



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

ELSON FERNANDO DAMASO DE ARAUJO

**PROJETANDO UM MOTOR *STIRLING* COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DE
TERMODINÂMICA**

**CAMPINA GRANDE
2016**

ELSON FERNANDO DAMASO DE ARAUJO

**PROJETANDO UM MOTOR *STIRLING* COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DE
TERMODINÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Física da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
licenciado em Física.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tâmara Pereira
Ribeiro de Oliveira Lima e Silva

**CAMPINA GRANDE
2016**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

A663p Araujo, Elson Fernando Damaso de.
Projetando um motor stirling como proposta para o ensino de termodinâmica [manuscrito] / Elson Fernando Damaso de Araujo.
- 2016.
21 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Profa. Dra. Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva, Departamento de Física".

1. Ensino de física. 2. Termodinâmica. 3. Recursos didáticos. 4. Atividades experimentais. 5. Motor Stirling. I.
Título. 21. ed. CDD 530.7

ELSON FERNANDO DAMASO DE ARAUJO

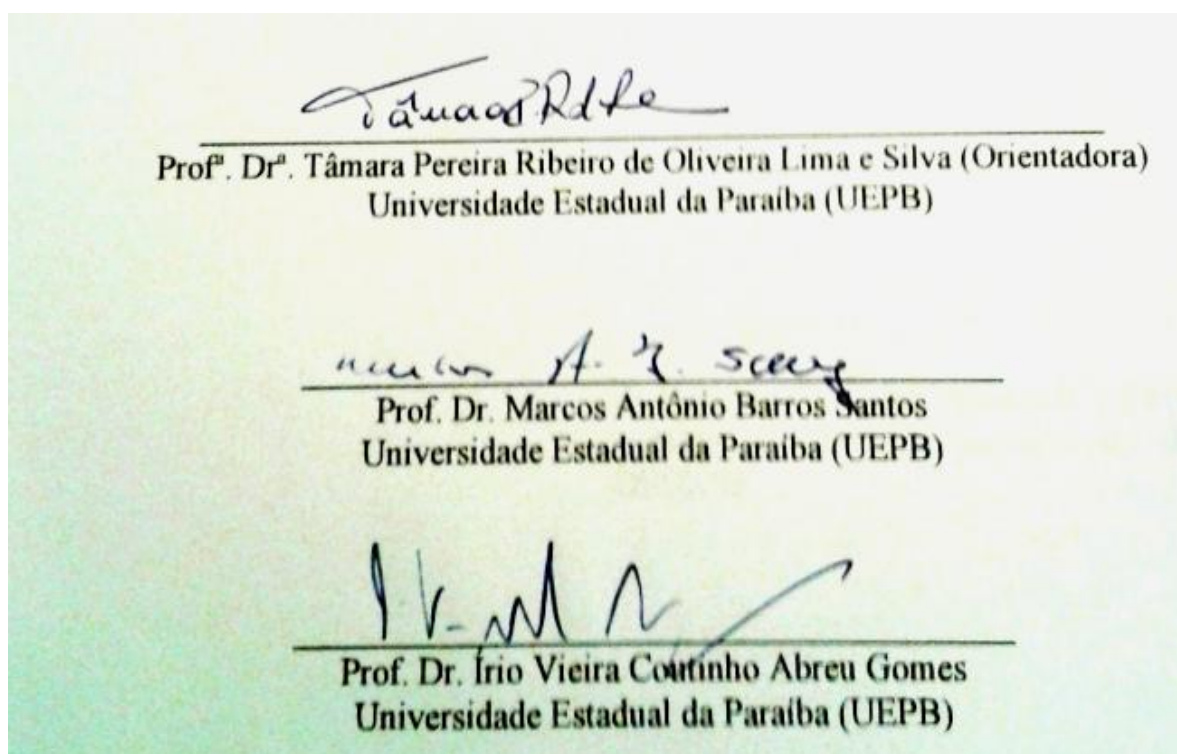
PROJETANDO UM MOTOR *STIRLING* COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DE
TERMODINÂMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Física da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
licenciado em Física.

Área de concentração: Física Geral.

Aprovado em: 31/ 05/ 2016.

BANCA EXAMINADORA



A Deus que me deu sabedoria para estudar e
concluir o Curso de Licenciatura de Física,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À minha família que desde a tenra idade me deu formação e me instruiu nos caminhos do saber, me motivando a gostar de estudar.

