

## MOTOR STIRLING COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NO APRENDIZADO DA TERMODINÂMICA

**Diandra C. X. S. Melo** – diandramelo@hotmail.com

**Felipe P. Maia** – felipepm99@hotmail.com

**Gabriel I. M. Tapia** – gmedinat@ct.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Engenharia Mecânica.  
Avenida Senador Salgado Filho, S/N. CP 1524, Campus Universitário, Lagoa Nova.  
CEP 59072-970, Natal, RN, Brasil.

**Resumo:** Este artigo apresenta a aplicação de trabalhos práticos como instrumento inovador no processo de aprendizagem e elucidação de conteúdo teórico para alunos de engenharia. O seguinte estudo baseia-se na proposta de projeto destinada aos componentes curriculares Termodinâmica I e II, pertencentes ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da UFRN. O projeto consiste na construção de um motor Stirling caseiro pelos discentes. Os trabalhos submetidos para os períodos letivos de 2017.1 e 2017.2 foram avaliados pelo projeto de monitoria das disciplinas, com base em três produtos principais: modelo CAD completo, vídeo de construção e apresentação do motor e trabalho escrito. Por parte dos discentes, a construção do motor Stirling foi realizada com materiais acessíveis e de baixo custo, e os dados experimentais de desempenho foram obtidos utilizando diferentes instrumentos de medição. Analisando os resultados obtidos, na forma de relatórios e vídeos, concluiu-se que a aplicação de um projeto prático melhorou o entendimento de conceitos da Termodinâmica - como Trabalho, Calor, Ciclo de Carnot, Fluido de Trabalho e Irreversibilidades, como consequência da dinamização do processo de aprendizado. Além disso, observou-se o desenvolvimento de habilidades relacionadas à gestão do projeto, solução de problemas e trabalho em equipe, essenciais a qualquer engenheiro, e de noções de metodologia científica, traduzida em obtenção de resultados a partir de métodos bem definidos.

**Palavras-chave:** Projeto Prático, Termodinâmica, Motor Stirling.

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do ensino está baseado no uso de metodologias relacionadas ao ensino, a partir da aplicação de recursos capazes de proporcionar o entendimento do conteúdo de forma mais significativa (MOREIRA, 2006). As estratégias didáticas inovadoras são objetos de estudo importantes para o aprendizado, uma vez que podem facilitar a assimilação de conteúdos complexos e estimular a lógica e a criatividade dos discentes. Nesse panorama, cabe aos professores elaborarem estratégias metodológicas que favoreçam uma maior interatividade entre os objetos de estudo e os alunos.

Segundo Ferretti (1995), inovar significa adotar modificações de maneira planejada, objetivando a melhoria e o desenvolvimento do processo. Os docentes assumem posição favorável quanto à inovação e às vantagens da utilização de metodologias alternativas no

ensino, contudo ainda há grande resistência ao uso delas em seus métodos educacionais. Mesmo motivados, sentem-se inseguros diante das novas ações.

Quanto aos benefícios da aplicação das práticas no processo avaliativo de ensino, Andrade e Massabni (2011) destacam que a realização de projetos de cunho prático incentiva o gosto pela área; sendo assim, os alunos tendem a se esforçar mais para desenvolvê-las e apresentá-las, gerando melhores rendimentos. Cardoso (2013), em sua dissertação acerca de uso das atividades práticas no ensino de ciências, demonstra de maneira quali-quantitativa que as mesmas, quando empregadas na metodologia de ensino, tornam o conteúdo mais atrativo e a aprendizagem mais eficiente.

Não só a absorção de conteúdo torna-se mais efetiva, bem como os desafios para a realização de tarefas práticas estimulam a capacidade cognitiva de inovação do discente. Como maneiras de estímulo à criatividade, Wisdom (2006) defende a aplicação de tarefas diversificadas no ambiente de ensino, a liberdade aos estudantes para trabalharem de maneira diferenciada, a proposta de desafios reais, exigentes e estimulantes e o emprego de métodos avaliativos que não permitam respostas pré-determinadas.

