963.

Mapas Conceituais podem ser usados em várias ocasiões com objetivos diferentes, como: identificar a estrutura dos conceitos aceitos e os subsunçores, organizar o conteúdo, ensinar; ou seja, mapas conceituais podem ser usados tanto no processo de ensino-aprendizagem como em processos avaliativos, sendo uma rica e poderosa ferramenta para o professor mediador.

Segundo Moreira (2010), não existe um mapa conceitual correto, o que existe são evidências de certas organizações de significados que são aceitos no contexto do conteúdo abordado. Mapas conceituais são instrumentos distintos e não faz muito sentido termos o mapa “correto”, na ideia de avaliarmos como uma prova tradicional. Para Moreira (2010) a análise dos mapas é puramente qualitativa.

Apesar de os mapas de conceitos estarem bem relacionados com a teoria cognitivista de Ausubel, eles possuem um caráter diferente da Aprendizagem Significativa. Deve-se tomar cuidado com a elaboração desses mapas devido ao fato de que através de uma má utilização de sua elaboração ou desenvolvimento, ele pode acarretar na aprendizagem mecânica, um processo de memorização, perdendo o foco da aprendizagem significativa que é o objetivo em questão. Uma simples definição dos mapas conceituais é que são relações significativas com hierarquias de conceitos, que não buscam classifica-los, mas sim relacioná-los e hierarquizá-los (MOREIRA, 2010).

Não há regras fixadas para traçar os mapas. O importante é que o mapa seja um instrumento capaz de mostrar e evidenciar os significados atribuídos aos conceitos juntamente com suas relações em uma dada disciplina.

Os mapas conceituais podem ser usados para mostrar relações significativas entre conceitos ensinados em uma única aula, em uma unidade de estudo ou em um curso inteiro. São representações concisas das estruturas conceituais que estão sendo ensinadas e, como tal, provavelmente facilitam a aprendizagem dessas estruturas. Entretanto, diferentemente de outros materiais didáticos, mapas conceituais não são autoinstrutivos: devem ser explicados pelo professor. Além disso, embora possam ser usados para dar uma visão geral do tema em estudo, é preferível usá-los quando os alunos já têm certa familiaridade com o assunto, de modo que sejam potencialmente significativos e permitam a integração, reconciliação e diferenciação de significados de conceitos (MOREIRA, 2010, p. 17).

Na construção de mapas conceituais que possibilitem uma estruturação hierárquica dos conceitos, tanto por diferenciação progressiva quanto por reconciliação integrativa, sendo o princípio da diferenciação progressiva que se baseia na maneira hierárquica, indo das ideias mais gerais para as mais específicas, enquanto no princípio da reconciliação integrativa, consiste basicamente no delineamento explícito das relações entre ideias.

Quando os alunos usam mapas conceituais para realizar ligações cruzadas, reconciliar e diferenciar conceitos, eles estarão usando o mapeamento conceitual como um recurso de aprendizagem.

O princípio de Ausubel da diferenciação progressiva estabelece que a aprendizagem significativa é um processo contínuo, no qual novos conceitos adquirem maior significado à medida que são alcançadas novas relações (ligações preposicionais). Assim, os conceitos nunca são “finalmente aprendidos”, mas sim permanentemente enriquecidos, modificados e tornados mais explícitos e inclusivos à medida que se forem progressivamente diferenciando. A aprendizagem é o resultado de uma mudança do significado da experiência, e os mapas conceituais são um método de mostrar, tanto ao aluno como ao professor, que ocorreu realmente uma reorganização cognitiva (NOVAK; GOWIN, 1996, p. 114).

Mapas conceituais podem ser utilizados como instrumentos de avaliação da aprendizagem, com o objetivo de obter uma visualização da organização que o aprendiz atribui a determinado conceito. Para Moreira (2010), é na interação social mediada pelo professor, decorrente da construção pelos colegas dos mapas conceituais, que está o maior potencial como estratégia facilitadora da aprendizagem significativa.

Novak e Gowin (1996) observam que com a exposição de hierarquias no mapa indicia a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. Através da ligação de

conceitos podemos observar a ocorrência da reconciliação integrativa. Moreira (2010) afirma que na explicação do mapa elaborado pelo aluno, quando este realizar os movimentos de sobe e desce nas hierarquias conceituais, esse processo também pode indicar a reconciliação integrativa. Os mapas conceituais se apresentam como um importante instrumento para avaliar a aprendizagem significativa, porém não sendo é a única ferramenta para este fim. Sua utilização pode levar a pensar que se trata de uma fórmula de aplicação, contudo, segundo Novak e Gowin (1996) é preciso ser enquadrado como um modelo.

5 METODOLOGIA

A sequência didática foi aplicada nas segunda e terceira semanas do mês de maio do ano de 2017 em turmas do ensino médio de um colégio particular da cidade de Viçosa – MG. Participaram duas turmas do 2º ano (A e B), totalizando 57 alunos, e duas turmas do 3º ano (A e B), totalizando 42 alunos, ambas em regime bimestral e integral. A carga horária semanal das turmas do 2º ano (A e B) era de cinco aulas semanais enquanto a das turmas do 3º ano (A e B) era de quatro aulas semanais, sendo que, nestas últimas as aulas eram de caráter revisional, visto que os estudantes já haviam visto o conteúdo no ano anterior, quando cursavam o 2º ano.

A sequência didática foi aplicada dividida em cinco etapas, distribuídas em oito aulas de cinquenta minutos.

Abaixo temos o cronograma das etapas e das aulas da sequência didática, figura 21.

Figura 21- Cronograma das etapas e das aulas da sequência didática.

1ª Etapa	1ª Aula	Aula referente à 1ª Lei da Termodinâmica, utilizando mídias e vídeos, baseada nos dois primeiros momentos de Delizoicov e Angotti (1994), com duração de 50 minutos.
	2ª Aula	Continuação da aula da 1ª Lei da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.
2ª Etapa	3ª Aula	Passa no terceiro momento de Delizoicov e Angotti (1994) que é a aplicação do conhecimento. Aplicamos um teste tradicional referente às duas primeiras aulas que abordaram o assunto da 1ª Lei da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.

3ª Etapa	4ª Aula	Mesmo processo que utilizamos na 1ª Etapa, nas 1ª e 2ª aulas, a problematização e organização do conhecimento. Nessa etapa abordamos a 2ª Lei da Termodinâmica, através dos conceitos iniciais estudados na 1ª lei da Termodinâmica que foram fundamentais para a continuação desse estudo, com duração de 50 minutos.
	5ª Aula	Continuação da aula referente a 2ª Lei da Termodinâmica, apresentamos e desenvolvemos o Ciclo de Stirling, pouco usado nos livros de Física do Ensino Médio, com duração de 50 minutos.
4ª Etapa	6ª Aula	Mesmo processo que utilizamos na 2ª Etapa, na 3ª aula, que foi o terceiro momento, objetivando aplicar o conhecimento, foi apresentado o conceito de Mapas Conceituais, um breve histórico sobre a sua origem, explicitando a sua importância como ferramenta de aprendizagem, com duração de 50 minutos.
	7ª Aula	Produção dos Mapas Conceituais pelos alunos individualmente sobre as Leis da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.
5ª Etapa	8ª Aula	Foi realizado um teste tradicional envolvendo as Leis da Termodinâmica, ou seja, todo o conteúdo estudado, com duração de 50 minutos.

Fonte: O autor (2018).

Na primeira etapa, inserida nas duas primeiras aulas, ocorreu a apresentação do projeto, a problematização e o momento de discussões entre os alunos e a organização do conhecimento. Nesta etapa ocorreu a apresentação dos conteúdos e conceitos associados à 1ª Lei da Termodinâmica, como atualmente são compreendidos pela ciência e como posto nos livros didáticos.

A segunda etapa, ocorrida na terceira aula, se constituiu de uma avaliação da primeira etapa, por meio da aplicação de um teste referente aos conteúdos e método utilizado na abordagem da 1ª Lei da Termodinâmica. Com a intenção de tornar a avaliação uma situação de aprendizagem, as questões do teste foram elaboradas remetendo os estudantes à questão problematizadora inicial, suscitando a contínua revisão dos conceitos. As questões também precisavam permitir inferir informações sobre a aprendizagem do conteúdo, sobre a aceitação da contextualização proposta na problematização e verificar se os alunos estabeleceram correlação entre a problemática e os conteúdos expostos pelo professor.

Na terceira etapa, quarta e quinta aulas, as turmas foram expostas novamente à problematização seguida de discussão focada na máquina térmica. Na organização do conhecimento foram introduzidos conteúdos e os conceitos da 2ª Lei da Termodinâmica.

A quarta etapa envolveu a sexta e sétimas aulas. Utilizou-se a sexta aula para apresentação do conceito de mapas conceituais, explicitando a sua importância como ferramenta de aprendizagem e de avaliação e explanando sobre seu histórico e origem. Na sétima aula, os alunos produziram individualmente mapas conceituais sobre as Leis da Termodinâmica.

Na quinta e última etapa, oitava aula, foi realizado um teste tradicional envolvendo as Leis da Termodinâmica.

Portanto, os discentes realizaram três avaliações: duas de caráter formativo (tradicionais) e uma avaliação somativa (mapas conceituais).

Os instrumentos de coletas de dados foram:

- O teste baseado na aula dada na primeira etapa, aplicado na segunda etapa, terceira aula;
- Os mapas de conceitos elaborados individualmente pelos alunos;
- Um teste tradicional envolvendo as duas Leis da Termodinâmica.

Ao final de todas as etapas da sequência abordada, foi feito um registro com a manifestação dos estudantes a respeito do projeto de pesquisa.

1ª Etapa: 1ª e 2ª aulas

A primeira etapa consistiu-se na apresentação inicial do projeto e logo depois, iniciou-se a aula da 1ª Lei da Termodinâmica baseada nos dois primeiros momentos de Delizoicov e Angotti (1994) que foca na problematização iniciando-se a discussão com questões instigadoras, na forma de pequenos desafios, que para serem solucionados estimulam os alunos a interagirem com as simulações e vídeos indicados no Roteiro de Atividades que se encontra no Apêndice e por meio das situações problemas propostas nos vídeos e simulações tentam estabelecer a relação entre situações do cotidiano e o conteúdo de Física.

Para Borges (2013), a problematização inicial é de extrema importância para o desenvolvimento da construção do conhecimento, destacando que quando os

estudantes ficam em frente ao problema, eles acabam sendo levados a um novo comportamento que leva à reflexão, à discussão e às ações para a possível solução. Para isso, é importante o papel de um professor mediador capaz de elaborar perguntas que não sejam previsíveis e diretas, assim como os problemas propostos.

As questões apresentadas devem proporcionar momentos de discussão, nos quais os alunos sejam capazes de identificar através dos seus conceitos intuitivos, com base no que já sabem ou não e aplicar as leis da Física utilizadas na interpretação e explicação dos fenômenos estudados compreendendo os conceitos propostos.

Ainda na primeira etapa, entrando no segundo momento pedagógico - que diz: "o conhecimento em Ciências Naturais, necessário para a compreensão do tema e da problematização inicial, será sistematicamente estudado sob orientação do professor." (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p.55) foram apresentados e definidos os conceitos físicos por meio de várias técnicas de ensino de modo que os estudantes se apropriassem do conhecimento científico (conceitos, definições, leis e relações.) e fossem capazes de responder às questões estabelecidas na problematização inicial, expandindo seus conhecimentos para melhor interpretar e aplicar o seu conhecimento para o entendimento dos fenômenos, começando o processo da alfabetização científica.

2ª Etapa: 3ª aula

No terceiro momento, o objetivo é aplicar o conhecimento, que foi construído na problematização inicial, com situações que podem ser compreendidas e sustentadas por meio do aprendizado em questão. De acordo com Delizoicov e Angotti (1994), este momento:

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram o seu estudo, como outras situações que não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p.55).

Nesse momento optamos pela aplicação de um teste tradicional que consta no Apêndice A referente às duas primeiras aulas que abordaram o assunto da 1ª Lei da Termodinâmica, que foi elaborado com base nos processos de aprendizagem em que

avaliamos os alunos em seus aspectos cognitivos, afetivos e relacionais. Para Vygotsky é a interação social, histórico e cultural um dos fatores importantes para o desenvolvimento cognitivo e exclusivo de seres humanos. Para ele, sem um contexto social, histórico e cultural não existiria o desenvolvimento cognitivo (MOREIRA, 2017).

Abaixo segue uma figura das etapas realizadas nas aulas para o ensino da Termodinâmica, figura 22.

Figura 22- Os três momentos pedagógicos.



Fonte: O autor (2018).

3ª Etapa: 4ª e 5ª aulas

Mesmo processo que utilizamos na 1ª Etapa, nas 1ª e 2ª aulas, a problematização e organização do conhecimento.

Nessa etapa abordamos a 2ª Lei da Termodinâmica, através dos conceitos iniciais estudados na 1ª lei da Termodinâmica, que foram fundamentais para a continuação desse estudo. Apresentamos e desenvolvemos um protótipo do Ciclo de Stirling (pouco comentado nos livros do Ensino Médio) através de abordagens históricas, mídias e experimentos da compreensão do funcionamento de uma máquina térmica e seus ciclos termodinâmicos envolvidos.

No Ensino Médio nas aulas de Termodinâmica os alunos estudam os Ciclos Diesel, Otto e o de Carnot. Essa etapa tem a intenção de mostrar aos alunos o Ciclo de Stirling e sua demonstração experimental, construção para o entendimento do que lhes parece abstrato, observando experimentalmente o que foi proposto em teoria, com uma proposta problematizadora e desafiadora sendo o objetivo de fazer os discentes entenderem o funcionamento dos ciclos termodinâmicos das máquinas térmicas e as combinações dos processos termodinâmicos.

4ª Etapa: 6ª e 7ª aulas

Mesmo processo que utilizamos na 2ª Etapa, na 3ª aula, que foi o terceiro momento, com o objetivo foi aplicar o conhecimento que foi construído na problematização inicial, se caracterizando pelo momento de apresentar a nova ferramenta de aprendizagem com caráter de avaliação formativa: os Mapas Conceituais, com o objetivo de identificar os conhecimentos construídos pelos alunos ao longo da sequência didática, avaliar a construção conceitual nas etapas de elaboração dos mapas conceituais, e verificar qual a evolução do conhecimento sobre as Leis da Termodinâmica.

Fraser e Edwards (1985, apud GARCIA, 1992), ao investigarem a correlação entre o uso dos mapas conceituais e o rendimento dos alunos nas avaliações tradicionais de aula, verificaram a existência de uma correlação positiva entre a realização dos mapas pelos alunos e uma melhora nos resultados dos rendimentos finais.

Entende-se como avaliação formativa (PERRENOUD, 1999), uma avaliação realizada durante o desenvolvimento da metodologia, no caso do ensino e da aprendizagem, contínua, não de caráter classificatória, sendo essencial como reposta tanto para o professor quanto para o aluno. Os mapas conceituais, mapas mentais ou diagramas mentais se enquadram nessa definição.

De acordo com a Teoria de Novak (2000), buscaremos nesses mapas conceituais a integração de novos conceitos na estrutura cognitiva do educando, para tanto, ao analisar os mapas estaremos atentos se houve ao longo do processo uma:

- a) Hierarquização dos conceitos;
- b) Diferenciação dos conceitos principais dos secundários – diferenciação progressiva;
- c) Integração dos conceitos a partir do conceito das Leis da Termodinâmica – reconciliação integradora.

Segundo Turns e Atman (2000) o professor pode avaliar um mapa conceitual de duas maneiras:

- a) Pela análise individual do mapa conceitual desenvolvido pelo aluno, observando o número de conceitos representados, o número de ligações entre conceitos, o número

de ligações cruzadas, o número de níveis hierárquicos e o número de exemplos citados;

b) Pela comparação do mapa do aluno com um mapa desenvolvido por um especialista.

Abaixo, nas figuras 23 e 24, seguem os critérios propostos por Souza et al., (2017).

Figura 23- Critérios propostos na avaliação de mapas conceituais.

Crítérios	Descrição dos mapas dos alunos
Conceito	<ul style="list-style-type: none"> • Mapas que apresentaram nenhum conceito relevante; • Conceitos são identificados, mas não se relacionam necessariamente ao tema do mapa proposto; • Conceitos são identificados e estão de acordo com o tema do mapa proposto.
Hierarquização	<ul style="list-style-type: none"> • Os conceitos trabalhados apresentam-se de forma ordenada, podendo distinguir os conceitos mais gerais e o mais específicos mostrando o início de diferenciação progressiva?
Relação entre conceitos	<ul style="list-style-type: none"> • Não existe ligação entre os conceitos mais gerais e os mais específicos; • Existe ligação entre os conceitos gerais e específicos e entre os conceitos específicos.
Clareza ao leitor	<ul style="list-style-type: none"> • Não existe clareza alguma no mapa ao leitor; • O mapa tem clareza de leitura.

Fonte: Souza et al., 2017, p.6.

Figura 24- Pontuação na avaliação de mapas conceituais.

Conceito	2,5 pontos
Hierarquização	2,5 pontos
Relação	2,5 pontos
Clareza	2,5 pontos

Fonte: Souza et al., 2017, p.6.

Mapas conceituais para analisar, com o objetivo de:

- 1) Identificar os conhecimentos construídos pelos alunos ao longo da pesquisa;
- 2) Avaliar a construção conceitual nas etapas de construção dos mapas conceituais;
- 3) Verificar qual a evolução do conhecimento sobre Leis da Termodinâmica.

A partir dessa reflexão sobre as análises dos mapas foi possível adaptarmos para esta pesquisa o que Almeida e Moreira (2008), trazem como parâmetros para a avaliação dos mapas produzidos pelos alunos, cujos critérios são passíveis de serem apresentados em três níveis:

O primeiro nível, muito elaborado mais elevado, e completo que denominamos (A), é composto por mapas que apresentam várias relações de significados e conectores identificados.

Em um segundo nível, mapas conceituais médios (M), encontram-se aqueles que apresentaram boa estrutura conceitual, mas sem identificação de conectores.

E, por último, no terceiro nível estão os mapas conceituais considerados fracos (F), caracterizados como mapas superficiais, menos elaborados, de estruturas bem simples.

5ª Etapa: 8ª aula

Essa etapa consistiu-se de um teste tradicional com a matéria trabalhada na sequência, no caso as Leis da Termodinâmica, sendo uma boa oportunidade para observarmos quantitativamente os resultados, após a aplicação dos mapas conceituais, enquanto ferramenta de ensino e avaliação, e observarmos também como foi o desenvolvimento dos conceitos da Termodinâmica, se realmente foi uma aprendizagem significativa, acarretando na alfabetização científica para cada aluno das quatro turmas em estudo.