À minha esposa, Ana Raquel, e aos filhos, João e Sofia, que durante toda trajetória vieram abrilhantar meus estudos, tornando-os mais leves em cada etapa do curso.

À família da minha esposa que sempre se orgulhou de mim, externando admiração, carinho e apreço, fatores que muito me incentivaram.

A todos que fazem a Universidade Estadual da Paraíba, em particular aos professores do Curso de Licenciatura em Física, os quais foram mestres em apresentar o conhecimento que hoje tenho.

Destaco os professores Mará, Írio, Marcos Barros, Marcelo Germano, Roberto Martins, Maria Amélia e Jean, os quais foram dedicados e pacientes em repassar suas experiências profissionais com tanta sabedoria.

À professora Tâmara minha gratidão e admiração pela excelente profissional, a qual não mediu esforços em orientar e acompanhar meus estudos, publicações e trabalhos de final de curso.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.
Isaac Newton.

PROJETANDO UM MOTOR *STIRLING* COMO PROPOSTA PARA O ENSINO DE TERMODINÂMICA

Elson Fernando Damaso de Araujo¹

RESUMO

Neste trabalho, um motor *Stirling* (de combustão externa) foi projetado e construído como proposta didática para o Ensino da Termodinâmica. Sua confecção, a partir de materiais de baixo custo, tem o objetivo de simular o funcionamento de uma máquina térmica de ciclos contínuos (partindo do conceito de transferência de calor). Em sala de aula (nos níveis médio e de graduação universitária), ele pode ser usado como facilitador do aprendizado, permitindo a visualização, na prática, de conceitos como conservação de energia e processos termodinâmicos tais como compressão e expansão isotérmica. O aparato também pode ser utilizado para discutir o ciclo de Carnot através de uma abordagem experimental do limite teórico de rendimento máximo de uma máquina térmica.

Palavras-Chave: Motor *Stirling*; Combustão Externa; Leis da Termodinâmica; Ciclo de Carnot.

1. INTRODUÇÃO

Quando o aluno se depara com a disciplina de Física no Ensino Médio, a primeira reação geralmente é o medo. O grande poeta e escritor Ruben Alves expõe em um de seus vídeos: “É impossível aprender com medo”. E, para diminuir a apreensão e desconforto com a disciplina, o educador deve disponibilizar ferramentas e métodos para que o aprendizado aconteça da melhor e mais prazerosa forma possível.

Os professores do Ensino Médio já estão orientados pelos parâmetros Curriculares Nacionais a enfatizar aos alunos que, mais do que reproduzir dados, eles devem dominar classificações e identificar símbolos; ou seja, é necessário dar sentido ao que se está aprendendo.

Sendo assim, abordagem experimental, aliada aos conceitos teóricos da Física, desempenha um papel cada vez mais importante no Ensino [1]. A manipulação de um experimento científico pelo estudante colabora para aumentar sua curiosidade sobre o tema permitindo, muitas vezes, que certos conceitos na Física sejam absorvidos naturalmente sem

¹ Aluno de Graduação em Licenciatura em Física na Universidade Estadual da Paraíba – Campus I.
Email: elsonfernando@oi.com.br

que se precise, inicialmente, recorrer ao uso de equações. Isto ajuda a melhorar a compreensão dos estudantes em relação a temas básicos como, por exemplo, as Leis da Termodinâmica [2].

Pelas razões acima este trabalho, além de abordar a questão teórica e prática do motor de *Stirling* [3], propõe soluções pedagógicas para o ensino, em sala de aula, de temas associados à Termodinâmica. Para tanto, uma máquina térmica de ciclos contínuos (motor de combustão externa), que tem como base de funcionamento o princípio da transferência de calor entre uma fonte quente e outra fria [3], foi confeccionada a partir de materiais de baixo custo e seu comportamento foi analisado experimentalmente.

2. AS LEIS DA TERMODINÂMICA E MÁQUINAS TÉRMICAS

Desde a antiguidade a Mecânica e a Física Térmica eram estudadas separadamente, contudo sempre houve indícios de que deveria existir alguma relação entre as duas, visto que se era possível obter aquecimento por atrito, então era possível, dessa forma, obter calor a partir do trabalho mecânico [4]. Assim surgiu a Termodinâmica, cujo objetivo é estudar a transferência de calor associada às transformações de energia [5].