É nesse panorama que surge a proposta apresentada no projeto de monitoria intitulado “Metodologias Alternativas no Processo de Ensino e Aprendizagem nas Componentes Curriculares de Sistemas Térmicos”, voltado ao curso de Engenharia Mecânica da UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte). Na disciplina, a aplicação de cunho prático é solicitada aos discentes por meio do desenvolvimento de um projeto baseado na construção de um motor Stirling caseiro, destinado a uma aplicabilidade específica, a qual deve ser apresentada em uma competição didática.

O seguinte artigo aborda a elucidação de conteúdos vistos de maneira teórica por meio da aplicação de projetos práticos para os discentes nos componentes de Termodinâmica I e II da UFRN. Os benefícios da utilização dessa metodologia de inovação, como apresentados pelas referências citadas, serão fundamentados a partir dos resultados obtidos de acordo com uma metodologia pré-estabelecida, conjuntamente apresentada neste trabalho.

## 2 CONCEITOS ABORDADOS

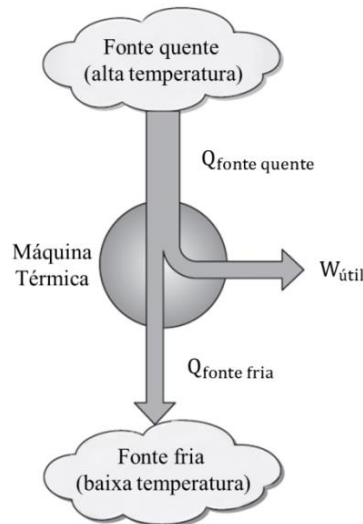
O entendimento e a elaboração do projeto em questão têm, por principal objetivo, a abordagem e o esclarecimento de temas voltados ao estudo da Termodinâmica, em especial os conceitos relacionados a máquinas térmicas. Os principais assuntos elucidados serão apresentados nesta seção.

### 2.1 Trabalho e calor em máquinas térmicas

De acordo com Çengel e Boles, 2013, máquinas térmicas são dispositivos que convertem calor em trabalho. Elas são necessárias porque é impossível realizar essa conversão de forma direta. Conforme pode ser visto na Figura 1, o seu funcionamento se dá pelo recebimento de calor de uma fonte à alta temperatura (fonte quente), conversão de parte desse calor em trabalho útil e, por fim, rejeição do calor restante para uma fonte à baixa temperatura (fonte fria). Para tal, esses dispositivos operam em ciclos termodinâmicos e utilizam um fluido de trabalho.

Embora haja inúmeros conjuntos de processos diferentes para realizar tais operações de forma cíclica, qualquer máquina térmica segue esse princípio. Assim, é importante o entendimento e identificação dessas fontes quente e fria, das taxas de calor fornecidas e recebidas por elas e o modo de geração do trabalho útil.

Figura 1 – Máquina Térmica.



Fonte: ÇENGEL e BOLES, 2013 (adaptado)

## 2.2 Fluido de trabalho

A matéria contida dentro de um volume de controle para um sistema pode apresentar-se nos estados de líquido, vapor ou gás, sendo denominada como fluido de trabalho (EASTOP e MCCONKEY, 1993). É uma substância fluida que, por mudanças de temperatura, volume e pressão, permite a realização de processos ou ciclos termodinâmicos. De maneira geral, em um sistema termodinâmico, o fluido de trabalho é uma substância que absorve ou transmite energia.

## 2.3 Ciclo reversível de Carnot

O ciclo de Carnot é representado por uma sequência de transformações gasosas as quais constituem uma máquina térmica de rendimento máximo operando em ciclos, que atua entre duas fontes térmicas – uma de alta temperatura, a outra de baixa. Quanto maior for a temperatura da fonte quente, maior será seu rendimento para uma substância que se comporte como um gás ideal (SCHULZ, 2009). É composto por processos reversíveis que, uma vez ocorridos, podem ser invertidos, fazendo o sistema tornar à sua situação inicial, sem vestígios de modificações (BORGNAKKE e SONNTAG, 2009).