5.1 Síntese

Através dessas etapas, analisamos por meio das bases teóricas que fundamentaram a construção da sequência didática o significado que os alunos atribuíram a cada um dos conceitos e como eles incorporaram novos conceitos em sua estrutura cognitiva, se houve uma aprendizagem significativa, através das interações sociais, da organização do conhecimento e das situações problemas que foram lançadas e discutidas ao longo das aulas, estimulando o aluno, favorecendo seus aspectos cognitivos para um bom discernimento dos eventos ou fenômenos que ocorrem na natureza, propiciando alguma alfabetização científica (MATTHEWS, 1994; AULER; DELIZOICOV, 2001; CHASSOT, 2003).

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, apresentaremos os resultados da avaliação da eficácia da sequência didática, desenvolvida para fins deste trabalho, na aprendizagem dos estudantes, a partir dos testes tradicionais e dos mapas conceituais que foram utilizados como instrumentos de aprendizagem e avaliação. Participaram dessa sequência um total de 99 alunos, de uma escola particular da cidade de Viçosa-MG, referentes às turmas dos 2º e 3º anos do Ensino Médio.

A avaliação da sequência teve um enfoque quantitativo e qualitativo. Discutiremos os testes e os mapas conceituais elaborados juntamente com os resultados, observando como os alunos conseguiram hierarquizar, diferenciar, compreender e estruturar as relações entre os conceitos das Leis da Termodinâmica, avaliando a construção conceitual, averiguando se houve uma aprendizagem significativa e se tivemos comprovações de alfabetização científica, além de verificarmos a evolução do conhecimento por parte dos discentes. A seguir descreveremos os resultados e as características das turmas envolvidas no estudo.

6.1 Descrição das turmas e resultados

Turma “2ºA”

Com um total de 28 alunos, a turma “2ºA” mostrou-se motivada em relação ao projeto, de acordo com a percepção do investigador. No início das aulas, durante a problematização apresentada através dos vídeos, muitos alunos se envolveram com o processo, demonstrando interesse em resolver o problema proposto e interagindo entre si.

Alguns alunos, quando questionados se já estudaram tais conteúdos, alegaram que lembravam de alguns conceitos estudados. No início os estudantes não conseguiam relacionar os conteúdos abordados, estabelecendo conexões de maneiras confusas.

No momento da aplicação do Teste 1, após findado o conteúdo da 1ª Lei da Termodinâmica, os alunos demonstraram interesse em resolver os problemas

propostos, mesmo sabendo que a nota não seria computada como parte avaliativa do bimestre.

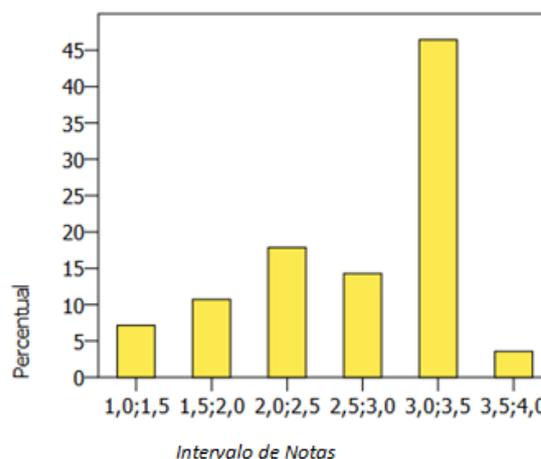
No momento da apresentação da proposta de confecção dos mapas conceituais, logo após a aula da 2ª Lei da Termodinâmica, os alunos alegaram já terem conhecimento sobre tal ferramenta, mas não sabiam o que ela significava. Construíram individualmente seus mapas, explicitando tudo aquilo que entenderam sobre as Leis da Termodinâmica, findado o conteúdo das Leis da Termodinâmica, os alunos foram submetidos ao Teste 2, com características tradicionais, baseado em aspectos conceituais e na resolução de problemas.

A Tabela 1, referente ao Teste 1, mostra em uma escala de 0 até 4,0 pontos, dividida em 8 intervalos de classes correspondentes a 0,5 pontos, o número de alunos em cada intervalo de classe, juntamente com a frequência absoluta e relativa das notas dos estudantes, uma Tabela 1 com as médias, a nota mínima e máxima da turma e um gráfico gerado da Tabela 1 do Teste 1.

Tabela 1: Notas Teste 1 turma 2ªA.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	2	07,14
1,5 – 2,0	3	10,71
2,0 – 2,5	5	17,86
2,5 – 3,0	4	14,29
3,0 – 3,5	13	46,43
3,5 – 4,0	1	03,57
Total	28	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,40	1,20	3,60

Gráfico 1: Resultado Teste 1 turma 2ªA.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados da Tabela 1 mostram uma maior porcentagem de alunos com notas entre 3,0 até 3,5 (46,43 %).

Com notas acima da média, tivemos um total de 18 alunos, o que corresponde à aproximadamente 64,3 % da turma e cerca de 35,7% abaixo da média.

No primeiro momento de avaliação (Teste 1) pudemos observar um resultado bem expressivo positivamente, com um bom rendimento dessa turma, as problematizações propostas pelo professor, pela linguagem envolvida no desenvolvimento da sequência que atraiu e despertou uma maior atenção dos estudantes no momento do desenvolvimento do estudo da 1ª Lei da Termodinâmica.

A Tabela 2 apresenta o resultado da análise dos mapas conceituais elaborados pelos alunos. Para a avaliação levamos em conta, de acordo com a Teoria de Novak (2000), a integração de novos conceitos na estrutura cognitiva do educando, para tanto, ao analisar os mapas estivemos atentos se houve ao longo do processo uma:

- a) Hierarquização dos conceitos;
- b) Diferenciação dos conceitos principais dos secundários – diferenciação progressiva;
- c) Integração dos conceitos a partir do conceito das Leis da Termodinâmica.

Adaptamos para esta pesquisa o que Almeida e Moreira (2008) trazem como parâmetros para a avaliação dos mapas produzidos pelos pesquisados, cujos critérios são possíveis de serem apresentados em três níveis, conforme descrito no capítulo anterior.

O primeiro nível mais elevado e completo que denominamos (A), são mapas que apresentam várias relações de significados e conectores identificados.

Em um segundo nível os mapas conceituais médios (M), são aqueles que apresentaram boa estrutura conceitual, mas sem identificação de conectores.

E por último os Mapas conceituais considerados fracos (F), estes são mapas conceituais superficiais, pouco elaborados, de estruturas bem simples.

Tabela 2: Resultado dos mapas turma 2ªA.

Categorias	Total	%
A	5	17,8
M	15	53,5
F	8	28,7

A- Muito elaborado;
M- Elaborado;
F- Menos elaborado.

Fonte: Dados da pesquisa.

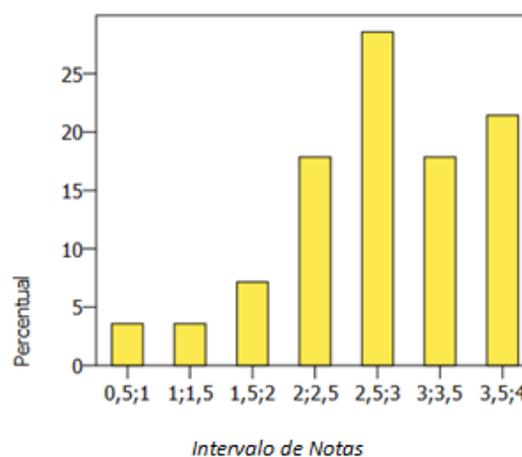
Observamos uma maior concentração na categoria M, cerca de 53,5% souberam sintetizar a natureza dos conceitos envolvidos nas Leis da Termodinâmica, eles utilizaram os subsunçores para mostrar as diferenciações dos conceitos estudados.

Na sequência, a Tabela 3, do Teste 2, mostra em uma escala de 0 até 4,0 pontos, dividida em 8 intervalos de classes correspondentes a 0,5 pontos, o número de alunos em cada intervalo de classe, juntamente com a frequência absoluta e relativa das notas dos estudantes, a Tabela 3 com as médias, a nota mínima e máxima da turma e um gráfico 2 gerado da tabela 3 do Teste 2.

Tabela 3: Notas Teste 2 turma 2^oA.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	1	03,57
1,0 – 1,5	1	03,57
1,5 – 2,0	2	07,14
2,0 – 2,5	5	17,86
2,5 – 3,0	8	28,57
3,0 – 3,5	5	17,86
3,5 – 4,0	6	21,43
Total	28	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,74	0,80	4,00

Gráfico 2: Resultado Teste 2 turma 2^oA.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados da Tabela 3 mostram uma maior porcentagem de alunos com notas entre 2,5 até 3,0 (28,57 %).

Acima da média, tivemos um total de 19 alunos, o que corresponde à aproximadamente 67,8 % da turma e cerca de 32,2% abaixo da média.

No Teste 2, pudemos observar um resultado positivo, novamente um bom rendimento dessa turma e um pequeno aumento depois do desenvolvimento dos mapas conceituais.

Se observarmos a Tabela 1 as notas de 3,5 até 4,0, tínhamos 1 aluno nessa faixa, depois da aplicação dos mapas de conceitos tivemos um aumento significativo para 6 alunos dentro desse intervalo de classe.

Turma “2ºB”

A turma “2ºB” com um total de 29 alunos também estava motivada em relação ao projeto, de modo similar à turma “2A”. Durante a problematização no início das aulas, muitos alunos demonstraram interesse em resolver e explicar o problema proposto, interagindo entre ambos, a estudante M. destacou: *“essas aulas dessa maneira ajudam a gente a entender, é mais interessante para visualizar o fenômeno e coloca a gente pra fazer e debater com os colegas, sendo que um ensina o outro”*.

Questionados sobre se já estudaram tais conteúdos, alegaram que lembravam de alguns conceitos estudados no fundamental, no início os estudantes conseguiam relacionar os conteúdos abordados, estabelecendo relações de uma forma mais tranquila, diferentemente da turma “2A”.

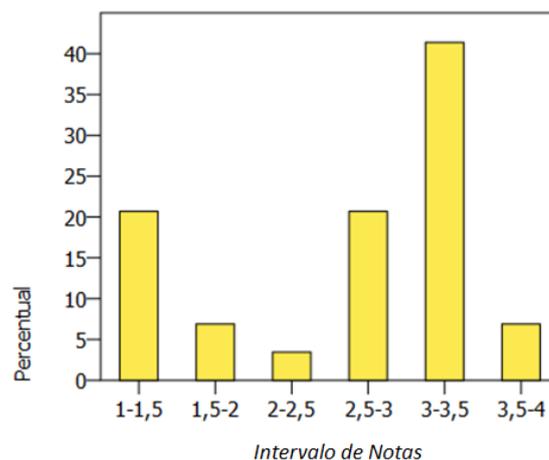
No momento da aplicação do Teste 1, após findado o conteúdo da 1ª Lei da Termodinâmica, a maioria dos alunos demonstraram interesse em resolver os problemas propostos, mesmo sabendo que a nota não seria computada como parte avaliativa do bimestre.

Os dados da Tabela 4 mostram uma maior porcentagem, cerca de 41,38%, de alunos com notas entre 3,0 até 3,5.

Tabela 4: Notas Teste 1 turma 2ºB.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	6	20,69
1,5 – 2,0	2	06,90
2,0 – 2,5	1	03,45
2,5 – 3,0	6	20,69
3,0 – 3,5	12	41,38
3,5 – 4,0	2	06,90
Total	29	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,63	1,20	3,80

Gráfico 3: Resultado Teste 1 turma 2ºB.



Fonte: Dados da pesquisa.

No momento da apresentação dos mapas conceituais para a confecção destes, logo após a aula da 2ª Lei da Termodinâmica, os alunos alegaram já terem conhecimento sobre tal ferramenta, mas não sabiam o que ela significava, construíram individualmente seus mapas, explicitando tudo aquilo que entenderam sobre as Leis da Termodinâmica, findado o conteúdo das Leis da Termodinâmica, os alunos foram submetidos a um Teste 2 tradicional baseado em aspectos conceituais e na resolução de problemas, igual a turma “2A”.

Acima da média tivemos um total de 20 alunos, o que corresponde à aproximadamente 68,9 % da turma e cerca de 31,1% abaixo da média.

Abaixo temos a tabela 5 que apresenta o resumo da avaliação dos mapas conceituais, conforme descrito anteriormente.

Tabela 5: Resultado dos mapas turma 2ºB.

Categorias	Total	%
A	7	24
M	16	55
F	6	21

A- Muito elaborado;
M- Elaborado;
F- Menos elaborado.

Fonte: Dados da pesquisa.

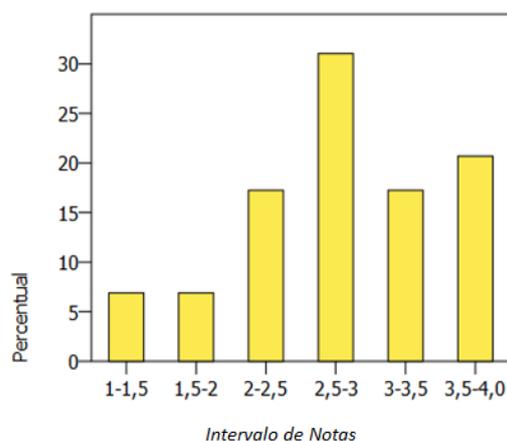
Semelhante à Turma 2^oA, observamos uma maior concentração na categoria M. Cerca de 55,0% souberam sintetizar a natureza dos conceitos envolvidos nas Leis da Termodinâmica, eles utilizaram os subsunçores para mostrar as diferenciações dos conceitos estudados.

A Tabela 6 e o gráfico 4, mostram os resultados do Teste 2 para a Turma 2^oB.

Tabela 6: Notas Teste 2 turma 2^oB.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	2	06,90
1,5 – 2,0	2	06,90
2,0 – 2,5	5	17,24
2,5 – 3,0	9	31,03
3,0 – 3,5	5	17,24
3,5 – 4,0	6	20,69
Total	29	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,77	1,00	4,00

Gráfico 4: Resultado Teste 2 turma 2^oB.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados da Tabela 6 mostram uma maior porcentagem de alunos com notas entre 2,5 até 3,0 (31,03%).

Acima da média, tivemos um total de 20 alunos, o que corresponde à aproximadamente 67,8 % da turma e 9 alunos, o que corresponde a 32,2%, ficaram abaixo da média, mantendo-se o mesmo valor do Teste 1.

No Teste 2, pudemos observar um resultado expressivo, com um bom rendimento dessa turma e um pequeno aumento depois do desenvolvimento dos mapas conceituais.

Se observarmos a tabela 4 as notas de 3,5 até 4,0, tínhamos 2 alunos nessa faixa, depois da aplicação dos mapas de conceitos tivemos um aumento significativo para 8 alunos dentro desse intervalo de classe.

Turma “3ºA”

A turma “3ºA” teve bem menos interesse em desenvolver a sequência didática proposta. Não foram todos os alunos que resolveram participar e demonstraram desinteresse na realização das atividades e na execução dos testes, principalmente na elaboração dos mapas conceituais.

Essa turma já havia estudado os conteúdos abordados na sequência didática no ano anterior. Os alunos alegaram que lembravam de alguns conceitos e no início os conseguiam relembrar os conteúdos abordados, estabelecendo relações de maneira mais tranquila.

Diferentemente das turmas do 2º ano, no momento da aplicação do Teste 1, a maioria dos alunos desta turma não demonstrou interesse em resolver os problemas propostos. Talvez pelo fato de que a nota não seria computada como parte avaliativa do bimestre.

No momento da construção dos mapas conceituais, logo após a aula da 2ª Lei da Termodinâmica, poucos alunos manifestaram interesse e já tinham conhecimento sobre tal ferramenta, mas não sabiam o que ela significava. Mesmo assim, construíram individualmente seus mapas, explicitando tudo aquilo que relembraram sobre as Leis da Termodinâmica. Findado o conteúdo das Leis da Termodinâmica, os alunos foram submetidos 2º teste (tradicional) baseado em aspectos conceituais e na resolução de problemas, igual ao que foi aplicado às turmas “2A” e “2B”.

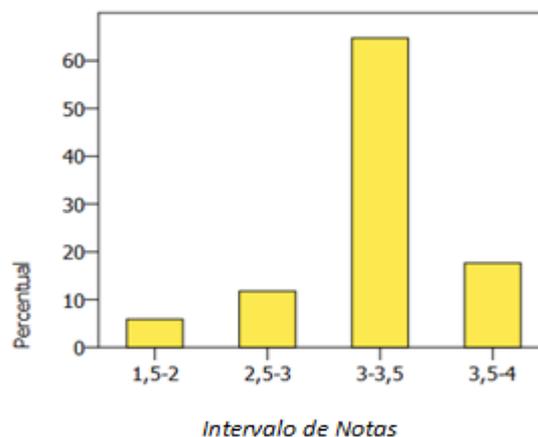
Os dados da Tabela 7 mostram uma maior porcentagem de alunos com notas entre 3,0 até 3,5 (64,71%).

Acima da média, tivemos um total de 16 alunos, o que corresponde à aproximadamente 94,1 % da turma e cerca de 5,9 % ficou abaixo da média.

Tabela 7: Notas Teste 1 turma 3^oA.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	0	0
1,5 – 2,0	1	05,88
2,0 – 2,5	2	11,76
2,5 – 3,0	11	64,71
3,0 – 3,5	3	17,65
3,5 – 4,0	0	0
Total	17	100,0
Média	Mínima	Máxima
3,12	1,80	3,60

Gráfico 5: Resultado Teste 1 turma.



Fonte: Dados da pesquisa.

Esse resultado mostra que os alunos já possuíam um conhecimento prévio sobre o assunto, sintetizaram a natureza dos conceitos envolvidos nas Leis da Termodinâmica.

Tabela 8: Resultado dos mapas turma 3^oA.

Categorias	Total	%
A	2	11,7
M	7	41,2
F	8	47,1

A- Muito elaborado;
M- Elaborado;
F- Menos elaborado.

Fonte: Dados da pesquisa.

Observamos uma maior concentração na categoria F, cerca de 47,1% não souberam sintetizar a natureza dos conceitos envolvidos nas Leis da Termodinâmica, talvez por falta de vontade em construir os mapas conceituais.

Na sequência a Tabela 9 e o gráfico 6 apresentam os resultados do Teste 2 obtidos pela Turma 3B.

Os dados da Tabela 9 mostram uma maior porcentagem de alunos com notas entre 2,0 até 2,5 (47,06 %).

Acima da média, tivemos um total de 9 alunos, o que corresponde à aproximadamente 52,9 % da turma, e cerca de 8 alunos, o que corresponde a 47,1 %, ficaram abaixo da média.

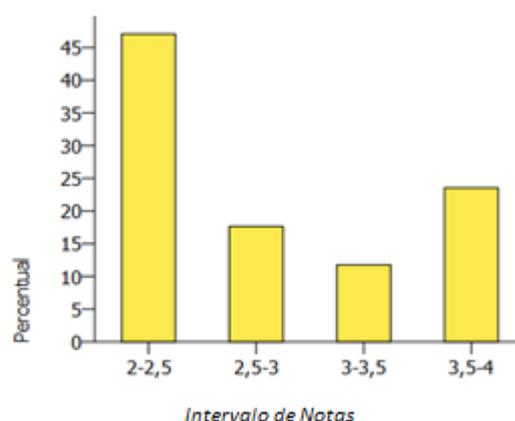
No Teste 2 pudemos observar um resultado ruim, com um péssimo rendimento dessa turma, mesmo depois do desenvolvimento dos mapas conceituais.