A Termodinâmica é regida por leis fundamentais: a Primeira Lei diz que a energia se transforma, mas sempre se conserva; já a Segunda Lei trata da possibilidade ou impossibilidade de se aproveitar certo tipo de energia [5].

Ainda há a Lei zero da Termodinâmica afirma que, "*Se dois corpos A e B estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo T, A e B estão em equilíbrio térmico entre si*" [6]. Essa lei permite a definição de uma escala de temperatura. São exemplos as escalas de temperatura usualmente manipuladas, como Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

No ano de 1853, Rankine definiu temperaturas iguais da seguinte maneira: "*Duas porções de matéria são ditas como tendo temperaturas iguais se nenhuma delas tende a transferir calor a outra*" [5]. Isso significa que, quando os corpos estão em equilíbrio térmico, não há uma diferença de energia térmica entre eles, portanto não ocorre transferência de calor.

A Primeira Lei da Termodinâmica é uma versão da lei de conservação da energia, associada ao Princípio de Joule [7]. Na Primeira Lei observa-se a equivalência entre trabalho e calor, onde se constata que a variação $Q - W$ independe do trajeto escolhido num processo termodinâmico [6] para um sistema sair de um estado inicial e chegar a um estado final.

A primeira declaração explícita da primeira lei da termodinâmica, dada por Rudolf Clausius em 1850 [7], refere-se a processos termodinâmicos cíclicos. Ele descreveu a primeira lei de outra forma, referindo-se à existência de uma função do estado do sistema chamada energia interna (U).

A energia interna é a soma das energias cinética e potencial de todas as partículas que constituem este sistema. Por esta razão, é considerada uma propriedade do sistema, e sua variação depende somente do estado inicial e estado final do processo. Ainda, quanto maior a taxa de calor que está sendo transferida a determinado sistema, maior será sua energia interna. Assim, temos: $Q > 0$, quando o sistema recebe calor; e $Q < 0$, quando o sistema perde calor.

Desta forma, quanto maior a energia interna de um sistema, maior será seu potencial para a realização de trabalho. Convenciona-se que $W > 0$ quando o sistema se expande (realiza trabalho) e perde energia para o meio externo, e $W < 0$ quando o sistema se contrai (sofre a ação de uma força associada a um agente externo) e recebe energia do meio externo.

Termodinamicamente, se o estado de um sistema muda, então ele está passando por um processo. A sucessão de estados pelos quais o sistema passa define o caminho do processo. Se, no final da trajetória, as propriedades tiverem regressado aos seus valores iniciais, o sistema foi submetido a um processo cíclico. Abaixo seguem exemplos de alguns processos termodinâmicos:

- Processo Adiabático: Processo em que não há troca de calor com o meio externo, $Q = 0$. A variação da energia interna se deve ao trabalho realizado pelo sistema ou sobre ele. Exemplo: desodorante aerossol.
- Processo Isovolumétrico: Durante este processo, também conhecido por isocórico o volume é mantido fixo e, portanto, o sistema não realiza trabalho ($W = 0$). A variação da energia interna depende da diferença de temperatura. Exemplo: aquecimento de um determinado volume d'água de 20 °C à 30 °C.
- Processo Cíclico: A energia interna não varia porque o volume, a pressão e a temperatura são iguais nos estados inicial e final. Exemplo: o ciclo de Carnot, comentado mais adiante.
- Expansão Livre: Processo adiabático no qual nenhum trabalho é realizado sobre ou pelo sistema. Exemplo: gás isolado termicamente que rapidamente passa a ocupar um espaço que antes era vácuo sem sofrer pressão contrária.

Durante um processo termodinâmico, parâmetros como pressão (p), temperatura (T) e volume (V) podem mudar. A equação que descreve a relação entre p , V e T para um sistema composto por um gás ideal, por exemplo, é dada por $PV = nRT$ [6], onde n é o número de mols do gás e R é a constante universal dos gases ($R = 8,31 \text{ J/mol.K}$).