Esse ciclo possui invariavelmente os quatro mesmos processos básicos, independente do fluido de trabalho atuante:

1. Expansão isotérmica reversível (o sistema recebe uma quantidade de calor da fonte de aquecimento);
2. Expansão isovolumétrica adiabática reversível;
3. Compressão isotérmica reversível (o sistema cede uma quantidade de calor para a fonte de resfriamento); e
4. Regeneração isovolumétrica adiabática reversível (ÇENGEL e BOLES, 2013).

## 2.4 Irreversibilidades

As irreversibilidades são os fatores que levam um processo a ser considerado irreversível, ou seja, quando a troca líquida de calor e a realização do trabalho entre o sistema considerado

e o ambiente não for nula para o processo combinado (ÇENGEL e BOLES, 2013). Dentre os fatores de irreversibilidade, para os processos termodinâmicos de máquinas térmicas, destacam-se o atrito, a expansão não resistida, a transferência de calor com diferença finita de temperatura e a mistura de duas substâncias diferentes.

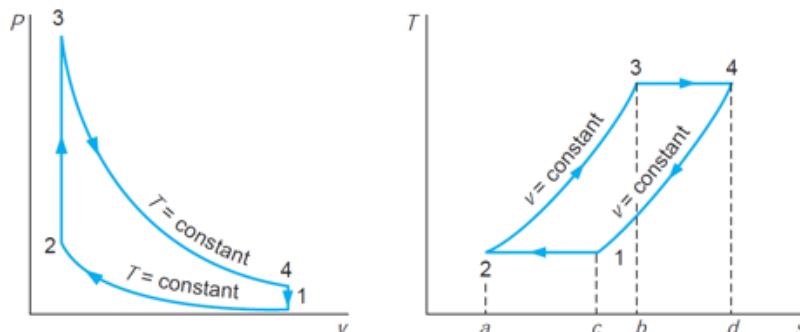
### 3 MOTOR STIRLING

O propósito de um motor é converter a energia suprida como calor ou energia retida em combustível para trabalho. O motor Stirling é um motor de combustão externa, capaz de operar com ampla gama de temperaturas e diferentes tipos de combustíveis, como etanol, biomassa ou solar.

Foi desenvolvido em 1816 pelo escocês Robert Stirling, e seu ciclo possui o mesmo princípio do ciclo de Carnot, uma vez que se fundamenta na compressão e expansão cíclica do fluido de trabalho (ar) a diferentes temperaturas. As temperaturas alternadas provocam a expansão e contração do fluido de maneira cíclica, movimentando os êmbolos ligados a um eixo comum, transformando o calor líquido em trabalho.

A esquematização dos diagramas *pressão vs volume* e *temperatura vs entropia* para o ciclo Stirling podem ser vistos na Figura 2. Nele, calor é transferido ao fluido de trabalho de 2 para 3 (a volume constante), e também de 3 para 4, onde ocorre uma expansão isotérmica. Calor é rejeitado do ciclo de 4 para 1 (também a volume constante) e durante o processo de compressão isotérmica, de 1 para 2 (BORGNAKKE e SONNTAG, 2009).

Figura 2 – Ciclo a ar padrão Stirling.



Fonte: BORGNAKKE e SONNTAG, 2009.

#### 3.1 Tipos de motor Stirling

Existem três principais configurações para o tipo de motor em questão, sendo estas classificadas pelo seu funcionamento e posicionamento dos pistões: alfa, beta e gama. Segundo Foster, 2011, essas configurações são descritas da seguinte forma:

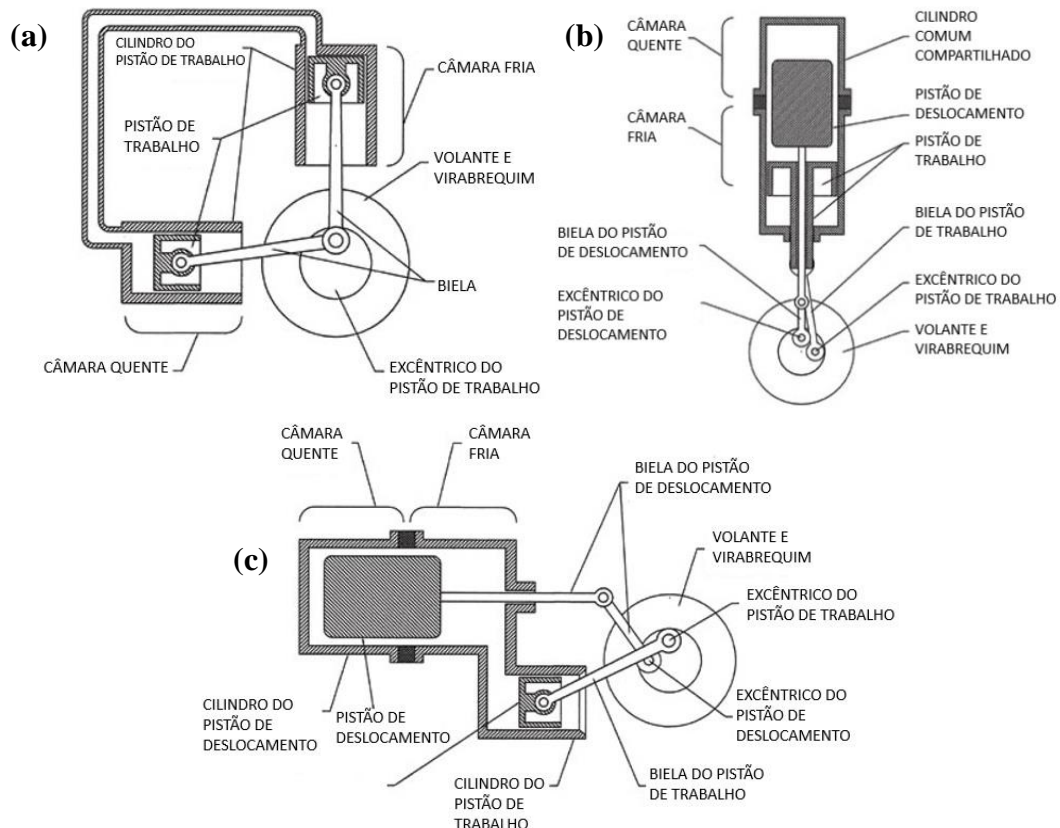
O motor Stirling alfa (Figura 3a) é composto por dois pistões de trabalho contidos em cilindros separados, sendo um mantido à alta temperatura e outro à baixa temperatura. Possui elevada relação potência-volume, contudo a alta temperatura do pistão quente prejudica a durabilidade dos componentes vedantes, desencadeando problemas técnicos em seu funcionamento.

A configuração beta (Figura 3b) é constituída por um único cilindro, separado termicamente por duas câmaras ou regiões: uma quente e uma fria. Nessa configuração, movimentam-se dois pistões alinhados: o pistão de trabalho, responsável pelo trabalho do

motor; e o pistão de deslocamento, interno ao cilindro e deslocador do fluido de trabalho entre as câmaras quente e fria.

Já o motor gama (Figura 3c) possui dois cilindros distintos: um destinado ao funcionamento do pistão de deslocamento, contendo as câmaras fria e quente, e outro destinado à movimentação do pistão de trabalho. A configuração gama possui menor taxa de compressão, contudo é mecanicamente simples e amplamente utilizada em motores Stirling com cilindros múltiplos.

Figura 3 – Tipos de motor Stirling. (a) Alfa, (b) Beta, (c) Gama.



Fonte: FOSTER, 2011 (adaptado).

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho foca na aplicação de um projeto prático, o motor Stirling, nos componentes curriculares Termodinâmica I e Termodinâmica II, que tratam de termodinâmica básica e aplicada, respectivamente. O período analisado foi o ano de 2017 e, portanto, os semestres letivos 2017.1 e 2017.2. Dessa forma, para a realização do estudo dos benefícios da aplicação desse projeto, é necessário detalhar o que foi solicitado aos alunos, assim como o que foi observado na execução.