Se observarmos a Tabela 8 as notas de 3,5 até 4,0, tínhamos 3 alunos nessa faixa, depois da aplicação dos mapas de conceitos tivemos um aumento para 4 alunos dentro desse intervalo de classe.

Tabela 9: Notas Teste 2 turma 3^oA.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	0	0
1,5 – 2,0	0	0
2,0 – 2,5	8	47,06
2,5 – 3,0	3	17,65
3,0 – 3,5	2	11,76
3,5 – 4,0	4	23,53
Total	17	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,79	2,10	3,60

Gráfico 6: Resultado Teste 2 turma. 3^oA



Fonte: Dados da pesquisa.

Turma “3^oB”

Ao contrário da turma 3^oA, a turma “3^oB” mostrou-se bastante interessada na sequência didática. Todos os alunos participaram da sequência, da execução dos testes e, principalmente, da elaboração dos mapas conceituais, interagindo positivamente e questionando alguns fenômenos físicos já estudados.

Essa turma no ano de 2016, anterior a essa pesquisa, já havia estudado tais conteúdos, alegaram que lembravam de alguns conceitos estudados no ano anterior,

no início os estudantes conseguiam lembrar os conteúdos abordados, fazendo relações de maneiras tranquilas.

No momento da aplicação do Teste 1 os alunos continuaram demonstrando interesse em resolver os problemas propostos, mesmo sabendo que a nota não seria computada como parte avaliativa do bimestre. Comportamento este bem diferente do da turma “3ºA”.

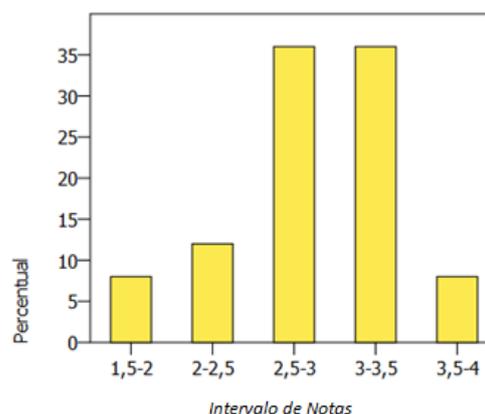
No momento da construção dos mapas conceituais os alunos manifestaram interesse e já tinham conhecimento sobre tal ferramenta, mas não sabiam o que ela significava, construíram individualmente seus mapas, explicitando tudo aquilo que lembraram sobre as Leis da Termodinâmica, findado o conteúdo das Leis da Termodinâmica, os alunos foram submetidos a um Teste 2 tradicional baseado em aspectos conceituais e na resolução de problemas, igual as turmas anteriores.

Os dados da Tabela 10 mostram o mesmo percentual de alunos (36,0%) com notas entre 2,5 até 3,0 e também entre 3,0 até 3,5.

Tabela 10: Notas Teste 1 turma 3ºB.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	0	0
1,5 – 2,0	2	08,00
2,0 – 2,5	3	12,00
2,5 – 3,0	9	36,00
3,0 – 3,5	9	36,00
3,5 – 4,0	2	08,00
Total	25	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,81	1,60	3,60

Gráfico 7: Resultado Teste 1 turma 3ºB.



Fonte: Dados da pesquisa.

Acima da média, tivemos um total de 20 alunos, o que corresponde à aproximadamente 80,0 % da turma e 5 alunos, cerca de 20,0 %, ficaram abaixo da média.

Tabela 11: Resultado dos mapas turma 3ºB.

Categorias	Total	%
A	12	48
M	8	32
F	5	20

A- Muito elaborado;
M- Elaborado;
F- Menos elaborado.

Fonte: Dados da pesquisa.

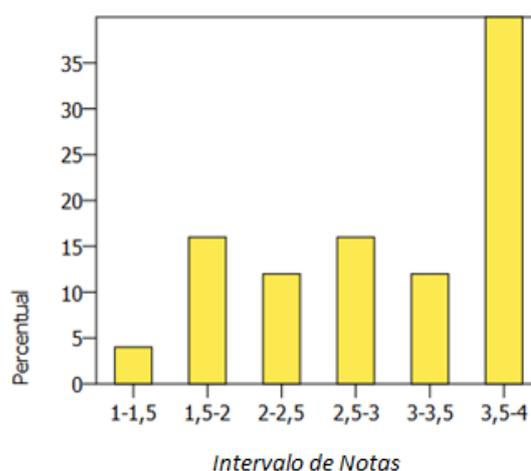
Para turma 3B, observamos uma maior concentração na categoria A. Cerca de 48,0% souberam sintetizar corretamente a natureza dos conceitos envolvidos nas Leis da Termodinâmica.

A Tabela 12 e o gráfico 8 mostram a síntese dos resultados do Teste 2 para a turma 3B.

Tabela 12: Notas Teste 2 turma 3ºB.

Notas		
Intervalos	Frequência	Percentual
0,5 – 1,0	0	0
1,0 – 1,5	1	04,00
1,5 – 2,0	4	16,00
2,0 – 2,5	3	12,00
2,5 – 3,0	4	16,00
3,0 – 3,5	3	12,00
3,5 – 4,0	10	40,00
Total	25	100,0
Média	Mínima	Máxima
2,87	1,30	4,00

Gráfico 8: Resultado Teste 2 turma 3ºB.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados da Tabela 12 mostram uma maior porcentagem (cerca de 40,0 %) de alunos com notas entre 3,5 até 4,0.

Acima da média, tivemos aproximadamente um total de 17 alunos, o que corresponde à aproximadamente 68,0 % da turma e cerca de 8 alunos, o que corresponde a 32,0 %, ficaram abaixo da média.

No Teste 2, pudemos observar a continuidade do bom rendimento dessa turma mesmo depois do desenvolvimento dos mapas conceituais.

Se observarmos a tabela 10, tínhamos dois alunos com notas entre 3,5 e 4,0. Depois da aplicação dos mapas conceituais esse número subiu para 10 alunos.

6.2 Descrição dos Mapas Conceituais construídos pelos estudantes

Nesta seção apresentaremos alguns mapas conceituais elaborados pelos alunos, para mostrarmos o movimento da evolução conceitual dos alunos ao longo do desenvolvimento das atividades. Trata-se de demonstrar como se deu esse processo ao longo das construções dos três mapas conceituais. Para tanto, vamos buscar identificar como os alunos conseguiram hierarquizar, diferenciar e reconciliar os conceitos das Leis da Termodinâmica.

Os mapas foram refeitos no computador, utilizando o programa Cmap Tools, procurando reproduzir fielmente os originais feitos à mão.

Portanto, as figuras seguintes representam mapas elaborados pelos alunos que foram reconstruídos no programa Cmap Tools. Avaliamos os mapas levando em consideração os conceitos envolvidos, a hierarquização do conhecimento, a relação entre os conceitos e a clareza.

A avaliação dos mapas conceituais foi aplicada com a participação dos alunos nas etapas de construção já descritas na metodologia.

Lembramos que as categorias de análise foram:

F – Mapa conceitual fraco;

M – Mapa conceitual médio;

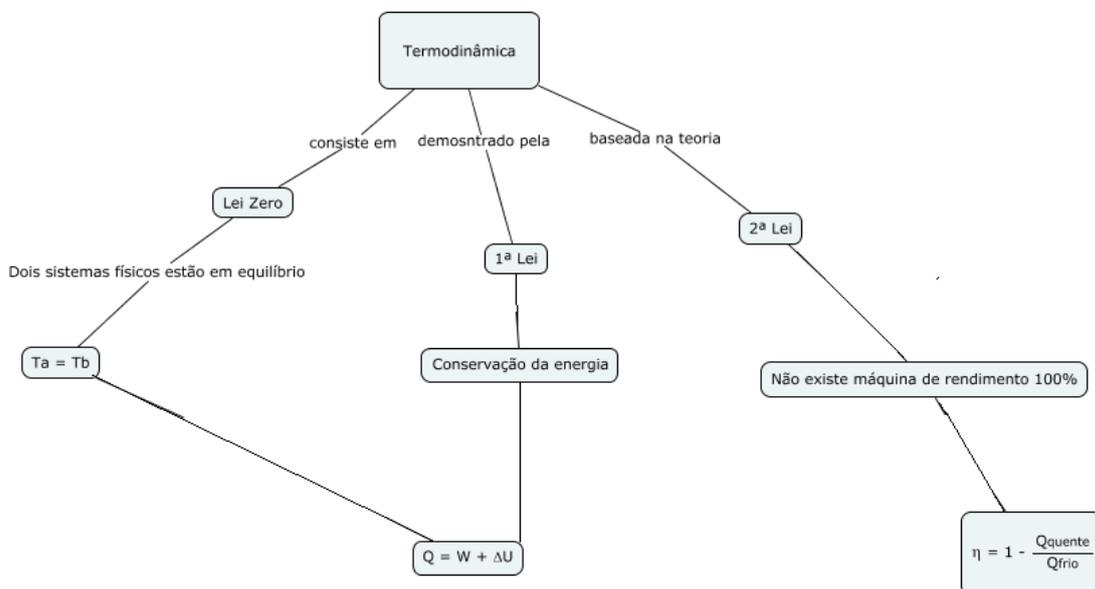
A – Mapa conceitual elevado.

6.2.1 Mapas Conceituais da categoria F

Os mapas conceituais foram categorizados como fracos (F) quando apresentavam conceituação superficial, eram pouco elaborados e de estruturas simples.

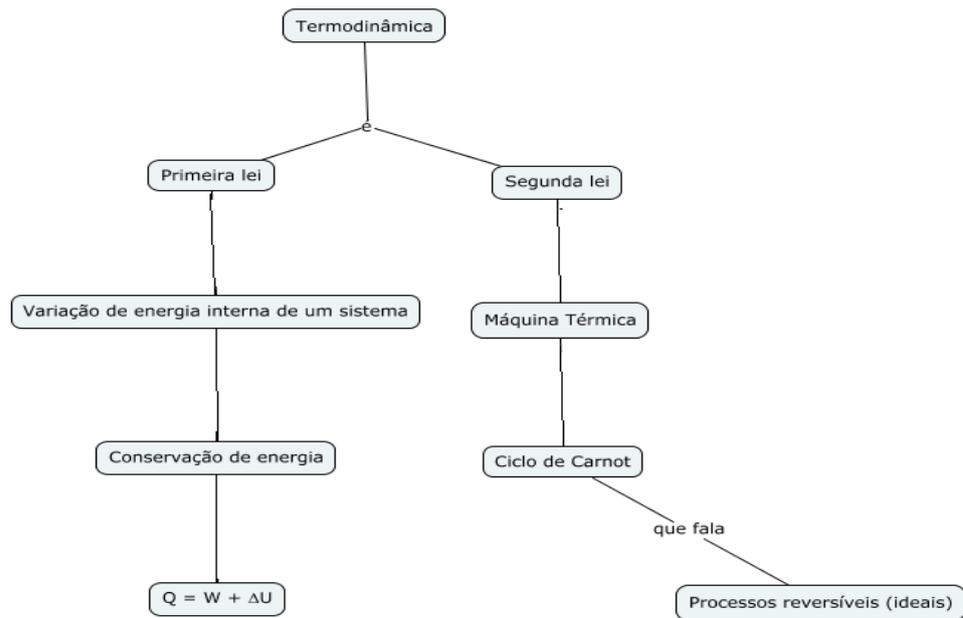
Na sequência apresentamos como exemplos da categoria Fraco os mapas 1, 2, 3 e 4. De acordo com a teoria de Ausubel, mesmo usando alguns subsunçores, apresentam pouca hierarquia conceitual, conseqüentemente os conceitos encontram-se soltos, como se não fossem necessários para o encadeamento conceitual. Dessa maneira, os alunos que construíram esses mapas utilizam subsunçores de modo não adequados, não demonstrando, por exemplo, como que nos processos de transformações de energia ela é sempre conservada. Também não relacionam a primeira Lei da Termodinâmica com o calor. Além disso, observamos também erros conceituais em Física, pouca diferenciação progressiva e utilização apenas de conceitos principais, o que nos leva a supor pouca reconciliação integrativa.

Figura 25- Mapa Conceitual 1.



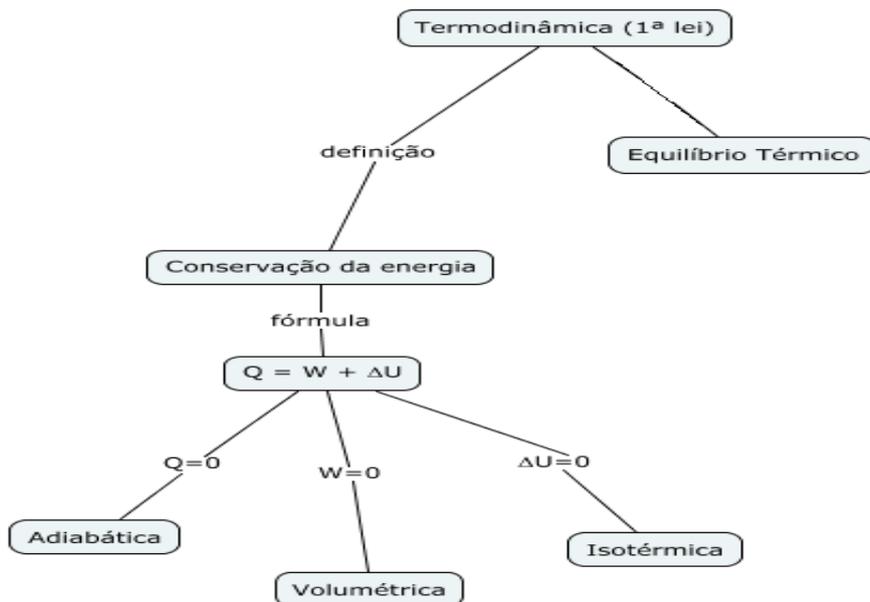
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 26- Mapa Conceitual 2.



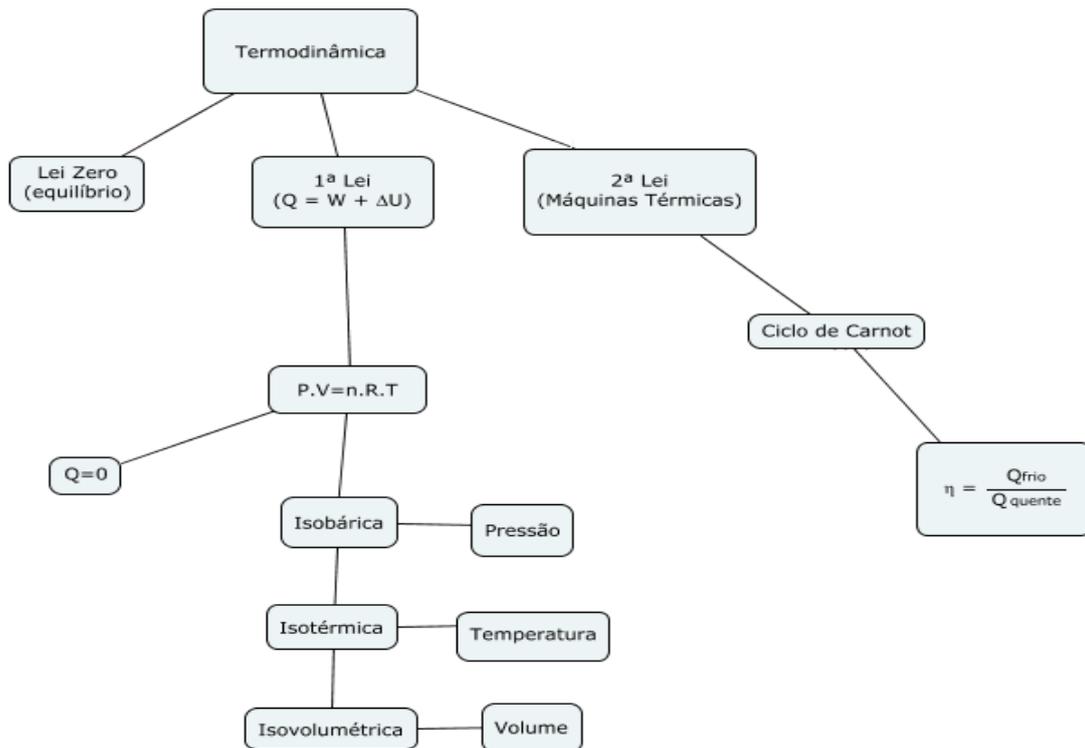
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 27- Mapa Conceitual 3.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 28- Mapa Conceitual 4.



Fonte: Dados da pesquisa.

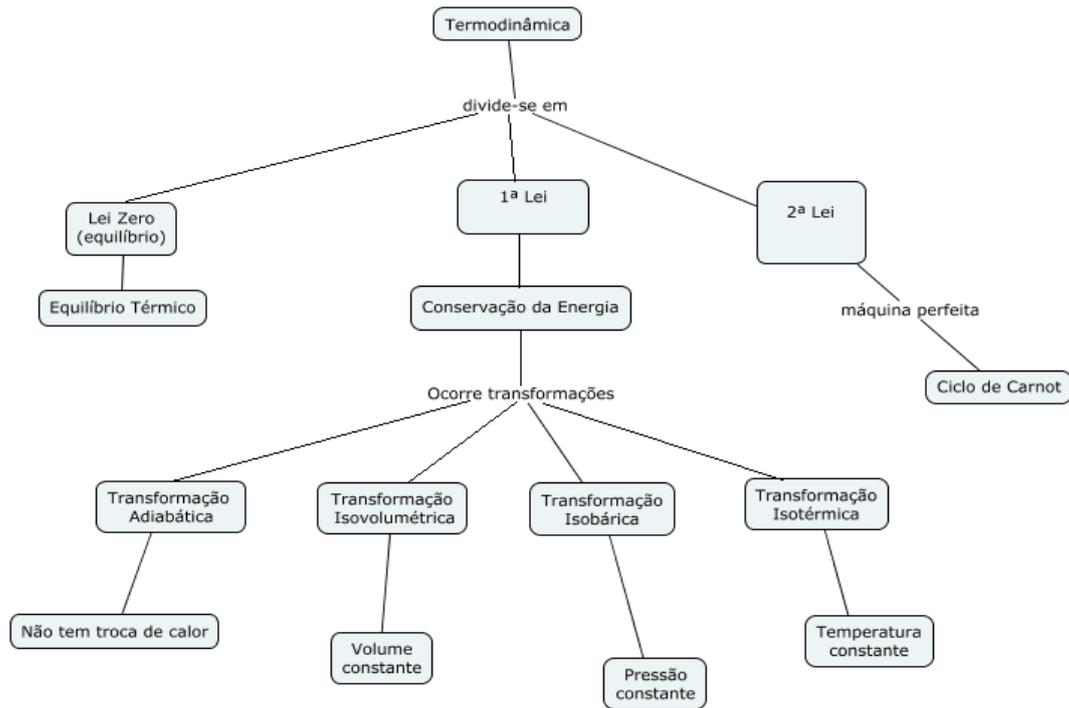
6.2.2 Mapas conceituais da categoria M

Foram categorizados como mapas conceituais médios aqueles que apresentaram boa estrutura conceitual, mas sem a identificação de conectores.