Mudanças no estado de um sistema são produzidas pela interação com o ambiente através de calor e trabalho. A Lei Zero da Termodinâmica define temperatura, enquanto a Primeira Lei define a função de estado Energia Interna. Podemos simplificar dizendo que existe uma função U (energia interna) cuja variação durante uma transformação depende unicamente de dois estados, o inicial e o final. Num sistema fechado a indicação desta variação é dada como $\Delta U = Q - W$ [6]. Nesta equação, convencionou-se Q positivo quando é acrescida energia ao sistema, e negativo quando retirada; do mesmo modo, a energia interna diminui se for cedida energia para a vizinhança sob a forma de trabalho W , ou seja, se o sistema realizar trabalho.

Para o cálculo de trabalho (W) temos [6], com p sendo a pressão exercida sobre uma área A :

$$\begin{aligned} dW &= F \cdot dx \\ dW &= (p \cdot A) dx \\ dW &= p \cdot (A dx) \\ dW &= p \cdot dV, \end{aligned} \tag{1}$$

onde dV é o volume na forma infinitesimal. Integrando a equação (1) chegamos a:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p \, dV, \tag{2}$$

onde V_i é o volume do estado inicial e V_f é o volume do estado final.

Para o cálculo do calor (Q), usamos [6]:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i), \tag{3}$$

onde, c é o calor específico da substância, m é sua massa e T é sua temperatura.

Quando há mudança de estado físico, temos

$$Q = m \cdot L, \tag{4}$$

onde m é a massa e L é calor de transformação (específico de cada substância).

Podemos transferir energia para dentro ou para fora do sistema, seja através de calor ou pela forma de trabalho. Suponhamos que o sistema esteja em um estado inicial i e realiza trabalho, expandindo-se. Este trabalho mecânico diminui a energia interna do sistema, então:

$$\Delta U = -W.$$

Podemos também variar o estado do sistema colocando-o em contato térmico com outro sistema cuja temperatura T esteja diferente. Assim, há certa quantidade de energia em trânsito, que se desloca do sistema de maior valor de T para o de menor valor de T , fazendo com que haja um aumento da energia interna do sistema inicialmente com menor quantidade de energia, isto é, $\Delta U = Q$.

A Segunda Lei da Termodinâmica foi enunciada por Sadi Carnot e diz que para que um sistema realize conversões de calor em trabalho, ele deve realizar ciclos entre uma fonte quente e uma fonte fria de forma contínua em um ciclo fechado [8], como simbolizado na Figura 1. No entanto, nenhuma máquina que venha a realizar um ciclo desse tipo poderá ter eficiência de 100%, pois mais energia é extraída da fonte quente do que cedida pela fonte fria. Na Figura 1, os trajetos AB e CD representam processos isotérmicos. Já os trajetos BC e DA representam processos isovolumétricos (volume V constante); neste caso, a energia interna do sistema varia somente pela troca de calor deste com sua vizinhança.

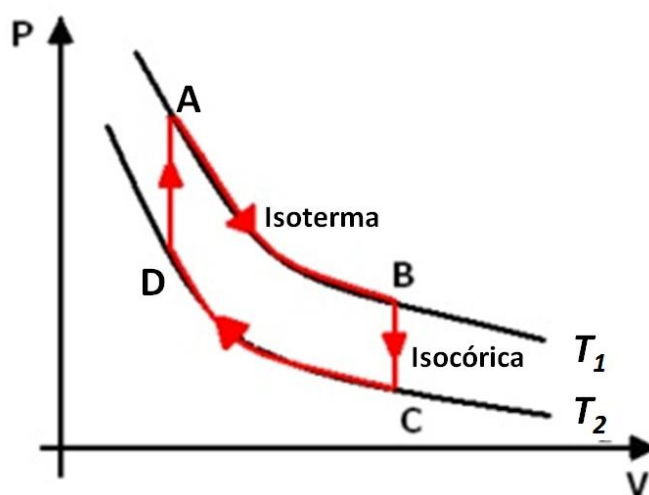


Figura 1- Representação de processo cíclico de um gás através do seu diagrama $p \times V$ (pressão do gás em função de seu volume). As curvas de temperatura constante (T_1 e T_2) são isotérmicas; e as curvas que apresentam volume constante são isocóricas.

A Segunda Lei da Termodinâmica também está associada ao conceito de entropia (S), medida associada ao grau de desordem das partículas em um sistema físico [2]. Por exemplo: um sistema de partículas submetidas a uma variação de temperatura tem o estado de agitação de suas moléculas alterado. Então, considerando esta agitação como a desordem do sistema, podemos concluir que:

- quando um sistema recebe calor $Q > 0$, sua entropia aumenta;
- quando um sistema cede calor $Q < 0$, sua entropia diminui;
- se o sistema não troca calor $Q = 0$, sua entropia permanece constante.