Os mapas 5, 6 e 7 são exemplos desta categoria. Apresentam hierarquização dos conceitos, começando pela primeira lei da termodinâmica, máquina térmica e processos termodinâmicos, o que demonstra que o aluno conseguiu sintetizar a natureza desses conceitos, e as relações entre eles, para estabelecer o que Novak descreve como um dos três pontos essenciais na construção de um mapa conceitual.

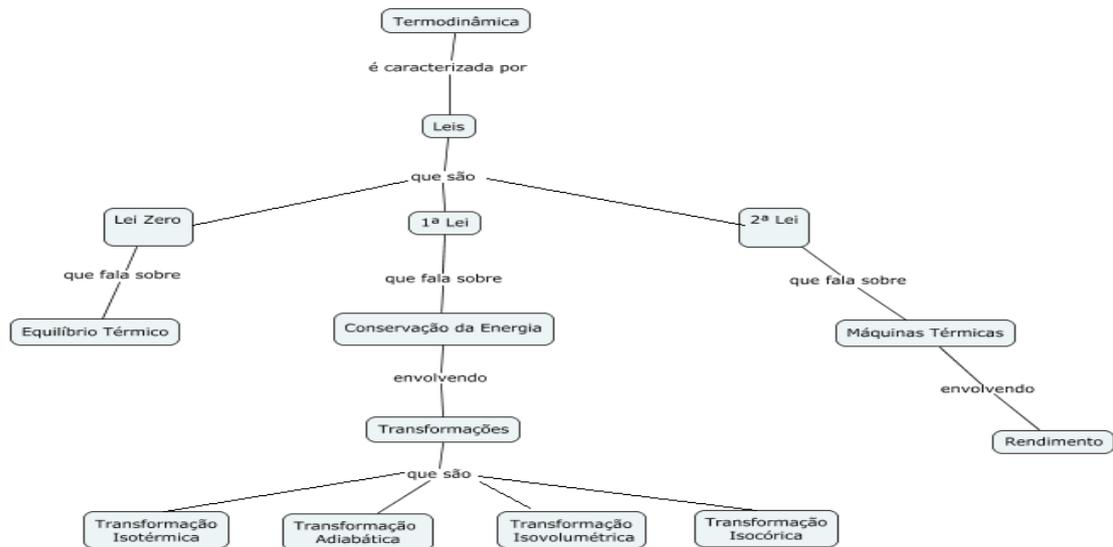
Nesses mapas, os alunos também fazem uma diferenciação progressiva para os conceitos ciclo de Carnot, transformação isotérmica, escalas termométricas e trabalho. Isso significa que eles utilizam de subsunçores para mostrar a diferenciação entre conceitos principais e secundários, o que leva a supor que os conceitos ficaram claros e diferenciados.

Figura 29- Mapa Conceitual 5.



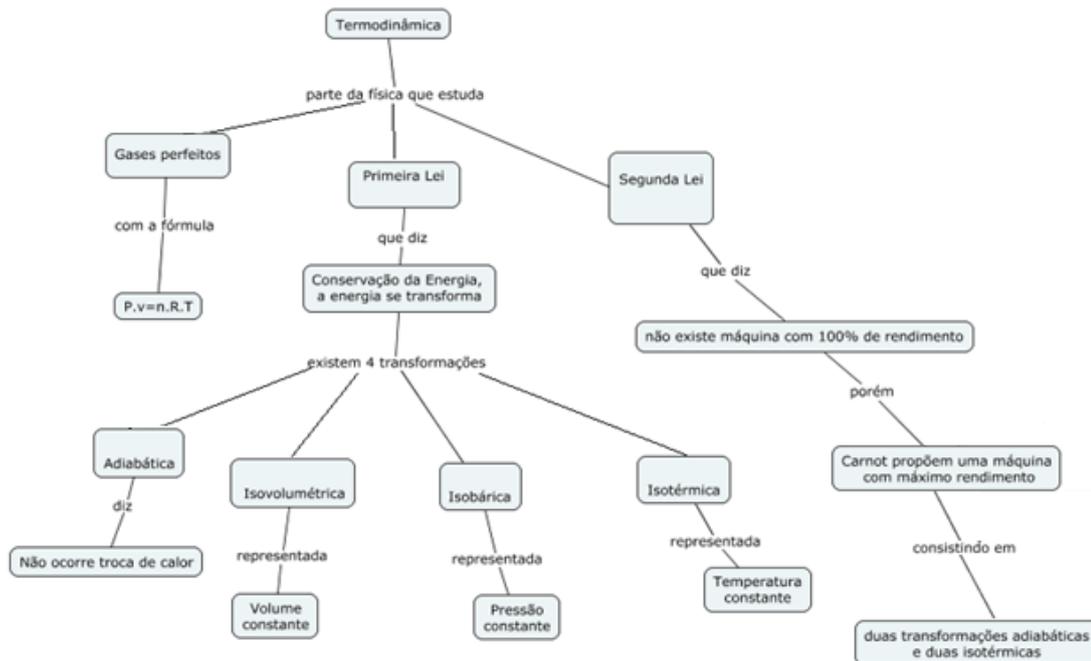
Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 30- Mapa Conceitual 6.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 31- Mapa Conceitual 7.



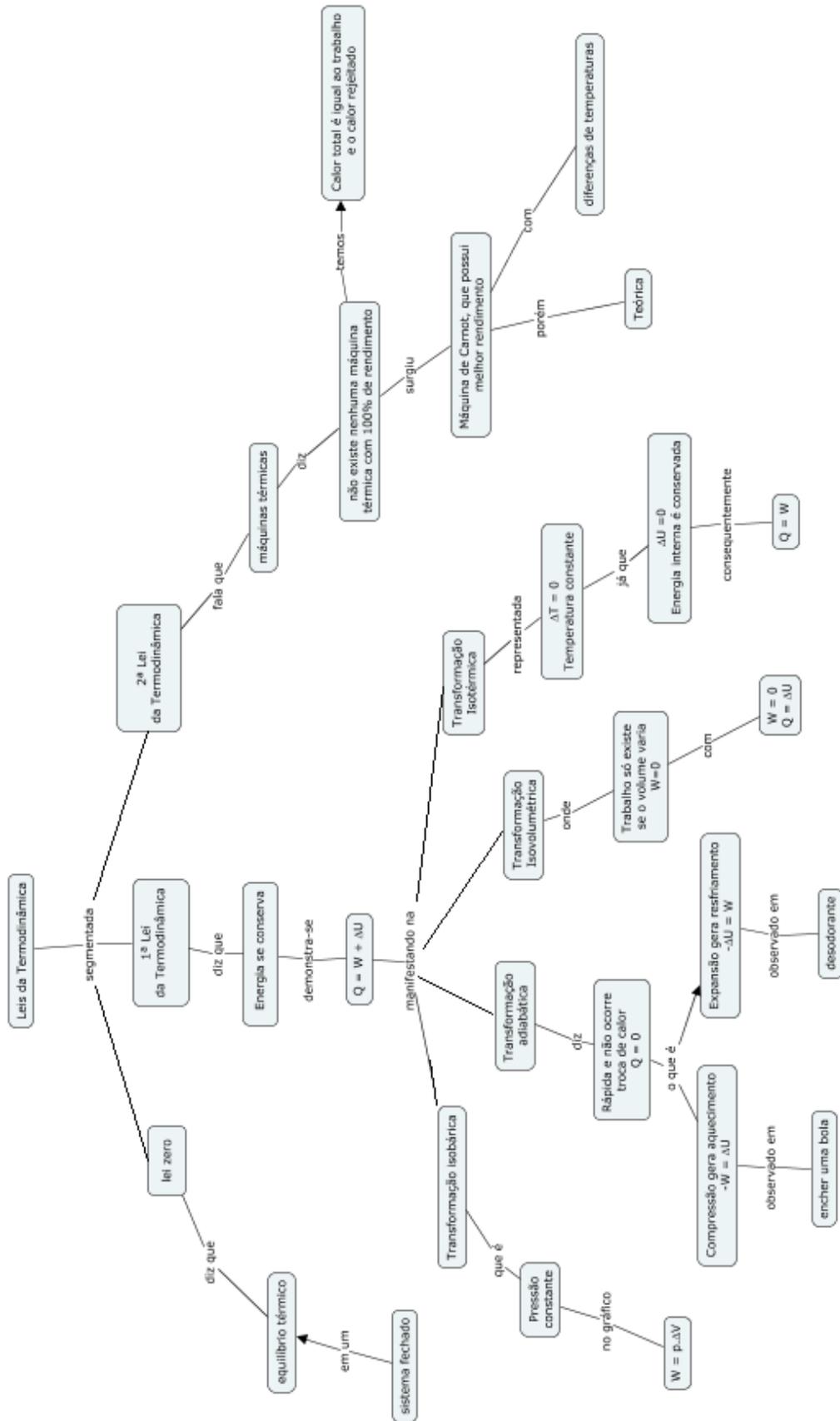
Fonte: Dados da pesquisa.

6.2.3 Mapas Conceituais da categoria A

Nesta categoria são classificados os mapas com nível de elaboração mais elevado e completo. São mapas que apresentam várias relações de significados e conectores bem identificados.

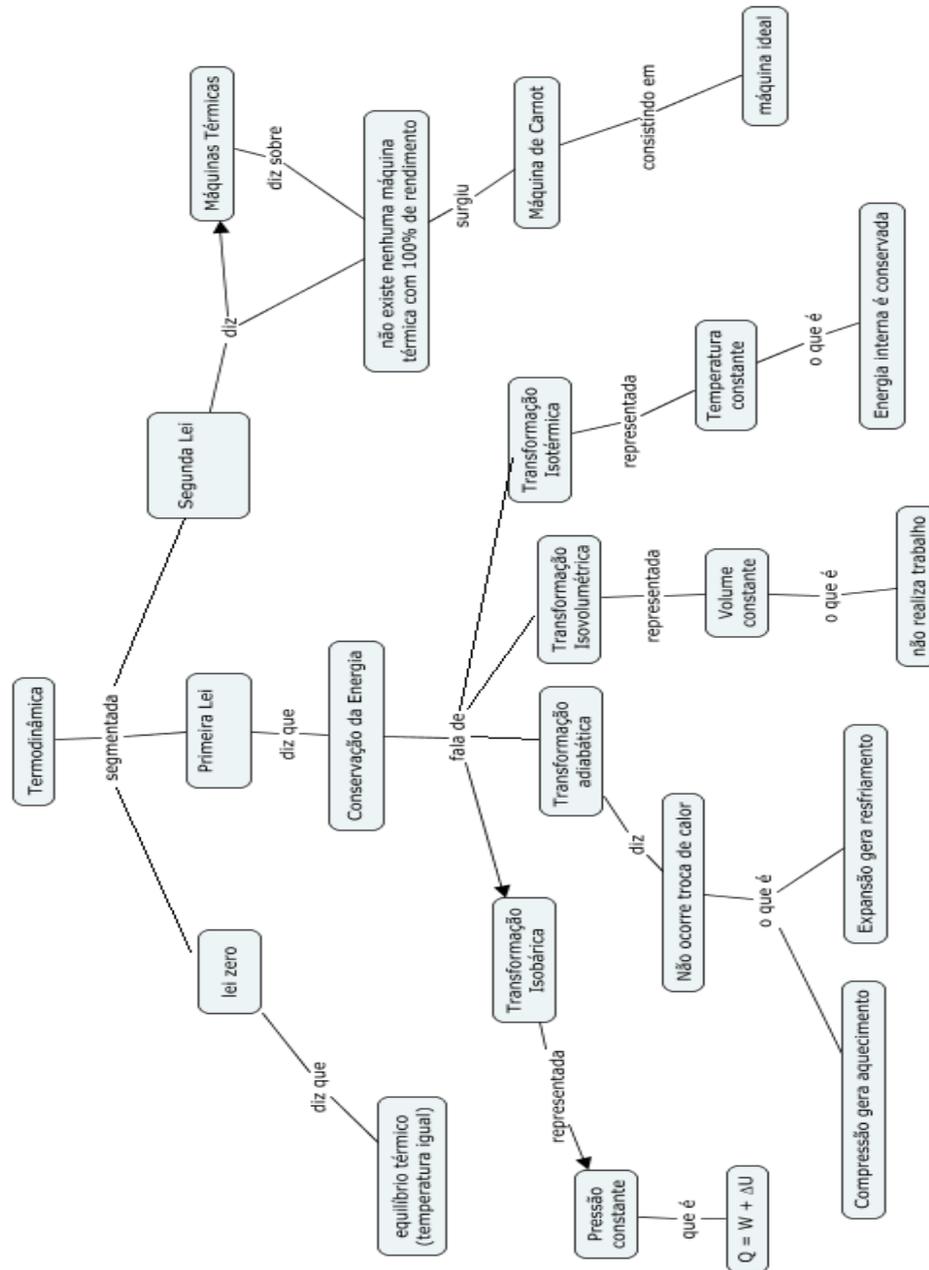
São observadas hierarquização de conceitos, a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, de forma mais atuantes que nos mapas anteriores. Nesses mapas os subunçores construídos apresentam os conhecimentos prévios dos alunos, sendo bem diferenciados, com melhores conectores e com boas hierarquizações de conceitos, diferenciados progressivamente com palavras que se conectam com conceitos mais elaborados. Os mapas 8 e 9 são exemplos desta categoria.

Figura 32- Mapa Conceitual 8.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 33- Mapa Conceitual 9.



Fonte: Dados da pesquisa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação foi desenvolvida a partir de estudos, observações, discussões e reconhecimento de várias teorias de aprendizagem, avaliação e metodologias, voltadas para aspectos da apreensão do conhecimento, com enfoque na disciplina Física, particularmente sobre o conteúdo de Termodinâmica. A partir desses estudos, elaboramos e testamos uma sequência didática em turmas do 2º e 3º anos do Ensino Médio.

Percebemos que a aplicação dessa sequência envolveu os alunos na solução de problemas apresentados através de vídeos, simulações e experimentos, em um processo de construção colaborativa, que oportunizou a interatividade e a possibilidade de fazer um sistema físico evoluir com base em conhecimentos anteriores advindos de diferentes contextos.

Nesse processo, os mapas conceituais foram úteis não só como recursos auxiliares para a determinação do conhecimento prévio dos alunos, mas também para investigar mudanças em sua estrutura cognitiva durante a instrução. Dessa forma foi possível, inclusive, obter informações que podem servir de realimentação para a instrução e também como forma de avaliação do aprendizado do aluno, por meio da análise das modificações envolvidas nas transformações ocorridas nos conceitos e conteúdos.

Após as análises dos testes e dos mapas conceituais, tivemos clareza do grande desafio que é ensinar Física de forma diferenciada. Nesse sentido, foi apresentada e discutida aqui uma sequência didático-metodológica que envolveu tecnologias, uso de mapas de conceitos e outras atividades de forma contextualizada, objetiva e organizada, ancorada nos processos de ensino e aprendizagem, tendo como foco uma aprendizagem significativa e a alfabetização científica dos estudantes.

Os resultados aqui relatados foram originados numa mudança no processo de acompanhamento da aprendizagem e avaliação, implementado por meio de abordagens quantitativas e qualitativas, tanto na resolução de problemas, que é necessário ao ensino de Física, quanto nos aspectos conceituais, raramente observados nos métodos tradicionais de ensino, com a construção dos mapas conceituais que se mostraram ferramentas úteis e eficazes na aprendizagem dos conteúdos abordados.

Concluímos que essas abordagens desenvolvidas e propostas constroem um método de avaliação e aprendizagem mais abrangente no conhecimento dos estudantes, e que a eficácia da sequência com as metodologias envolvidas e com a ferramenta mapas acarretaram em um melhoramento nos resultados e do aproveitamento no desenvolver da sequência.

Para futuros trabalhos, com o uso do Tracker e outros materiais de medidas como o termômetro infravermelho, fazer medições que mostrem as variações de temperaturas das fontes quentes e frias, quantificando através do experimento, as fórmulas que envolvem as Leis da Termodinâmica.

Partes do trabalho relatado nesta dissertação, foram apresentados em congressos e encontros e há um artigo aceito, conforme segue:

1- "SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA COM METODOLOGIA BASEADA NOS MOMENTOS PEDAGÓGICOS", artigo, de autoria de Mathias Viana Vicari e Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho, foi apresentado, na forma de pôster, no VI Encontro Sul Mineiro de Ensino de Física realizado entre os dias 4 e 6 de setembro de 2017 na Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais.

2- " SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ENSINO DA TERMODINÂMICA POR INVESTIGAÇÃO USANDO A LINGUAGEM MULTIMÍDIA", resumo, de autoria de Mathias Viana Vicari foi apresentado, na forma de pôster, no VI Roberto A. Salmeron School of Physics (VI EFRAS) e I International School on Physics Education realizado no Centro Internacional de Física da Matéria Condensada do Instituto de Física Universidade de Brasília, de 07 a 10 de agosto de 2017.

3- "SEQUÊNCIAS DIDÁTICAS PARA O ENSINO DA FÍSICA", resumo, de autoria de Mathias Viana Vicari foi apresentado, na forma oral, no Simpósio de Integração Acadêmica da Universidade Federal de Viçosa realizado entre os dias 23 a 28 de outubro de 2017 na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

4- "O ENSINO DA TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO EM UMA ABORDAGEM INVESTIGATIVA DESENVOLVIDA EM TORNO DO MOTOR DE STIRLING", artigo, de autoria de Mathias Viana Vicari e Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho, aceito para apresentação oral no XXIII Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF 2019, que ocorrerá entre os dias 27 de janeiro a 01 de fevereiro de

2019 no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, em Salvador, BA.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, V.O.; MOREIRA, M.A. Mapas conceituais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos da óptica física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, 4403 (2008).
- ARAÚJO, M. S.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p.176-194, 2003.
- AULER, D.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científico-tecnológica para quê? **Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 3, n. 1, jun. 2001.
- AUSUBEL, D. P; NOVAK, J. D; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interamericana, 1980.
- BARROW, L. H. A Brief History of Inquiry: From Dewey to Standards. **Journal of Science Teacher Education**, 2006, 17: p. 265–278, 2006.
- BRITO, L. O.; FIREMAN, E. C. **Revista Ensaio**, Belo Horizonte, v.18, n. 1, p. 123-146, jan-abr, 2016. p. 125.
- CARVALHO, A.M.P., **Ensino de Ciências por Investigação: Condições para implementação em sala de aula**. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2014. p.164.
- CARVALHO, A. M. P. Las practicas experimentales en el proceso de enculturación científica. In: GATICA, M Q; ADÚRIZ-BRAVO, A (Ed). **Enseñar ciencias en el Nuevo milenio: retos e propuestas**. Santiago: Universidade Católica de Chile.2006.
- CARVALHO, A.M.P., SASSERON, L.H., Ensino de Física por investigação: Referencial teórico e as pesquisas sobre as sequências de ensino investigativas. **Ensino Em Re-Vista**. v.22, n.2, p.249-266, 2015.
- CHASSOT, Attico. **Alfabetização científica: questões e desafios para a educação**. Ijuí: Editora UNIJUÍ, 2000.
- COLL, C.; MARCHESI, A.; PALACIOS, J. **Desenvolvimento psicológico e educação: psicologia da educação escolar**. 2ª. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.
- CONCHETI, A. F.; **A pluralidade da relação entre a física e a matemática em um curso inicial de licenciatura em física**. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Inter unidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DELIZOICOV, D., ANGOTTI, J.A. **Metodologia do Ensino de Ciências**. São Paulo: Editora Cortez, 1994. p. 205.
- DEWEY, J., **How We Think**. Boston: D. C. Heath & Co., 1910.

FISHBANE, P.M., GASIOROWICZ, S., THORNTON, S.T.; **Physics for scientists and engineers**. 2nd edit., New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 1996.

FREIRE, P., **Pedagogia da Autonomia - Saberes Necessários à Prática Educativa** - 25ª Ed. São Paulo: Editora Paz e Terra, 1996.

GARCIA, F. M. G. Los Mapas Conceptuales de J. D. Novak como instrumentos para la Investigación em Didática de Las Ciencias Experimentales. **Enseñanza de las Ciencias**, Barcelona, v.10, n.2, p.149-158, 1992.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I.C.C. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: Uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. **Investigação em Ensino de Ciências**, Rio Grande do Sul, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

GASPAR, A. **Atividades Experimentais no Ensino de Física: Uma nova visão baseada na teoria de Vygotsky**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

GASPAR, A. Cinquenta anos de ensino de física: muitos equívocos, alguns acertos e a necessidade do resgate do papel do professor. In: **XV Encontro de Físicos do Norte e Nordeste**, 1995, Natal-RN. Anais..., 1995. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/115573/mod_resource/content/>. Acesso em: 12 jan. 2018.

GÜÉMEZ, J.; FIOLEAIS, C.; FIOLEAIS, M. **Fundamentos da Termodinâmica do Equilíbrio**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.

LOZADA, C. O.; MAGALHÃES N.S. *Um Estudo de Caso Relacionando Formação de Professores, Modelagem Matemática e Resolução de Problemas no Ensino de Física*. In: XI **ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA**, 11., 2008, Curitiba. Lista Completa de Trabalhos do XI EPEF. Curitiba: Campus Curitiba da UTFPR, 2008.

MATTHEWS, Michael R. **Science Teaching – The role of history and philosophy of science**. London: Routledge, 1994.

MOREIRA, M. A.; BUCHWEITZ, B. **Novas estratégias de Ensino e Aprendizagem: mapas conceituais e o Vê epistemológico**. Lisboa: Plátano, 1993.

MOREIRA, M. A. **Mapas conceituais e aprendizagem significativa**. São Paulo: Ed. Centauro, 2010.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: A teoria de David Ausubel**. São Paulo: Centauro, 2001.

NOVAK, J. D.; GOWIN, B. D. **Aprender a Aprender**. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 1996.

NOVAK, J. D. **Aprender criar e utilizar o conhecimento**: mapas conceituais como ferramentas de facilitação nas escolas e empresas. Lisboa: Plátano, 2000.

NUSSENZVEIG, H.M. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. Vol.2. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

ORGAN, A.J. **The air engine - Stirling cycle power for a sustainable future**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2007.

OSTDIEK, V.J., BORD, D.J. **Inquiry into Physics**. Belmont, CA, USA: Thomson Brooks/Cole, 2008.

PERRENOUD, P. **Avaliação: da excelência à regulação das aprendizagens – entre duas lógicas**, Trad. Patrícia C. Ramos. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1999.

PIAGET, J. **Seis Estudos de Psicologia**. 24^a.ed – Rio de Janeiro: Editora Forense Universitária, 2010.

POZO, J. I. **Teorias cognitivas da aprendizagem**. 3^a. ed. São Paulo: Artes Medicas, 1998.

SASSERON, L.H. Alfabetização científica, ensino por investigação e argumentação: relações entre ciências da natureza e escola. **Revista Ensaio (Belo Horizonte)**. 2015, v.17, n. especial, p. 49-67.

SOUZA, F.L., AKAHOSHI, L.H., MARCONDES, M. E.R, CARMO, M.P, **Atividades experimentais investigativas no ensino de química**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2013.

SOUZA JUNIOR, M.V.; CÉLIO, V.C.C.; NOGUEIRA, S.C.O.; MARTINS, A.F.; FREITAS, K.H.G.; DE SOUSA, F.F. Mapas conceituais no ensino de física como estratégia de avaliação. **Scientia Plena**, vol. 13, n. 01, 2017.

SPRONKEN-SMITHA, R.; WALKERA, R.; BATCHELORB, J.; O’STEENC, B.; ANGELOD, T. Evaluating student perceptions of learning processes and intended learning outcomes under inquiry approaches. **Assessment & Evaluation in Higher Education**. Vol. 37, n.1, p.57–72, 2012.

STAVER, J.R., AND M. BAY. Analysis of the project synthesis goal cluster orientation and inquiry emphasis of elementary science textbooks. **Journal of Research in Science Teaching**. vol.24, p. 629–643, 1987.

URNS, J., ATMAN, C.J., ADAMS, R. Concept Maps for Engineering Education: A Cognitively Motivated Tool Supporting Varied Assesment Functions. **IEEE Transactions on Education**. No. 2, vol. 43, 2000.

VYGOTSKY, L. S. **A construção do pensamento e da linguagem**, Editora Martins Fontes, S Paulo, 2001.

VYGOTSKY, L.S., **Pensamento e Linguagem**. 4^a ed. São Paulo: Editora Martins Fontes, 2011.

VYGOTSKY, L.S, **A formação social da mente**. 4ª. ed. São Paulo: Martins Fontes, S Paulo, 1991.

WINDSCHITL, M.; THOMPSON, J.; BRAATEN, M. Beyond the scientific method: model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. **Science Education**. v. 92 941–67, 2008.

WONG, D.; PUGH, K. Learning Science: A Deweyan Perspective. **Journal of Research in Science Teaching**. Vol. 38, n. 3, P. 317 – 336, 2001.

YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. **Física II, Sears e Zemansky: termodinâmica e ondas**. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda., 2016.

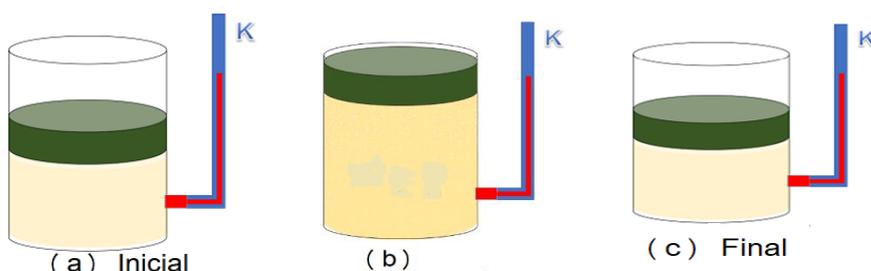
ZEMANSKY, M.W. **Calor e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978, p.154.

ZÔMPERO, A.F.; LABURÚ, C.E. Atividades Investigativas no Ensino de Ciências, **Rev. Ensaio**. Belo Horizonte. v.13. n.03. p.67-80. 2011.

APÊNDICE A: TESTE 1

Teste 1

1) Observe as três figuras abaixo, nas quais a barra lateral indicada pela letra K representa um termômetro que mede a temperatura do gás dentro do cilindro. A figura (a) representa a situação inicial do sistema. As figuras (b) e (c) representam possíveis situações finais, após o sistema sofrer uma transformação termodinâmica.



Marque (V) para as frases verdadeiras e (F) para as falsas:

- () A figura (b) representa a situação final após uma expansão isobárica do gás.
- () No processo de (a) para (b) o gás realizou trabalho.
- () No processo de (a) para (c) a energia interna do gás aumentou.
- () A situação (c) resultou de uma compressão adiabática do gás.
- () As situações finais em (b) e (c) resultam de transformações isotérmicas.

2) De acordo com os vídeos, marque (V) para as verdadeiras e (F) para as falsas:

- () O bquer constitui um sistema termodinâmico aberto.
- () Verifica-se a transformação de calor em energia cinética e esta, em energia elétrica.
- () A primeira lei da Termodinâmica, que trata da conservação da energia, é verificada neste experimento.
- () O tubo de ensaio ligado à seringa por uma mangueira constitui um sistema termodinâmico fechado.



- () Há expansão de volume do gás na seringa quando as bolinhas de gude estão longe da chama e próximas da rolha que tampa o tubo de ensaio.
- () Observa-se a contração de volume do gás na seringa quando as bolinhas de gude estão próximas da chama.

() Calor é transferido para o sistema e é realizado trabalho negativo quando o pistão da seringa é deslocando em uma expansão do gás.

3) (Enem) Um sistema termodinâmico cede 200 J de calor ao ambiente, enquanto sobre o sistema se realiza trabalho de 300 J. Nessas condições, a variação de sua energia interna é, em joules, de:

- a) -500. b) -100. c) 100. d) 250. e) 500.

APÊNDICE B: TESTE 2

Teste 2

1) (Tópicos de Física) A primeira coluna descreve uma transformação sofrida pelo gás; a segunda contém a denominação utilizada para indicar essa transformação.

Em qual das alternativas as associações estão corretas?	(A) O gás realiza trabalho e sua energia interna não varia.	(1) Compressão isotérmica.
	(B) O gás tem sua energia interna aumentada e não troca trabalho com o meio externo.	(2) Compressão adiabática.
	(C) O gás não troca calor com o meio externo, mas sua temperatura aumenta.	(3) Aquecimento isométrico.
	(D) O gás recebe trabalho e sua energia interna não varia.	(4) Expansão isotérmica.
a) A–1, B–2, C–3 e D–4.		
b) A–4, B–2, C–1 e D–3.		
c) A–4, B–3, C–2 e D–1.		
d) A–3, B–1, C–4 e D–2.		
e) A–2, B–4, C–1 e D–4.		

2) (UFV-MG) Um folheto explicativo sobre uma máquina térmica informa que ela, ao receber 1000 cal de uma fonte quente, realiza 4 186 J de trabalho. Sabendo que 1 cal equivale a 4,186 J e, com base nos dados fornecidos pelo folheto, você pode afirmar que essa máquina:

- viola a 1ª Lei da Termodinâmica.
- possui um rendimento nulo.
- possui um rendimento de 10%.
- viola a 2ª Lei da Termodinâmica.
- funciona de acordo com o ciclo de Carnot.

3) (UFSC) No século XIX, o jovem engenheiro francês Nicolas L. Sadi Carnot publicou um pequeno livro – *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre os meios adequados de desenvolvê-la* –, no qual descrevia e analisava uma máquina ideal e imaginária, que realizaria uma transformação cíclica hoje conhecida como “ciclo de Carnot” e de fundamental importância para a Termodinâmica.

Indique a(s) proposição(ões) correta(s) a respeito do ciclo de Carnot:

(01) Uma máquina térmica, operando segundo o ciclo de Carnot entre uma fonte quente e uma fonte fria, apresenta um rendimento igual a 100%, isto é, todo o calor a ela fornecido é transformado em trabalho.

(02) Nenhuma máquina térmica que opere entre duas determinadas fontes, às temperaturas T_1 e T_2 , pode ter maior rendimento do que uma máquina de Carnot operando entre essas mesmas fontes.

(04) O ciclo de Carnot consiste em duas transformações adiabáticas, alternadas com duas transformações isotérmicas.

(08) O rendimento da máquina de Carnot depende apenas das temperaturas da fonte quente e da fonte fria.

(16) Por ser ideal e imaginária, a máquina proposta por Carnot contraria a segunda lei da Termodinâmica.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

4) Leia as afirmações com atenção:

(01) Em uma transformação isotérmica, a variação da energia interna é nula.

(02) A eficiência da máquina de Stirling depende da diferença entre os valores de temperatura das regiões quente e fria.

(04) A energia interna do sistema depende da pressão e da temperatura.

(08) Em uma transformação adiabática, o trabalho será realizado pelo gás quando a variação da energia interna é positiva.

(16) A primeira Lei da Termodinâmica diz que o calor fornecido a um gás é igual à soma do trabalho realizado pelo gás e a sua variação da energia interna.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmativas verdadeiras e corrija as falsas.

APÊNDICE C: SITE COM ARQUIVOS ELETRÔNICOS

No site <https://mathiasvianavicari.wixsite.com/motorstirling> temos os arquivos eletrônicos trabalhados nessa dissertação, disponibilizados para professores e estudantes. Nesse site disponibilizaremos vários materiais a respeito da explicação, construção e funcionamento do Motor de Stirling.

Este material contém atividades investigativas, com a temática da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Sendo esse, um dos produtos educacionais desenvolvido como parte do Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

O material foi preparado e desenvolvido com linguagem apropriada para alunos e professores do Ensino Médio, com o objetivo de atender as necessidades materiais que existe nessa modalidade de ensino.

O tema escolhido, a construção de um motor Termodinâmico que respeita o Ciclo de Stirling foi para despertar no aluno a compreensão e o interesse pela Física, sendo que muitos alegam que é difícil relacionar as transformações estudadas nas aulas de Termodinâmica com o funcionamento dos motores.

APÊNDICE D: PRODUTO EDUCACIONAL MNPEF

Nas páginas seguintes, teremos o produto educacional desenvolvido como parte das exigências do Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

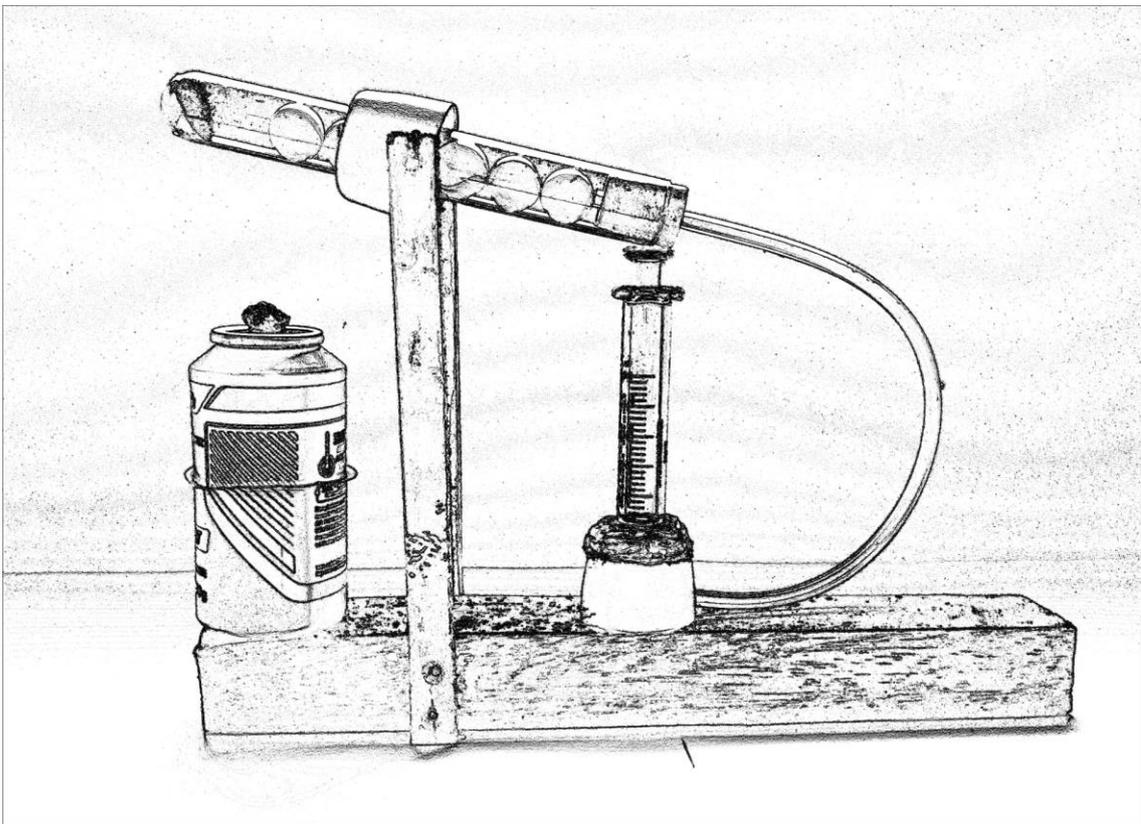
MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

SBF
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA



**UNIVERSIDADE
FEDERAL DE VIÇOSA**

SEQUÊNCIA DIDÁTICA INVESTIGATIVA PARA O ESTUDOS DAS LEIS DA TERMODINÂMICA COM ÊNFASE NO CICLO DE STIRLING



VIÇOSA – MINAS GERAIS
2018

MATHIAS VIANA VICARI

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA INVESTIGATIVA PARA O ESTUDOS DAS LEIS DA
TERMODINÂMICA COM ÊNFASE NO CICLO DE STIRLING**

Produto educacional apresentado à
Universidade Federal de Viçosa e a
Sociedade Brasileira de Física como parte
das exigências do Programa do Mestrado
Nacional Profissional em Ensino de Física.
Orientador: Dr Alexandre Tadeu Gomes de
Carvalho

VIÇOSA – MINAS GERAIS
2018

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	86
2 AULA - PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	88
2.1 TESTE 1.....	90
3 AULA - SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	92
3.1 ATIVIDADE MAPA CONCEITUAL.....	94
3.2 TESTE 2.....	95
4 TABELA DE CRONOGRAMAS	97
5 A FÍSICA DO CICLO DE STIRLING	98
5.1 CONTEXTO HISTÓRICO.....	98
5.2 A TERMODINÂMICA DO CICLO DE STIRLING.....	100
5.2.1 RENDIMENTO DOS MOTORES STIRLING.....	108
5.3 MATERIAIS UTILIZADOS.....	110
5.4 CUSTO DO EXPERIMENTO.....	111
5.5 MONTAGEM DO MOTOR.....	112
5.6 EXERCÍCIOS PROPOSTOS.....	115
REFERÊNCIAS	119
ANEXO A: POSSÍVEL SOLUÇÃO PARA O EXERCÍCIO 4	120
ANEXO B: POSSÍVEL SOLUÇÃO PARA O EXERCÍCIO 5	122

1 APRESENTAÇÃO

Prezado (a) Professor (a),

Esta sequência didática contém atividades investigativas, com a temática da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Sendo esse produto educacional desenvolvido como parte do Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

O material foi preparado e desenvolvido com linguagem apropriada para alunos e professores do Ensino Médio, com o objetivo de atender as necessidades materiais que existe nessa modalidade de ensino.