Segundo Rudolf Clausius, que utilizou a idéia de entropia pela primeira vez na segunda metade do século XIX, para o estudo desta como grandeza física é mais útil conhecer sua variação do que seu valor absoluto. Assim, Clausius definiu que a *variação de entropia* (ΔS) em um sistema como [2]:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}, \quad (5)$$

onde T representa a temperaturas de equilíbrio do sistema. É importante destacar que a variação de entropia do sistema como um todo (formado por mais de um subsistema, como por exemplo, cubos de gelo numa piscina (esta atuando como reservatório térmico), não pode ser negativa (isso violaria a Segunda Lei).

Faz-se oportuno, neste momento, associar o conceito de entropia ao comportamento termodinâmico de um motor de combustão interna, que é uma máquina térmica que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica [9]. O processo de conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases.

São considerados motores de combustão interna aqueles que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho. Ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e finalmente exaustão. Assim, este tipo de motor distingue-se dos ciclos de combustão externa, nos quais os processos de combustão ocorrem externamente ao motor. Neste caso, os gases de combustão transferem calor a um segundo fluido que opera como fluido de trabalho, como ocorre nos ciclos de Rankine [9].

Motores de combustão interna, como visto na Figura 2, são popularmente chamados de motores a explosão. Esta denominação, apesar de frequente, não é tecnicamente correta. De fato, o que ocorre no interior das câmaras de combustão não é uma explosão de gases. O que impulsiona os pistões é o aumento da pressão interna da câmara, decorrente da combustão (queima controlada com frente de chama).

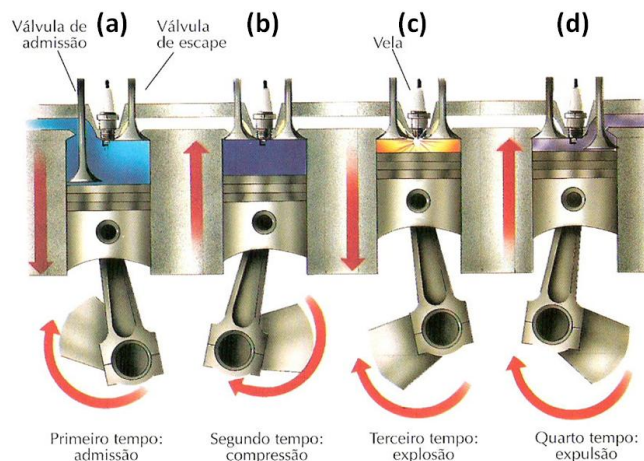


Figura 2- Máquina de combustão interna baseada no Ciclo de Otto [10].

A Figura 2 acima mostra os quatro tempos de um ciclo completo de um motor de combustão interna baseado no Ciclo de Otto, sendo realizado em duas voltas do eixo de

manivelas ou 720° . A Figura 2(a) representa o 1º tempo em que o êmbolo ao descer, aspira o ar com combustível para dentro do cilindro com a válvula de admissão aberta. A Figura 2(b) (2º tempo) representa a compressão; a válvula de admissão é fechada, o êmbolo ao subir, comprime a mistura ar-combustível, aquecendo-a. Na Figura 3(c) (3º tempo), uma centelha inflama a mistura, que “explode”, expandindo esse gás e, empurrando o êmbolo para baixo. Na Figura 3(d) (4º tempo - escapamento) a válvula de escapamento é aberta, o êmbolo ao subir, expulsa do cilindro os gases de combustão.

3. EXPERIMENTO

O motor *Stirling* [11] é um motor de combustão externa, bem diferente dos motores de combustão interna como os dos automóveis, por exemplo. O princípio de funcionamento de um motor desse tipo é que uma quantidade fixa de gás encontra-se encerrada no interior do motor, fazendo-o funcionar em um ciclo termodinâmico, composto em quatro fases e executando-as em dois tempos do pistão que realiza o trabalho.

O motor *Stirling* utilizado neste projeto foi o “Gama”, cujos cilindros estão alinhados horizontalmente, ligados a um eixo que está afixado a um volante de inércia que também balanceia o sistema. O material usado para fabricar o motor encontra-se descrito no Apêndice deste trabalho.