O tema escolhido, a construção de um motor Termodinâmico que respeita o Ciclo de Stirling foi para despertar no aluno a compreensão e o interesse pela Física, sendo que muitos alegam que é difícil relacionar as transformações estudadas nas aulas de Termodinâmica com o funcionamento dos motores.

A sequência didática está fundamentada na Teoria da mediação de Vygotsky, que considera a linguagem um instrumento capaz de exercer influência no fluxo do pensamento por meio da interiorização do diálogo que o indivíduo estabelece com o meio, na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, em que o indivíduo organiza o conhecimento de forma ordenada e hierarquizada, na construção de mapas conceituais desenvolvidos por Joseph Novak e está estruturada nos Três Momentos Pedagógicos, sistematizados por Delizoicov e Angotti.

Ao aplicar a sequência deve-se privilegiar atividades de aprendizagem baseadas em problemas autênticos, experimentações e atividades autorreguladas, priorizando a autonomia dos alunos e a relação social. Através de uma problematização proposta pelo professor mediador, deve-se despertar nos alunos o incentivo aos debates, trocas de conhecimentos, reflexões, análises e interpretações das diversas formas das linguagens apresentadas, relacionar a física com fatos cotidianos, aplicar avaliações tradicionais e utilizar a ferramenta Mapas Conceituais como outro instrumento para avaliar e averiguar indícios da alfabetização científica.

Esperamos que a nossa sequência didática, diferente de muitas encontradas na literatura e incorporada por mídias, Mapas Conceituais como instrumentos de aprendizagem, avaliação e construção de experimentos, contribua significativamente para a aprendizagem da Física e da alfabetização científica dos alunos.

Nos capítulos seguintes, apresentaremos um guia proposto para a aplicação da sequência em sala, usando um data show e um computador, com os discentes do ensino médio regular.

A sequência didática investigativa é composta de:

I) Tabela de cronogramas:

Sugestões para o desenvolvimento da sequência.

II) Aulas sobre a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica:

Aulas estruturadas através de mídias interativas que abordam definições e conceitos importantes da física da Termodinâmica para o ensino médio regular.

III) Manual para a construção de um Motor de Stirling:

Através das experiências vividas em sala de aula, criamos um material que apresenta um rápido e fácil guia para a montagem do Motor de Stirling, juntamente com o desenvolvimento da Física para o entendimento do Ciclo de Stirling, que pode ser realizado com materiais de baixo custo.

IV) Atividades:

Atividade 1- Teste 1 - Referente a aula da Primeira Lei da Termodinâmica;

Atividade 2- Desenvolvimento de Mapas Conceituais referente a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica;

Atividade 3- Teste 2 - Referente a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica.

Bom Trabalho!

Atenciosamente,

Mathias Viana Vicari

2 AULA - PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Tempo Previsto:

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de compreender:

- Os processos de transformação de energia e sua conservação;
- Transferência de energia e transformações termodinâmicas;
- Os conceitos e fenômenos relacionados com a Primeira Lei da Termodinâmica;
- A energia interna de um corpo está associada à energia de movimento aleatório das moléculas do corpo;
- A temperatura está associada à energia interna;
- A aplicação de uma força em um corpo realizando trabalho produz aquecimento e que sofrendo trabalho produz resfriamento;
- Tabelas, gráficos e fórmulas matemáticas;
- A física da Termodinâmica presente no cotidiano.

Desenvolvimento da atividade:

1ª aula:

- Colocar os vídeos e deixar os alunos tirarem suas próprias conclusões a respeito dos fenômenos físicos observados;
- Passar os vídeos novamente e propor perguntas relacionadas ao tema instigando a capacidade científica dos alunos, deixar que discutam entre eles e que os próprios cheguem a uma conclusão da explicação física do fenômeno;
- Passado esse momento, introduzir a Termodinâmica envolvida, organizando as ideias dos alunos.

2ª aula:

- Abordar as transformações Termodinâmicas envolvidas, mostrar as fórmulas matemáticas, explicar os conceitos físicos envolvidos nos processos e a física da Termodinâmica presente no cotidiano.

3ª aula:

- Teste 1;
- Verificar se as repostas aproximam dos conceitos cientificamente aceitos.

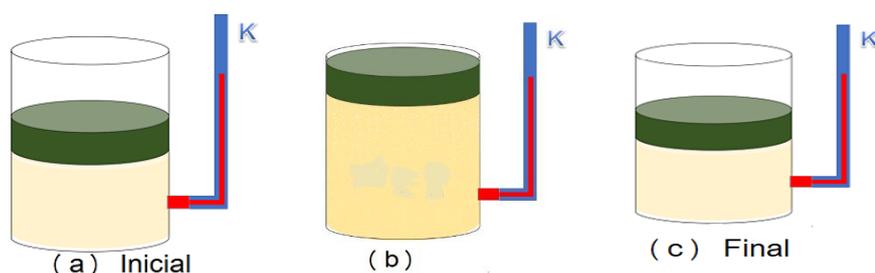
2.1 TESTE 1

Tempo Previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Teste 1

1) Observe as três figuras abaixo, nas quais a barra lateral indicada pela letra K representa um termômetro que mede a temperatura do gás dentro do cilindro. A figura (a) representa a situação inicial do sistema. As figuras (b) e (c) representam possíveis situações finais, após o sistema sofrer uma transformação termodinâmica.



Marque (V) para as frases verdadeiras e (F) para as falsas:

- () A figura (b) representa a situação final após uma expansão isobárica do gás.
- () No processo de (a) para (b) o gás realizou trabalho.
- () No processo de (a) para (c) a energia interna do gás aumentou.
- () A situação (c) resultou de uma compressão adiabática do gás.
- () As situações finais em (b) e (c) resultam de transformações isotérmicas.

2) De acordo com os vídeos, marque (V) para as verdadeiras e (F) para as falsas:

- () O béquer constitui um sistema termodinâmico aberto.
- () Verifica-se a transformação de calor em energia cinética e esta, em energia elétrica.
- () A primeira lei da Termodinâmica, que trata da conservação da energia, é verificada neste experimento.



() O tubo de ensaio ligado à seringa por uma mangueira constitui um sistema termodinâmico fechado.

() Há expansão de volume do gás na seringa quando as bolinhas de gude estão longe da chama e próximas da rolha que tampa o tubo de ensaio.

() Observa-se a contração de volume do gás na seringa quando as bolinhas de gude estão próximas da chama.

() Calor é transferido para o sistema e é realizado trabalho negativo quando o pistão da seringa é deslocando em uma expansão do gás.

3) (Enem) Um sistema termodinâmico cede 200 J de calor ao ambiente, enquanto sobre o sistema se realiza trabalho de 300 J. Nessas condições, a variação de sua energia interna é, em joules, de:

- a) -500. b) -100. c) 100. d) 250. e) 500.

3 AULA - SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Tempo Previsto:

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivos:

Ao final desta aula, o aluno deverá ser capaz de compreender:

- Processos que através do fornecimento do calor ao sistema, pode produzir aumento de volume, acarretando realização de trabalho;
- Saber descrever processos de uma fonte quente fornecendo calor ao gás que está em um cilindro fechado por um pistão móvel, destacando os trabalhos envolvidos;
- Os conceitos e fenômenos relacionados com a Primeira Lei da Termodinâmica;
- Que o sistema cilindro com gás, pode representar uma máquina térmica, se o pistão volta à posição inicial para novamente realizar expansão em ciclos sucessivos;
- Para o pistão voltar à condição inicial, o gás deverá ceder calor para o ambiente;
- O funcionamento de máquinas térmicas necessita de trocas de calor entre duas fontes: quente e fria;
- Tabelas, gráficos e fórmulas matemáticas;
- A física da Termodinâmica presente no cotidiano.

Desenvolvimento da atividade:

1ª aula:

- Colocar o vídeo e deixar os alunos tirarem suas próprias conclusões a respeito dos fenômenos físicos observados;
- Passar o vídeo novamente e propor perguntas relacionadas ao tema instigando a capacidade científica dos alunos, deixar que discutam

entre eles e que os próprios cheguem a uma conclusão da explicação física do fenômeno;

- Passado esse momento, introduzir a Termodinâmica envolvida nas máquinas térmicas, enfatizando o Ciclo de Stirling, organizando as ideias dos alunos.

2ª aula:

- Abordar as transformações Termodinâmicas envolvidas nas máquinas térmicas enfatizando o Ciclo de Stirling, mostrar as fórmulas matemáticas, explicar os conceitos físicos envolvidos nos processos e a física da Termodinâmica presente no cotidiano.

3ª aula:

- Teste Mapa Conceitual;

Verificar se as repostas aproximam dos conceitos cientificamente aceitos.

3.1 ATIVIDADE MAPA CONCEITUAL

Tempo Previsto:

Duas aulas de 50 minutos.

Objetivos:

- Identificar os conhecimentos construídos pelos alunos ao longo da pesquisa;
- Avaliar a construção conceitual nas etapas de construção dos mapas conceituais;
- Verificar qual a evolução do conhecimento sobre Leis da Termodinâmica;
- De acordo com a Teoria de Novak (2000), buscaremos nestes Mapas Conceituais a integração de novos conceitos na estrutura cognitiva do educando, para tanto, ao analisar os mapas estaremos atentos se houve ao longo do processo uma:
 - a) Hierarquização dos conceitos;
 - b) Diferenciação dos conceitos principais dos secundários – diferenciação progressiva;
 - c) Integração dos conceitos a partir do conceito das Leis da Termodinâmica – reconciliação integradora.

Desenvolvimento da atividade:**1ª aula:**

- Apresentar os conceitos dos Mapas Conceituais, um breve histórico sobre a sua origem, explicitando a sua importância como ferramenta de aprendizagem.

2ª aula:

- Produção dos Mapas Conceituais pelos alunos individualmente sobre as Leis da Termodinâmica.

3.2 TESTE 2

Tempo Previsto:

Uma aula de 50 minutos.

Teste 2

1) (Tópicos de Física) A primeira coluna descreve uma transformação sofrida pelo gás; a segunda contém a denominação utilizada para indicar essa transformação.

Em qual das alternativas as associações estão corretas?

- a) A–1, B–2, C–3 e D–4.
- b) A–4, B–2, C–1 e D–3.
- c) A–4, B–3, C–2 e D–1.
- d) A–3, B–1, C–4 e D–2.
- e) A–2, B–4, C–1 e D–4.

(A) O gás realiza trabalho e sua energia interna não varia.

(1) Compressão isotérmica.

(B) O gás tem sua energia interna aumentada e não troca trabalho com o meio externo.

(2) Compressão adiabática.

(C) O gás não troca calor com o meio externo, mas sua temperatura aumenta.

(3) Aquecimento isométrico.

(D) O gás recebe trabalho e sua energia interna não varia.

(4) Expansão isotérmica.

2) (UFV-MG) Um folheto explicativo sobre uma máquina térmica informa que ela, ao receber 1000 cal de uma fonte quente, realiza 4 186 J de trabalho. Sabendo que 1 cal equivale a 4,186 J e, com base nos dados fornecidos pelo folheto, você pode afirmar que essa máquina:

- a) viola a 1ª Lei da Termodinâmica.
- b) possui um rendimento nulo.
- c) possui um rendimento de 10%.
- d) viola a 2ª Lei da Termodinâmica.
- e) funciona de acordo com o ciclo de Carnot.

3) (UFSC) No século XIX, o jovem engenheiro francês Nicolas L. Sadi Carnot publicou um pequeno livro – *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre os meios adequados de desenvolvê-la* –, no qual descrevia e analisava uma máquina ideal e imaginária, que realizaria uma transformação cíclica hoje conhecida como “ciclo de Carnot” e de fundamental importância para a Termodinâmica.

Indique a(s) proposiçã(o)es) correta(s) a respeito do ciclo de Carnot:

(01) Uma máquina térmica, operando segundo o ciclo de Carnot entre uma fonte quente e uma fonte fria, apresenta um rendimento igual a 100%, isto é, todo o calor a ela fornecido é transformado em trabalho.

(02) Nenhuma máquina térmica que opere entre duas determinadas fontes, às temperaturas T_1 e T_2 , pode ter maior rendimento do que uma máquina de Carnot operando entre essas mesmas fontes.

(04) O ciclo de Carnot consiste em duas transformações adiabáticas, alternadas com duas transformações isotérmicas.

(08) O rendimento da máquina de Carnot depende apenas das temperaturas da fonte quente e da fonte fria.

(16) Por ser ideal e imaginária, a máquina proposta por Carnot contraria a segunda lei da Termodinâmica.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmações corretas.

4) Leia as afirmações com atenção:

(01) Em uma transformação isotérmica, a variação da energia interna é nula.

(02) A eficiência da máquina de Stirling depende da diferença entre os valores de temperatura das regiões quente e fria.

(04) A energia interna do sistema depende da pressão e da temperatura.

(08) Em uma transformação adiabática, o trabalho será realizado pelo gás quando a variação da energia interna é positiva.

(16) A primeira lei da Termodinâmica diz que o calor fornecido a um gás é igual à soma do trabalho realizado pelo gás e a sua variação da energia interna.

Dê como resposta a soma dos números associados às afirmativas verdadeiras e corrija as falsas.

4 TABELA DE CRONOGRAMAS

Abaixo temos o cronograma das etapas e das aulas da sequência didática:

1ª Etapa	1ª Aula	Aula referente à 1ª Lei da Termodinâmica, utilizando mídias e vídeos, projetadas em um data show e um computador, duração de 50 minutos.
	2ª Aula	Continuação da aula da 1ª Lei da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.
2ª Etapa	3ª Aula	Aplicação do conhecimento. Aplicamos um teste tradicional referente às duas primeiras aulas que abordaram o assunto da 1ª Lei da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.
3ª Etapa	4ª Aula	Mesmo processo que utilizamos na 1ª Etapa, nas 1ª e 2ª aulas, a problematização e organização do conhecimento. Nessa etapa abordamos a 2ª Lei da Termodinâmica, através dos conceitos iniciais estudados na 1ª lei da Termodinâmica que foram fundamentais para a continuação desse estudo, com duração de 50 minutos.
	5ª Aula	Continuação da aula referente a 2ª Lei da Termodinâmica, apresentamos e desenvolvemos o Ciclo de Stirling, pouco usado nos livros de Física do Ensino Médio, com duração de 50 minutos.
4ª Etapa	6ª Aula	Mesmo processo que utilizamos na 2ª Etapa, na 3ª aula, que foi o terceiro momento, objetivando aplicar o conhecimento, foi apresentado o conceito de Mapas Conceituais, um breve histórico sobre a sua origem, explicitando a sua importância como ferramenta de aprendizagem, com duração de 50 minutos.
	7ª Aula	Produção dos Mapas Conceituais pelos alunos individualmente sobre as Leis da Termodinâmica, com duração de 50 minutos.
5ª Etapa	8ª Aula	Foi realizado um teste tradicional envolvendo as Leis da Termodinâmica, ou seja, todo o conteúdo estudado, com duração de 50 minutos.

Tabela 1: Cronograma das etapas e das aulas da sequência didática.

5 A FÍSICA DO CICLO DE STIRLING

5.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Em 1816, o pastor e engenheiro escocês Robert Stirling (1790-1878), desenvolveu o famoso motor que leva seu nome. Um modelo de motor que utilizava um certo volume de gás, que quando aquecido externamente, provoca expansões e contrações cíclicas, fazendo movimentar dois êmbolos ligados a um eixo comum.

Os motores à vapor da época, funcionavam em altas pressões, causavam muitos acidentes, levando alguns funcionários ao óbito, inclusive parentes do Robert Stirling. Através de tais problemas, Robert juntamente com seu irmão James Stirling, desenvolveram um motor térmico para substituir os motores a vapor antes mesmo dos motores de combustão interna, esse ciclo desenvolvido por eles era de combustão externa, ou seja, a combustão ocorria fora do motor (CINAR, 2004; MAIER, 2007).

Figura 1: Robert Stirling (1790-1878)



Fonte: <http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>

Com duas câmaras a diferentes temperaturas, a parte em contato com uma chama ou fonte de calor, esquentando o ar que se expande nessas câmaras movendo um pistão (ou êmbolo), gerando o trabalho mecânico.

Os motores Stirling oferecem alta eficiência com baixa emissão. Não existem emissões de poluentes por parte da substância de trabalho (gases ou o ar atmosférico) se comparados com os motores de combustão interna, são

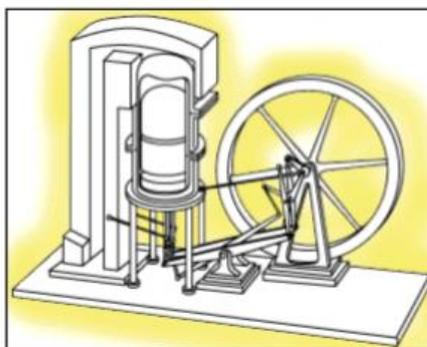
limpos, eficientes e são silenciosos. Os motores Stirling são considerados de ciclo fechado, não havendo válvulas de escapes e nem explosões, devido a essas características as máquinas ficaram mais seguras e econômicas (TAVAKOLPOUR, ZOMORODIAN e GOLNESHAN, 2008).

Em 1818 ele construiu o primeiro motor com o objetivo prático para bombear água de uma pedreira. No final do século XIX com o surgimento de motores a combustão interna e motores elétricos, o estudo do ciclo de Stirling foi deixado de lado. (MAIER, 2007).

Atualmente a tecnologia que envolve a invenção de Robert Stirling está em desenvolvimento, por causa do fato de que a combinação com fontes de energia renováveis pode fazer parte de um fornecimento de energia sustentável.

Segundo Maier (2007) temos várias razões para usarmos e entendermos tal ciclo.

Figura 2: Primeiro Motor Stirling



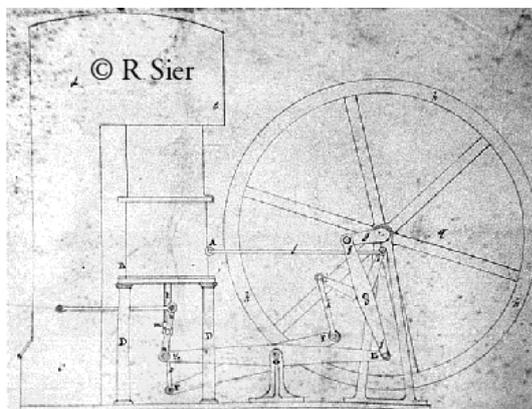
Fonte: <http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>

Uma das razões é de que é quase impossível explodir, não precisamos de vapor em uma caldeira de alta pressão, dentro do cilindro não há explosões, ignições necessárias para operar os pistões como em um motor Otto ou Diesel, só precisamos de um tipo de gás, pode ser usado ar, hélio, nitrogênio ou hidrogênio e não precisamos recarregá-lo. O gás usado é confinado e é sempre o mesmo.