O motor é constituído por dois pistões; um converte o ar comprimido em trabalho mecânico (através do uso de uma seringa) e o outro é o pistão de deslocamento (fazendo-se uso de uma latinha de energético), que faz um movimento de “vai e vem” dentro do cilindro de pressão que tem duas extremidades diferentes:

- A proveta, que é a fonte quente (com temperatura T_1) e;
- O dissipador de alumínio (à temperatura ambiente) que é a fonte fria (com temperatura T_2).

Ambas as fontes são conectadas mecanicamente em um eixo de manivelas em quadratura de fase. Quando um pistão atinge uma das extremidades, o outro encontra-se a meio caminho. O pistão de deslocamento tem a função exclusiva de movimentar o ar aquecido da extremidade da proveta, fonte quente, para o dissipador de alumínio, fonte fria, e vice-versa. Ele não realiza trabalho. Também foi usada uma lamparina para alimentar a fonte quente e demonstrar o motor de *Stirling* funcionando como máquina térmica, neste caso com $T_1 > T_2$. A Figura 3 ilustra o funcionamento dos cilindros do motor, dividido em 4 fases:

- 1) Fase 1: representa um aquecimento isocórico;

- 2) Fase 2: representa uma expansão isotérmica;
- 3) Fase 3: representa um resfriamento isocórico e;
- 4) Fase 4 (fechando o ciclo): representa uma compressão isotérmica.



Figura 3: Os quatro tempos do motor de Stirling mostrando as respectivas posições de cada êmbolo em cada tempo. As duas isotermas do ciclo da máquina de Stirling não são ligadas por processos adiabáticos, como na máquina de Carnot, mas por processos isocóricos.

Afixado ao volante, encontra-se uma polia que faz o acoplamento do motor *Stirling* a um motor de corrente contínua que, nesse caso, faz o papel de gerador de energia elétrica, ao qual está conectada uma lâmpada (LED) que acende quando o motor está em funcionamento, sendo um exemplo de aplicação do processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como observado na Figura 4, o aparato funcionou de modo perfeito, uma vez que todas as fases descritas anteriormente ocorreram de forma satisfatória. O volante de inércia do motor foi girado em velocidade suficiente o que fez com que, através de correias acopladas ao gerador, este fosse capaz de fornecer a energia necessária para acender um LED, demonstrando assim o funcionamento da máquina experimentalmente.