Para a produção da fonte de calor, podemos usar combustível, petróleo, gás, energia nuclear e energias renováveis, como energia solar, biomassa ou calor geotérmico.

O motor Stirling é muito silencioso, por isso são muito usados em submarinos. Eles podem funcionar com uma pequena diferença de temperatura, com o calor da sua mão ou de uma xícara de café quente, ou seja, com apenas baixas potências, poucas energias podem executar o motor de Stirling o que contribui no ponto de vista econômico.

Figura 3 – Patente de 1816 primeira máquina operante em 1818



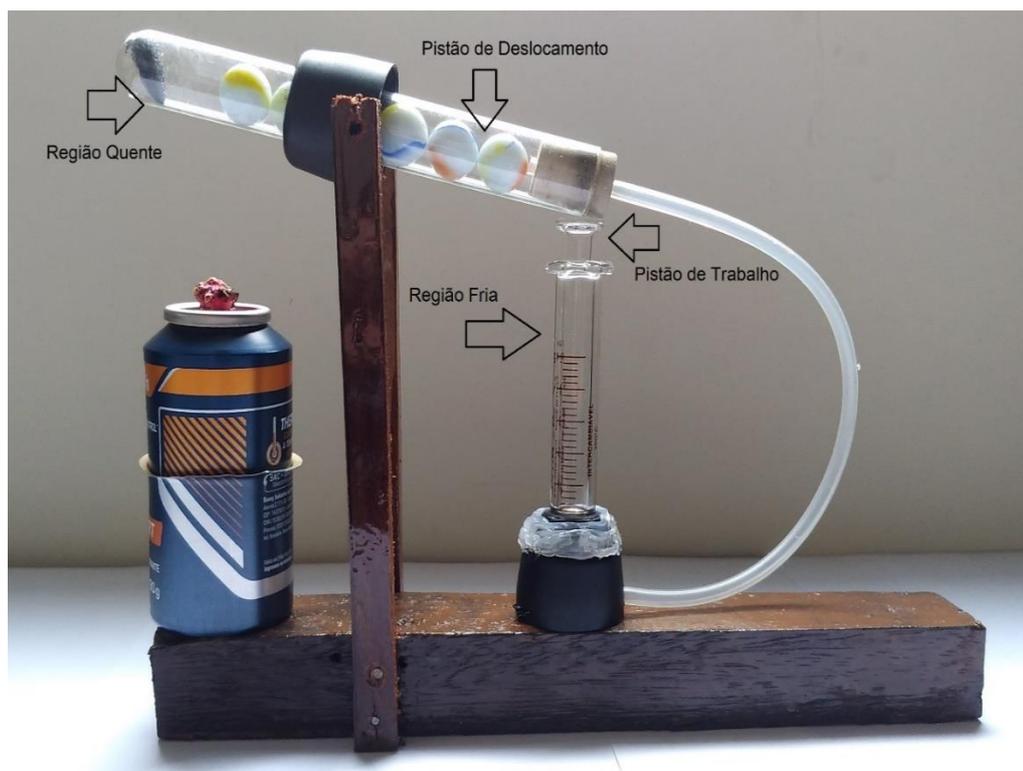
Fonte: <http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>

Suas vantagens são realmente benéficas para o meio ambiente porque é possível produzir eletricidade com o poder do sol com alta eficiência (teoricamente como o ciclo de Carnot). É uma vantagem enorme para a economia porque é possível queimar o combustível mais barato e está trabalhando em vez do mais caro. E este motor é confortável para as pessoas porque é silencioso e não barulhento como um motor de combustão interna (MAIER, 2007).

5.2 A TERMODINÂMICA DO CICLO DE STIRLING

O motor de Stirling é uma máquina térmica que funciona em ciclo fechado, tendo como substância operante uma porção de ar contida em duas câmaras cilíndricas ligadas por uma mangueira. Na figura 4 está uma foto do protótipo de motor de Stirling que construímos e operamos (ZEMANSKY, 1978; ORGAN, 2007; GÜÉMEZ; FIOLEAIS, 1998).

Figura 4 – Fotografia de nosso protótipo de motor de Stirling



Fonte: Modelo elaborado pelo autor (2018)

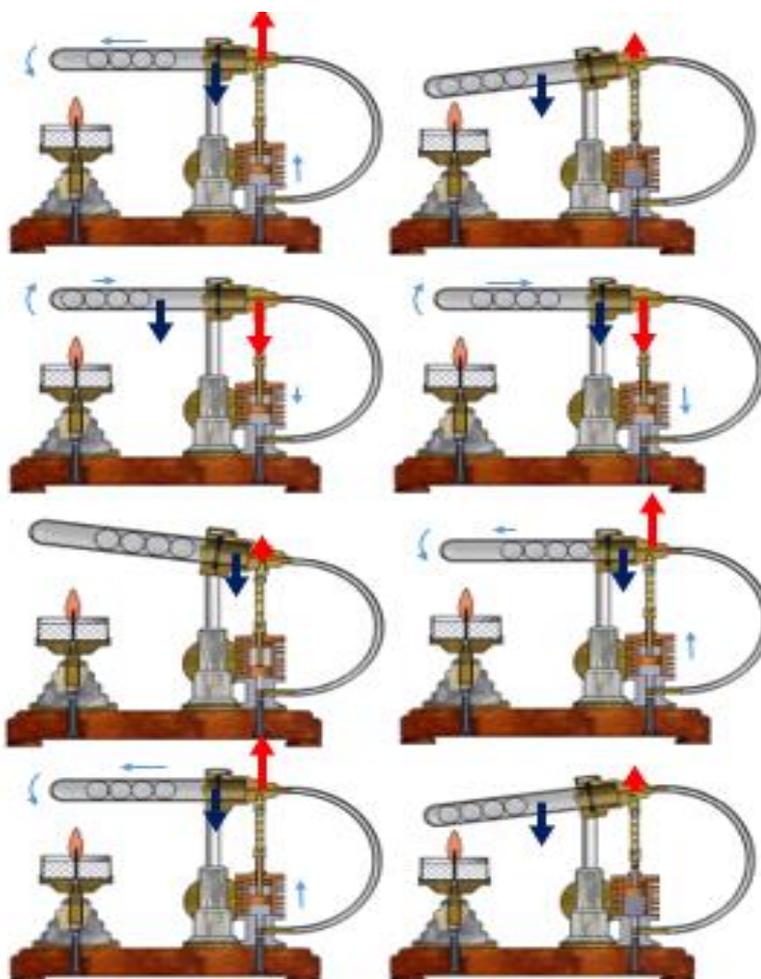
Uma das câmaras é constituída por um tubo de vidro (tubo de ensaio) que tem uma das suas extremidades lacrada e a outra tampada por uma rolha com furo que, por meio da mangueira, permite a conexão desta à outra câmara. Esta última (uma seringa de vidro) é dotada de um êmbolo de trabalho. Dentro do tubo de vidro estão algumas bolas de vidro, livres para se movimentar, que constituem o denominado êmbolo de deslocamento. Um eixo fixado ao tubo de vidro permite que este execute um movimento angular no plano vertical quando impulsionado pelo êmbolo da seringa, em razão da expansão e contração do ar contido no sistema.

A extremidade fechada do tubo de vidro está próxima a uma chama que aquece o ar no interior do tubo, próximo à extremidade lacrada. O aquecimento resulta na expansão do ar contido na câmara da seringa, que empurra o embolo desta ocasionando um deslocamento angular do tubo de vidro. A inclinação do tubo permite que as bolas de vidro ocupem o lugar do ar próximo a extremidade lacrada. O ar é então deslocado para longe da fonte de calor e ao esfriar, se contrai, puxando o êmbolo da seringa. Em consequência o tubo sofre um deslocamento angular em sentido oposto,

promovendo o deslocamento das bolas de vidro para longe da fonte de calor e o aquecimento do ar, que se expande, recomeçando o ciclo.

Na figura 5 representamos as diferentes configurações assumidas por um motor de Stirling durante um ciclo de trabalho.

Figura 5 – Representação artística de um motor de Stirling em diferentes estágios de um ciclo trabalho.



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>

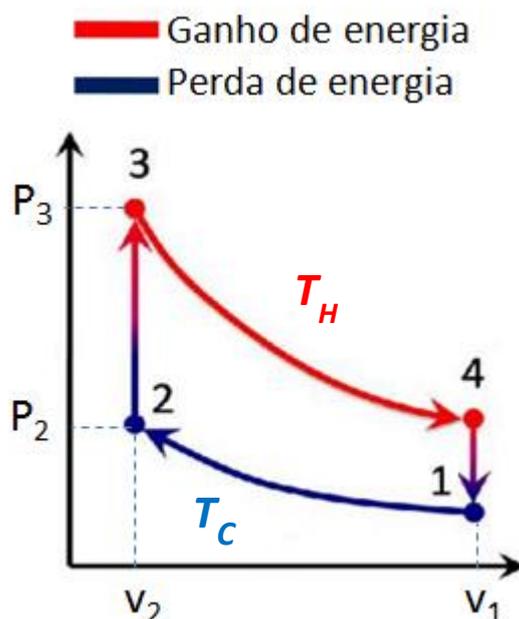
Então a expansão e contração cíclicas da substância trabalho promove o deslocamento angular do tubo de vidro.

O motor Stirling é uma máquina térmica que obedece a um ciclo termodinâmico reversível e fechado, convertendo calor em trabalho a partir da expansão e da contração de um gás, que alterna entre um gradiente térmico.

A Figura 6 representa o Ciclo Stirling ideal, no qual se destacam os processos como se segue:

- (1 → 2) Compressão isotérmica;
- (2 → 3) Aquecimento isocórico;
- (3 → 4) Expansão isotérmica;
- (4 → 1) Resfriamento isocórico

. Figura 6 – Representação do ciclo termodinâmico de Stirling



Fonte: Modelo elaborado pelo autor (2018).

Nosso caso é o motor de Stirling, uma combinação de quatro processos termodinâmicos reversíveis, ou seja, quatro tempos de funcionamento, o sistema e a vizinhança retornam ao seu estado inicial depois de completado o ciclo.

Admitindo que o atrito das partes móveis é desprezível, que as paredes da câmara são adiabáticas e que o gás é ideal.

As Leis de Charles, Boyle e Gay-Lussac, descrevem os comportamentos do gás sendo considerado ideal dentro do tubo.

Pela lei geral dos gases, temos:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$P_1 \rightarrow$ Pressão inicial

$P_2 \rightarrow$ Pressão final

$V_1 \rightarrow$ Volume inicial

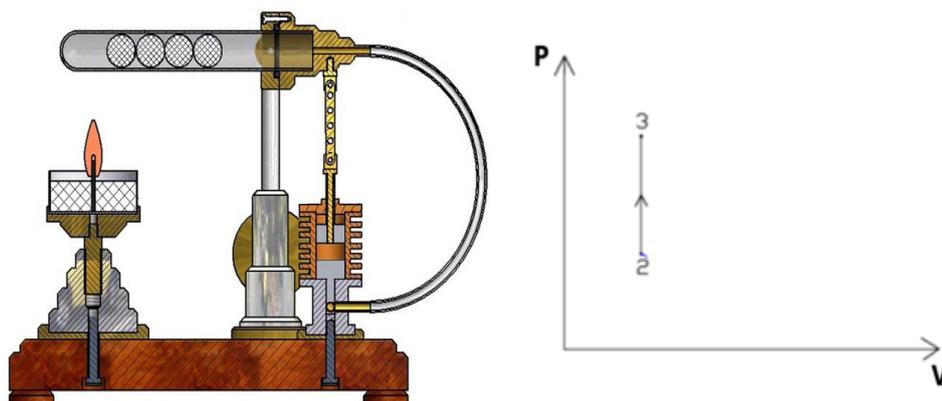
$V_2 \rightarrow$ Volume final

$T_1 \rightarrow$ Temperatura inicial

$T_2 \rightarrow$ Temperatura final

1. Aquecimento isovolumétrico (2 \rightarrow 3): Ocorre a volume constante e envolve transferência de calor da fonte quente para o ar contido dentro do cilindro do motor, como representado na figura 7. O calor (Q_{23}) é absorvido pelo fluido de trabalho e a temperatura é aumentada de (T_C) para (T_H). Nenhum trabalho é feito. A pressão e a temperatura do gás aumentam durante esta fase. O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar através do canal de conexão para o volume quente, onde o gás é aquecido e sua pressão aumenta. Porém é importante notar que o volume nesse processo é constante;

Figura 7: Aquecimento isovolumétrico em motor Stirling



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>

Matematicamente:

$$V_1 = V_2 \text{ e } T_2 > T_1 \text{ (Aquecimento)}$$

Então:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$$

Observamos que:

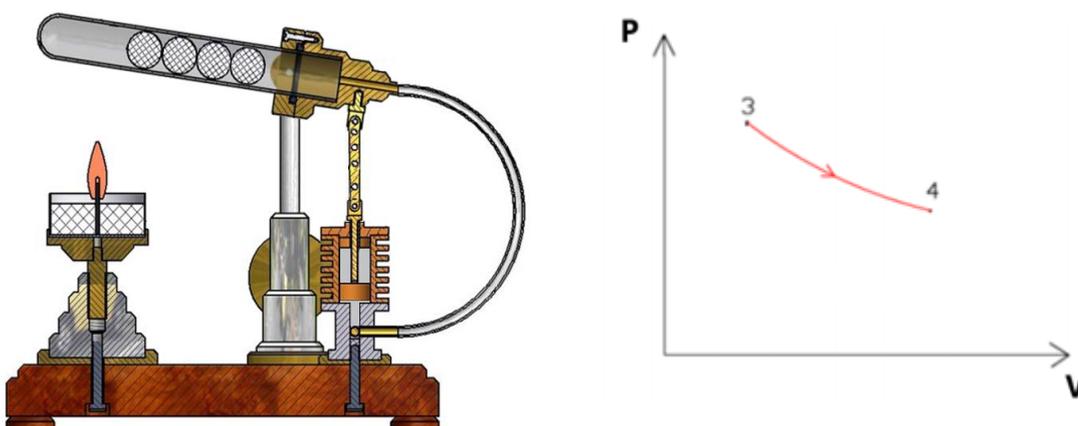
$$P_2 > P_1$$

A função do deslocador (bolinhas de gude):

O volume permanece constante, mas o deslocador, ao descer, envia o gás da parte inferior (fria) para o topo (quente).

2. Expansão isotérmica (3 → 4): O trabalho é realizado pelo gás que presente no motor sofre uma expansão aproximadamente isotérmica, enquanto uma quantidade igual de calor (Q_{34}) é adicionada ao sistema a partir de fontes externas de aquecimento (queima de carvão, velas etc.). O volume aumenta enquanto a pressão diminui, como representado na figura 8. É durante essa transformação que a energia motriz é produzida. Ambos os pistões se movimentam para a direita, devido a expansão do gás. O gás é aquecido pela fonte quente com o objetivo de se obter uma expansão a temperatura constante;

Figura 8: Expansão isotérmica em motor Stirling



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>

Matematicamente:

$$T_1 = T_2 \text{ e } V_2 > V_1$$

Então:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}$$

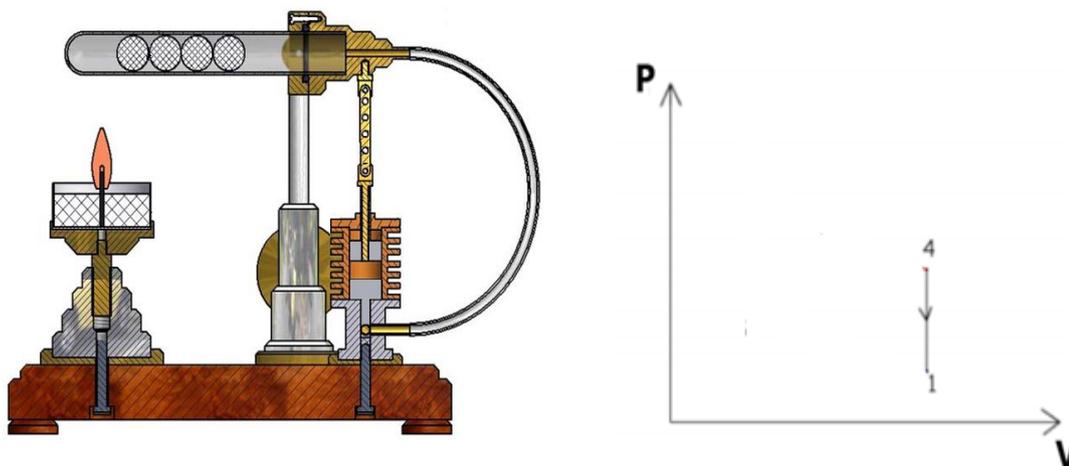
Observamos que:

$$V_2 > V_1, \text{ resulta que } P_2 < P_1$$

Através do gráfico, o estado 3 para o 4 provoca uma redução da pressão sobre o gás. O deslocador (bolinhas de gude) segue o pistão do motor durante a expansão para que o gás permaneça em contato apenas com a fonte quente.

3. Resfriamento isovolumétrico (4 → 1): O gás presente no motor transfere calor para o meio externo, (a fonte fria) recupera energia térmica, mantendo-se a volume constante. O calor (Q_{41}) é rejeitado pelo gás e há redução de temperatura de (T_H) a (T_C). Nenhum trabalho é feito. A temperatura e a pressão diminuem durante esta fase, como representado na figura 9. O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar pelo canal de conexão para o volume frio, onde o gás é resfriado pela água de resfriamento. Quando o gás é resfriado, sua pressão reduz até a pressão inicial. É importante notar que o volume neste processo é constante;

Figura 9: Resfriamento isovolumétrico em motor Stirling



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>

Matematicamente:

$$V_1 = V_2 \text{ e } T_2 < T_1 \text{ (Resfriamento)}$$

Então:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$$

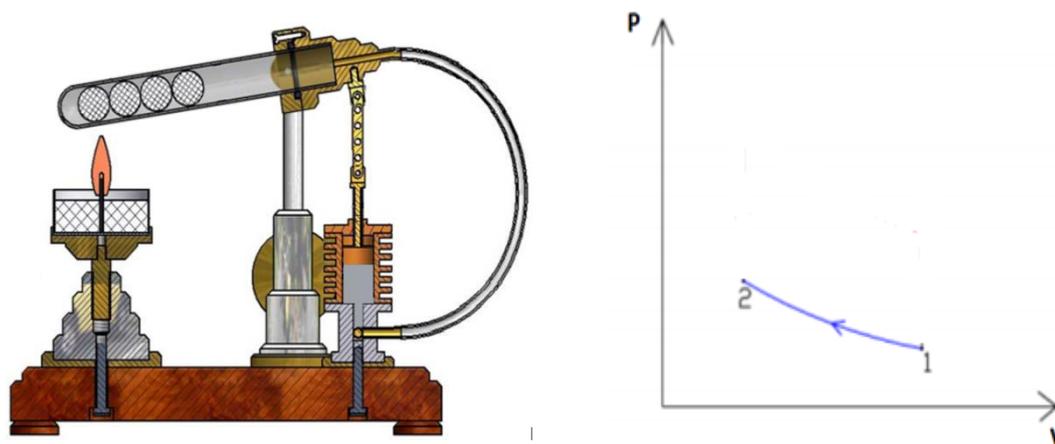
Observamos que:

$$P_2 < P_1$$

O volume permanece constante, mas o deslocador (bolinhas de gude), ao subir, envia o gás da parte superior (quente) para a parte inferior (fria).

4. Compressão isotérmica (1 → 2): O trabalho é realizado sobre o gás, enquanto uma quantidade igual de calor (Q_{12}) é rejeitada pelo sistema para a fonte de resfriamento, nesse processo o gás contido dentro do cilindro do motor é contraído e sua pressão aumenta grandemente, em um processo que ocorre em temperatura constante. O gás esfria e se contrai em temperatura constante (T_C), como representado na figura 10. A pressão do gás aumenta enquanto o seu volume diminui. É preciso fornecer energia mecânica para o gás nesse período. O pistão de trabalho é movimentado para a esquerda e o gás é comprimido. O gás é resfriado, com objetivo de realizar a compressão a temperatura constante;

Figura 10: Compressão isotérmica em motor Stirling



Fonte: Adaptado de <http://ridders.nu>

Matematicamente:

$$T_1 = T_2 \text{ e } V_2 < V_1 \text{ (Compressão)}$$

Então:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}$$

Observamos que:

$$V_2 < V_1, \text{ resulta que } P_2 > P_1$$

O deslocador (bolinha de gude), durante a compressão, permanece no topo para que o gás esteja sempre em contato apenas com a fonte fria.

5.2.1 RENDIMENTO DOS MOTORES STIRLING

A eficiência do motor de Stirling pode ser calculada tendo em conta o trabalho líquido ($W_{Líquido}$) e o calor total de aquecimento (Q_{Total}) e assumindo o gás como ideal.

O trabalho líquido é igual a soma do trabalho recuperado (positivo) durante a expansão e o trabalho fornecido (negativo) durante a compressão

$$W_{Líquido} = W_{34} + W_{12}$$

Note que: $W_{34} > 0$ e $W_{12} < 0$.

$$W_{Líquido} = \int_{V_1}^{V_2} P \, dv + \int_{V_2}^{V_1} P \, dv \quad \text{onde} \quad P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

$$W_{Líquido} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{n \cdot R \cdot T_H}{V} \, dV + \int_{V_2}^{V_1} \frac{n \cdot R \cdot T_C}{V} \, dV$$

Logo:

$$W_{Líquido} = n \cdot R \cdot (T_H - T_C) \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

O calor de aquecimento é fornecido durante o aquecimento isocórico e durante a expansão isotérmica.

$$Q_{Total} = Q_{23} + Q_{34}$$

Durante a expansão isotérmica, o calor fornecido é igual ao trabalho recuperado durante essa mesma fase:

$$Q_{34} = \int_{V_1}^{V_2} P \, dV$$

$$Q_{34} = n \cdot R \cdot (T_H) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Durante o aquecimento isocórico, quando o gás é aquecido de T_C para T_H , o calor é fornecido é expresso por:

$$Q_{23} = n \cdot C_v \cdot (T_H - T_C)$$

onde C_v é a capacidade de térmica molar a volume constante do gás.

O calor total fornecido é então:

$$Q_{Total} = n \cdot C_v \cdot (T_H - T_C) + n \cdot R \cdot (T_H) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Assim a eficiência ou rendimento do ciclo de Stirling

$$\eta = \frac{W_{Líquido}}{Q_{Total}}$$

pode ser escrito como

$$\eta = \frac{n \cdot R \cdot (T_H - T_C) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{n \cdot C_v \cdot (T_H - T_C) + n \cdot R \cdot (T_H) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Que resulta em:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \frac{R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{C_v \cdot \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}$$

Resultando, portanto, em uma eficiência menor que a do ciclo de Carnot.

Caso a razão V_1/V_2 permaneça constante e as temperaturas T_H e T_C sejam muito próximas a eficiência do ciclo de Stirling se equipara à de Carnot. Isto também ocorre caso a energia útil para o aquecimento isocórico seja inteiramente recuperada durante o resfriamento isocórico por meio de um regenerador, que é um dispositivo que toma energia do fluido de trabalho durante uma parte do ciclo e a devolve de volta integralmente durante outra parte.

Em ambas as aproximações o termo $C_v \cdot (T_H - T_C)$ desaparece e a eficiência torna-se:

$$\eta \approx \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right)$$

Na realidade, a eficiência do motor Stirling será sempre inferior à eficiência do ciclo Carnot.

5.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a realização do experimento são de fácil acesso e possuem um baixo custo.

Materiais utilizados:

- Uma lata de desodorante vazia;
- Tubo de Ensaio com tampa;
- Bolinhas de gude;
- Madeira para a estrutura;
- Pedaco pequeno de palha de aço para colocar dentro do tubo e na ponta;
- Álcool em gel para queima;
- Mangueira vendida nas farmácias (mais conhecida como “garrote”);
- Uma torneira de jardim;
- Seringa de Vidro.

5.4 CUSTO DO EXPERIMENTO

A seguir mostraremos uma média do valor dos objetos utilizados para a construção do Motor de Stirling, lembrando que para alguns materiais compramos conjuntos, pois, não são vendidos separadamente:

Objeto	Quantidade	Valor
Uma lata de desodorante	1	R\$ 5,00
Tubo de Ensaio com tampa + mangueira (garrote)	1 de cada	R\$ 2,00
Bolinhas de gude	6	R\$ 3,00 (pacote)
Madeira	1	R\$ 5,00
Pedaço de palha de aço	1	R\$ 1,00
Seringa de <u>Vidro</u> (15ml)	1	R\$ 25,00
Álcool em gel para queima	1	R\$ 7,00
Torneira de jardim	1	R\$ 2,00

Total: R\$ 50,00

Com a compra desses produtos, podemos utilizá-los para a construção de mais de um Motor de Stirling e alguns dos objetos listados podem ser facilmente comprados ou adquiridos por doações.

5.5 MONTAGEM DO MOTOR

Por meio de fotografias descreveremos uma maneira rápida e fácil para a montagem do Motor de Stirling:

Primeiro Passo:

Com as latas de desodorantes vazias, retiramos as tampas e fazemos um furo com o diâmetro igual ao da mangueira tanto embaixo na lateral, como também na parte superior, colocamos em cima da tampa do desodorante uma rosca de mangueira cortada, que possui o diâmetro idêntico ao da seringa, essa rosca será colada com cola quente conforme mostrado nas figuras abaixo:

Figura 11 – Materiais para a construção do Motor de Stirling



Fonte: O autor (2018)

Segundo passo:

Faremos um furo no centro da tampa de borracha do tubo de ensaio para colocarmos a mangueira fina que ligará o tubo com as bolas de gude (6 no total) com a seringa de vidro, passamos a mangueira nos furos da tampa do desodorante, encaixamos a mangueira no bico da seringa e acoplamos essa extremidade que será fixada na parte superior da tampa, conforme veremos nas figuras abaixo:

Figura 12 – Materiais para a construção do Motor de Stirling



Fonte: O autor (2018)

Terceiro passo (Final):

Com o suporte de madeira e uma das tampas fixadas com parafusos com um furo do tamanho do diâmetro do tubo de ensaio, encaixamos o tubo, com a lata de desodorante vazia, cortamos em dois pedaços e acoplamos esses pedaços, na parte superior retiramos as peças e colocamos um pedaço de tecido com o álcool para a queima, finalizando a construção do nosso motor, conforme veremos nas figuras abaixo:

Figura 13 – Materiais para a construção do Motor de Stirling



Fonte: O autor (2018)

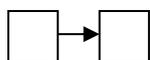
A substância de trabalho é o próprio ar, a máquina térmica se dá por essa engenhosa montagem. As esferas de vidro (bolinhas de gude) são resfriadas e atuam como um pistão servindo para o resfriamento respectivamente, o ar é esquentado na ponta direita do frasco, o gás aquecido dentro do mesmo expande-se e faz com que a seringa se mova para cima, quando finalmente a seringa chega ao topo, o frasco se inclina e as esferas rolam para o outro lado, o gás quente se aloja de um lado agora é forçado a sair para a entradas das esferas, quando isso acontece, o ar se resfria, pois onde estavam as esferas estava frio e o ar teve que ceder calor para fora, assim ele é comprimido novamente, e a seringa torna-se a descer, de modo que as esferas voltam a rolar para a posição inicial, e novamente começa tudo novamente.

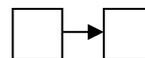
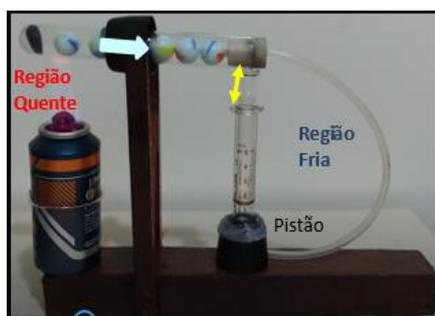
5.6 EXERCÍCIOS PROPOSTOS

Coloremos aqui exercícios que podem ser trabalhados em sala de aula ou como atividades avaliativas após a explicação da parte teórica através dos slides e das outras atividades propostas ao longo da sequência.

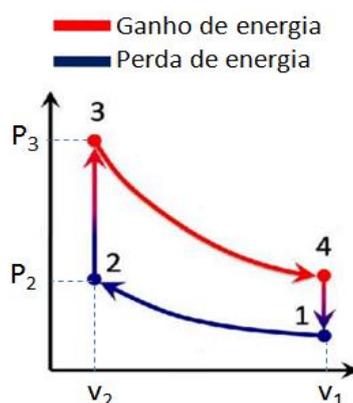
Exercício 1:

Marque nos quadrados a qual transformação do ciclo de Stirling corresponde a figura.





CICLO DE STIRLING



Exercício 2:

Marque quais são materiais usados na construção do motor de Stirling

- esferas
 -rádio
 -seringa de vidro
 -livro
 -tubo de ensaio
 -rolha de borracha
 -água

Exercício 3:

Marque V para frase verdadeira e F para frase falsa.

- O sistema recebe calor durante a transformação isovolumétrica da temperatura mais baixa para a mais alta.
- As bolinhas são necessárias para que o motor execute o ciclo.
- O sistema realiza trabalho durante a transformação isotérmica à temperatura mais alta.
- A força peso realiza trabalho sobre o sistema quando ocorre a transformação isotérmica à temperatura mais baixa.
- Durante um ciclo o sistema realiza trabalho líquido nulo.
- A eficiência da máquina de Stirling depende da diferença entre os valores de temperatura das regiões quente e fria.

Exercício 4:

(Fuvest 2018) O motor Stirling, uma máquina térmica de alto rendimento, é considerado um motor ecológico, pois pode funcionar com diversas fontes energéticas. A figura I mostra esquematicamente um motor Stirling com dois cilindros. O ciclo termodinâmico de Stirling, mostrado na figura II, representa o processo em que o combustível é queimado externamente para aquecer um dos dois cilindros do motor, sendo que uma quantidade fixa de gás inerte se move entre eles, expandindo-se e contraindo-se. Nessa figura está representado um ciclo de Stirling no diagrama $P \times V$ para um mol de gás ideal monoatômico. No estado A, a pressão é $P_A = 4 \text{ atm}$, a temperatura é $T_1 = 27^\circ \text{C}$ e o volume é V_A . A partir do estado A, o gás é comprimido isotermicamente até um terço do volume inicial, atingindo o estado B. Na isoterma T_1 , a quantidade de calor trocada é $Q_1 = 2.640 \text{ J}$, e, na isoterma T_2 , é $Q_2 = 7.910 \text{ J}$.

Determine:

- o volume V_A , em litros;
- a pressão P_D , em atm, no estado D;
- a temperatura T_2 .

Considerando apenas as transformações em que o gás recebe calor, determine

- a quantidade total de calor recebido em um ciclo, Q_R , em J.

DADOS:

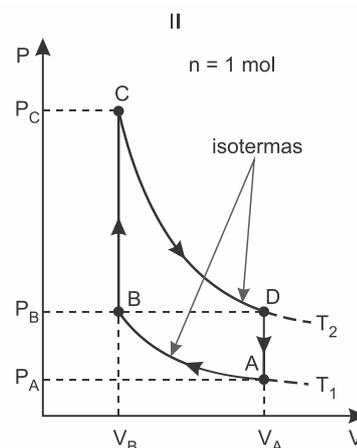
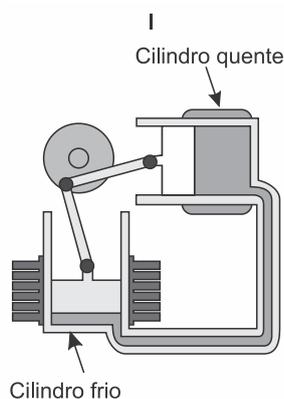
Calor específico a volume constante: $C_V = 3 R/2$

Constante universal dos gases: $R = 8 \text{ J}/(\text{mol K}) = 0,08 \text{ atm } \ell/(\text{mol K})$

$0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$

$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$

$1 \text{ m}^3 = 1.000 \ell$



Exercício 5:

(Cursos Unicamp - Física Geral II - A 2ª Lei da Termodinâmica - Parte 2)

Uma máquina de Stirling usa $n = 8,1 \times 10^{-3}$ moles de um gás ideal como combustível. A máquina opera entre 95°C e 24°C a $0,7$ ciclos por segundo e o volume da substância dobra durante a expansão.

- a) Qual o trabalho efetuado por ciclo?
- b) Qual é a potência da máquina?
- c) Quanto de calor é absorvido pela máquina?
- d) Qual é a eficiência da máquina?

REFERÊNCIAS

CINAR C., YUCESUS., TOPGUL T., OKUR M., Beta-type stirling engine with double heatres. **Applied Energy**, v. 85, p. 1041-1049, 2008.

GASPAR, Alberto; MONTEIRO, Isabel Cristina de Castro. Atividades experimentais de demonstrações em sala de aula: Uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. **Investigação em Ensino de Ciências**, Rio Grande do Sul, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

GRAS, P. Stirling engine. 2008. Disponível em: <<http://robertstirlingengine.com/principles.php#PV>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

MAIER, C.; GIL, A.; AGUILERA, R.; SHUANG, L.; YU, X.; “**Stirling Engine**”. University of Gavle. Nov/2007.

RIDDERS, J. Stirling Motoren Vlamhappers Verbrandings Motoren. 2001. Disponível em: <<http://ridders.nu>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

SIER, R. Some Pioneers in air Engine Design. 2002. Disponível em: <<http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

TAVAKOLPOUR, A. R.; ZOMORODIAN, A.; GOLNESHAN, A. A., Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. **Renewable Energy**, v. 33, p. 77-87, 2008.

UnivespTV. 1996. Disponível em: <<http://univesptv.cmais.com.br/fisica-ii>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

ZEMANSKY. **Calor e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

ANEXO A: POSSÍVEL SOLUÇÃO PARA O EXERCÍCIO 4

a) Pela equação de Clayperon, temos:

$$\begin{aligned} P_A \cdot V_A &= n \cdot R \cdot T_A \\ 4 \cdot V_A &= 1 \cdot 0,08 \cdot 300 \\ \therefore V_A &= 6 \text{ L} \end{aligned}$$

b) Entre os estados A e B (com $V_B = V_A/3$ e $T_A = T_B$), temos:

$$\begin{aligned} \frac{P_A \cdot V_A}{T_A} &= \frac{P_B \cdot V_B}{T_B} \\ 4 \cdot 6 &= P_B \cdot 6/3 \\ \therefore P_D = P_B &= 12 \text{ atm} \end{aligned}$$

c) Entre os estados A e D (com $V_A = V_D$), temos:

$$\begin{aligned} \frac{P_A \cdot V_A}{T_A} &= \frac{P_D \cdot V_D}{T_D} \\ \frac{4}{300} &= \frac{12}{T_D} \\ \therefore T_D &= 900 \text{ K} \end{aligned}$$

d) Utilizando a 1ª Lei da Termodinâmica e sabendo que $\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T$, obtemos

para as transformações:

De A para B :

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\tau_{AB} + \Delta U_{AB} \quad (\tau_{AB} < 0 \text{ e } \Delta U_{AB} = 0) \\ Q_1 &= -\tau_{AB} \\ Q_1 &= -2640 \text{ J} \quad (\text{calor cedido}) \end{aligned}$$

De B para C :

$$\begin{aligned} Q_{BC} &= \tau_{BC} + \Delta U_{BC} \quad (\tau_{BC} = 0 \text{ e } \Delta U_{BC} > 0) \\ Q_{BC} &= \Delta U_{BC} = \frac{3}{2}nR(T_C - T_B) \\ Q_{BC} &= \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8 \cdot (900 - 300) \\ Q_{BC} &= 7200 \text{ J} \quad (\text{calor recebido}) \end{aligned}$$

De C para D:

$$Q_2 = \tau_{CD} + \Delta U_{CD} \quad (\tau_{CD} > 0 \text{ e } \Delta U_{CD} = 0)$$

$$Q_2 = \tau_{CD}$$

$$Q_2 = 7910 \text{ J} \quad (\text{calor recebido})$$

De D para A:

$$Q_{DA} = \tau_{DA} + \Delta U_{DA} \quad (\tau_{DA} = 0 \text{ e } \Delta U_{DA} < 0)$$

$$Q_{DA} = \Delta U_{DA} = \frac{3}{2} nR(T_A - T_D)$$

$$Q_{DA} = \frac{3}{2} \cdot 1 \cdot 8 \cdot (300 - 900)$$

$$Q_{DA} = -7200 \text{ J} \quad (\text{calor cedido})$$

Como o problema pede apenas a quantidade de calor recebido, chegamos:

$$Q_{\text{recebido}} = Q_{BC} + Q_2 = 7200 + 7910$$

$$\therefore Q_{\text{recebido}} = 15110 \text{ J}$$

ANEXO B: POSSÍVEL SOLUÇÃO PARA O EXERCÍCIO 5

a) Expansão e compressão isotérmicas e dois processos isocóricos:

$$w_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$w_{34} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$w_{23} = w_{41} = 0$$

$$w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41} = nR(T_1 - T_2) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) =$$

$$\{(8 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,31 \text{ J/mol.K}) \times (95^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C}) \ln(2)\} \approx 3,3 \text{ J}$$

b)
$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{3,31 \text{ J}}{1,43 \text{ s}} \approx 2,3 \text{ W}$$

c)

$$|Q_1| = w_{12} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) =$$

$$\{(8 \times 10^{-3} \text{ mol}) \times (8,31 \text{ J/mol.K}) \times (368 \text{ K}) \ln(2)\} \approx 17 \text{ J}$$

d)
$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|T_2|}{|T_1|} = 1 - \frac{297 \text{ K}}{368 \text{ K}} = 19\%$$