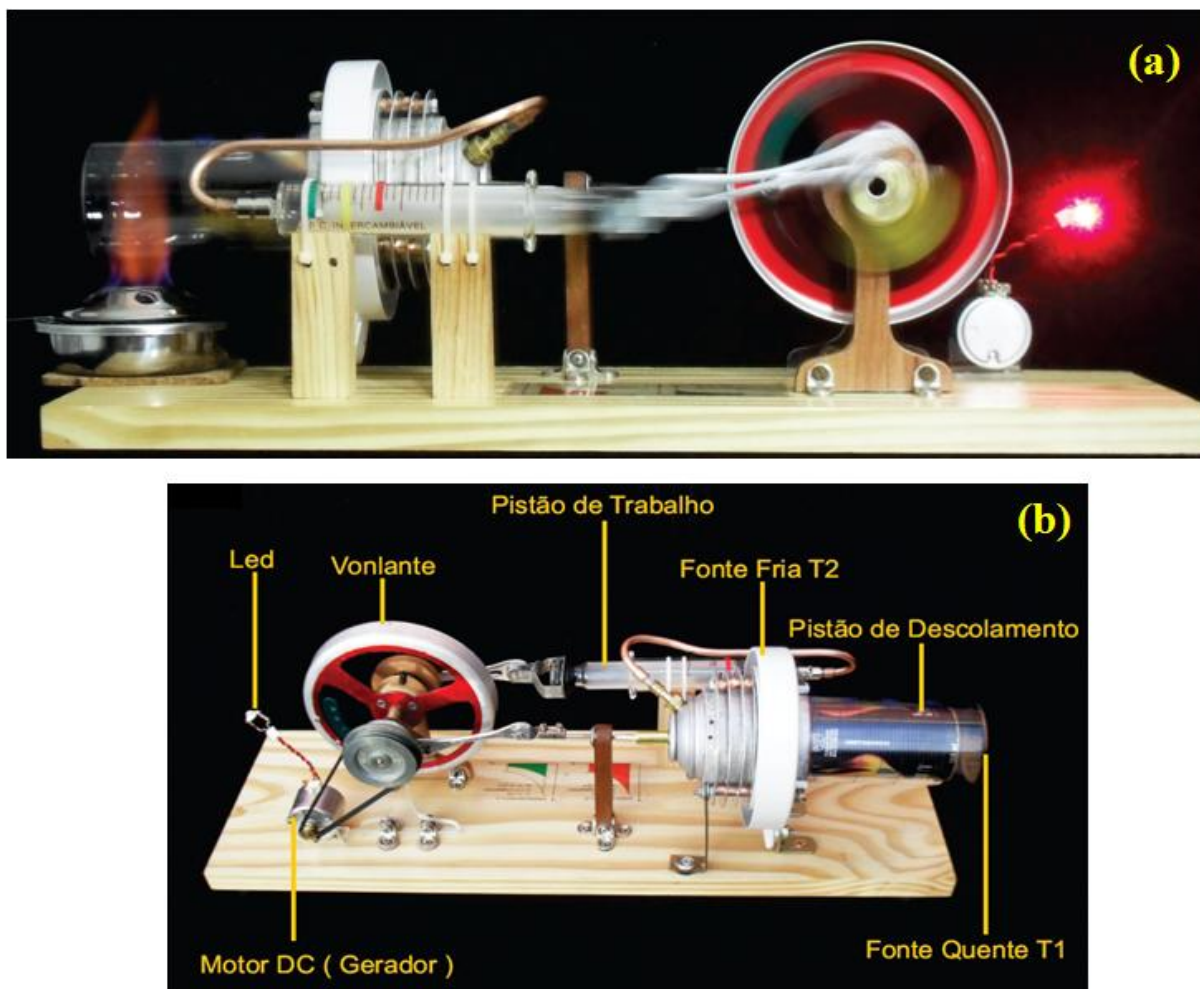


Figura 4: Motor *Stirling* em funcionamento (a), e suas partes específicas com as fontes quente e fria (b).

O experimento permitiu visualizar as Leis da Termodinâmica de forma prática e de fácil entendimento ao público alvo para quem foi projetado. Devido à grande proximidade do Ciclo de *Stirling* com o de *Carnot* (considerado como sendo o de uma máquina ideal), pode-se fazer uma comparação entre eles, como representado pela Figura 5.

Também foi possível visualizar a ocorrência do princípio da conservação da energia [7] no instante em que aconteceram os fenômenos de troca de calor; este é um dos enfoques da referida máquina [12].

Na confecção do motor, observou-se a sua auto sustentabilidade uma vez que, semelhantemente ao uso de células fotovoltaicas que alimentam baterias, este motor pode

aproveitar a luz solar como fonte direta de energia, sendo esta uma energia limpa e abundante naturalmente. A luz solar atuando como fonte pode substituir satisfatoriamente o papel da lamparina, uma vez que se trata de motor de combustão externa.

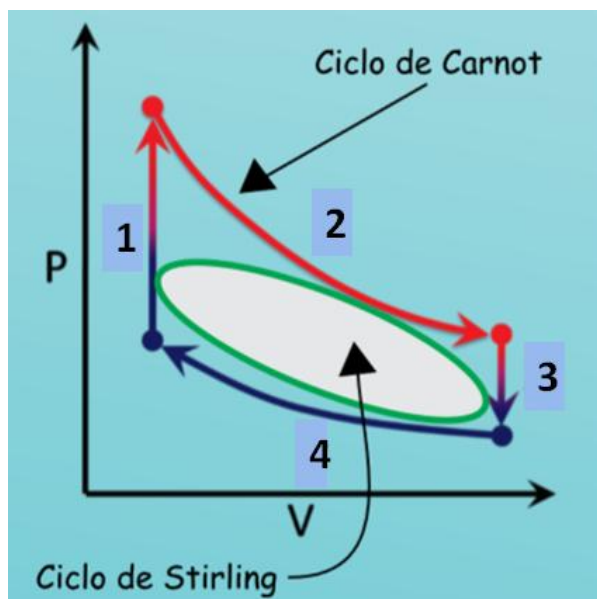


Figura 5: Comparação entre os Ciclos de Carnot (para uma máquina ideal) e o ciclo de *Stirling* (base de funcionamento da máquina projetada neste trabalho). Os números correspondem aos processos termodinâmicos associados às fases do motor descritas na Figura 3.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento teve êxito desde a coleta do material necessário para a sua confecção até a realização do teste final.

A máquina confeccionada neste trabalho demonstrou que é possível inserir uma simples tecnologia artesanal (de baixo custo) nas aulas de Física; e que tal dispositivo pode se tornar instrumento didático nas aulas sobre Termodinâmica, e também como proposta de kit experimental nesta área para os professores de instituições que não disponham de laboratórios equipados para realização de experimentos sofisticados.

Ainda que a lamparina tenha sido usada como fonte quente para demonstração do funcionamento do motor, a idéia principal do projeto é a utilização dos raios solares como fonte de energia direta, que o fará funcionar através de um sistema óptico de lentes convergentes e/ou utilizando-se uma parábola espelhada para focalizar a luz.

Como perspectiva deste trabalho, para fins didáticos, pode-se fazer a operação inversa; ou seja, aplicando-se tensão de corrente contínua no motor elétrico (gerador), que por sua vez faz girar o volante, o motor *Stirling* pode ser usado como bomba térmica ($T_1 > T_2$), ou como refrigerador ($T_1 < T_2$), dependendo do sentido de rotação do volante; podendo contribuir, assim, como facilitador de aprendizado de máquinas térmicas.

FABRICATION OF A STIRLING ENGINE AS A PROPOSAL FOR TEACHING THERMODYNAMICS

ABSTRACT

In this work, a home-made Stirling engine was built with the idea to be a didactical tool for Thermodynamics teaching. It was made from low expense materials aiming to simulate the behavior of a thermal machine of continuous cycles (through heat transfer concepts). The engine can be used in classroom demonstrations to favour learning, allowing high school and undergraduate students to get a practical visualization of concepts as energy conservation and thermodynamic processes (and also discuss Carnot cycle) as long as, manipulating the apparatus, it is possible, for the students, to observe the phenomena and to make a link to theory in a simple way.

Keywords: Stirling Engine; External Combustion; Laws of Thermodynamics; Carnot Cycle.

REFERÊNCIAS

- [1] A. M. F. PASSOS; M. A. MOREIRA, *Avaliação do Ensino de Laboratório: Uma Proposta Alternativa*, **Revista Brasileira de Física**, v. 12, p. 375 (1982).
- [2] F. REIF, *Fundamentals of Statistical and Thermal physics*, McGraw-Hill (1965).
- [3] G. WALKER, *Stirling Engines*, Oxford Univ. Press (1980).
- [4] C. A. TRUESDELL, *The Tragical History of Thermodynamics, 1822-1854 (Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences)*, p. 262, Springer (1980).
- [5] M. CHIQUETTO; B. VALENTIM; E. PAGLIARI, *Aprendendo Física: Física Térmica e Ondas*, Scipione (1996).
- [6] H. D. YOUNG; R. A. FREEDMAN, **Física II – Termodinâmica e Ondas**, 12ª Edição, Addison Wesley (2008).
- [7] J. C. PASSOS. *Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.31 (2009).
- [8] D. HALLIDAY; J. WALKER; R. RESNICK. *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Vol. 2, 7ª Edição, LTC (2003).
- [9] D. SCHULZ, UFRS. Link: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/combustao_interna.htm (2009).
- [10] T. DIAS. Link: <http://mecanicaonline.com.br/wordpress/2016/02/10/coluna-mecanica-em-dias-o-motor-de-combustao-interna/> (2016).
- [11] R. SIER, *REVEREND ROBERT STIRLING D.D: A Biography of the Inventor of the Heat Economiser and Stirling Cycle Engine*, Editora L.A. Mair (1995).
- [12] S. A. QUADOS; *Termodinâmica e a Invenção das Máquinas Térmicas*. Editora Scipione (2008).

APÊNDICE – MATERIAL USADO NA FABRICAÇÃO DO MOTOR *STIRLING*

Para a confecção do motor deste trabalho foi utilizado material ilustrado na Figura 6 e listado abaixo:

- Prateleira de madeira;
- Velho (LNB) de antenas parabólicas;
- Forminha de mini-pizza;
- Latinha de energético;
- Tubo de cobre e latão;
- Proveta, seringa; e
- Parafusos, correias e braçadeiras de nylon.



Figura 6: Material usado para montar o motor *Stirling*.