### 4.1 Motor Stirling como alternativa de projeto didático

O desenvolvimento experimental de um protótipo para o motor Stirling do tipo gama é factível e economicamente viável, uma vez que sua construção é simples e o mesmo pode ser confeccionado com materiais reciclados, de baixo custo e de fácil aquisição. A literatura utilizada como base para a elaboração desse projeto é ampla, e tutoriais acerca de sua

construção podem ser encontrados online, a exemplo do blog Manual do Motor Stirling (WAGNER, 2018).

## 4.2 O projeto

Em ambas as disciplinas, o projeto proposto foi a construção de um motor Stirling tipo Gama, a ser utilizado para algum fim. Para tal, os discentes, divididos em grupos de quatro componentes, tiveram liberdade para escolha de materiais. A Tabela 1 apresenta as especificações do projeto de cada disciplina, assim como o número de grupos que os executaram.

Tabela 1 - Projetos práticos aplicados.

	Tipo do motor	Objetivo	Combustível	Observações	Nº de grupos
Termodinâmica I	Gama	Mover um barco	Livre	Apenas o motor Stirling deve movimentar o barco	9
Termodinâmica II	Gama	Uso da energia solar	Energia solar	Deve ser utilizado um concentrador parabólico	18

Para que fosse possível a avaliação da execução dos projetos, alguns produtos foram exigidos. Foram eles:

- Relatório: Trabalho escrito na forma de artigo científico, limitado a seis páginas, incluindo tabelas, figuras, etc. Neste trabalho, a metodologia deveria ser apresentada, e os resultados expostos e discutidos.
- Vídeo de apresentação: Vídeo mostrando as etapas do desenvolvimento do projeto, abordando a construção do motor, do barco e do concentrador solar (a depender da disciplina). Ainda, o produto final deveria ser apresentado.
- Modelo CAD completo: Projeto do motor em CAD (Solidworks ou similares). Embora não fosse obrigatório, animações com o funcionamento dos componentes enriqueceriam o trabalho.

Além da avaliação da qualidade desses produtos descritos, ainda foram levados em consideração a criatividade e o desempenho do sistema apresentado, seja o barco ou o concentrador solar.

## 4.3 Execução

Diversos são os materiais possíveis de serem empregados para a construção de um motor Stirling. Em geral, são materiais acessíveis e reaproveitáveis. Latas de refrigerante, balões de festa e canos de PVC são alguns dos itens mais utilizados. A partir de análise dos produtos desenvolvidos pelos discentes, foi possível desenvolver a Tabela 2, que relaciona os principais objetos empregados e a função deles no motor.

Ainda, para o projeto dos barcos foi observado, em geral, o uso de placas de isopor ou garrafas PET para construção do casco. No caso dos concentradores solares, antenas parabólicas foram reaproveitadas, tanto para utilização direta quanto como molde para laminação do concentrador parabólico em compósito (fibra de vidro e resina poliéster).

Tabela 2 - Itens mais usados na confecção dos motores Stirling.

Itens	Função
Latas de refrigerante	Carcaça e estrutura do motor
Canos e joelhos de PVC	Conexão entre câmara quente e fria
Raios de bicicleta	Virabrequim e mecanismo biela-manivela
Balão de festa	Diafragma/pistão de trabalho
Lã de aço	Pistão de deslocamento
CDs	Volante
Câmara de ar de motocicleta	Vedação do sistema
Conectores de fio	Montagem dos raios de bicicleta
Colas em geral	União das peças do motor

Tal como os materiais, a construção desses motores é bastante simples, podendo ser realizada utilizando ferramentas comuns disponíveis em qualquer casa, como tesouras, alicates, estiletes, chaves de fenda e chaves Phillips. Alguns dos processos envolvidos são: corte, furação, colagem, conformação (dobramento), entre outros.

### ***Instrumentos de medição***

Para o desenvolvimento do relatório, os discentes empregaram, também, alguns instrumentos de medição, a fim de medir os parâmetros de desempenho do motor. As temperaturas das fontes quente e fria, a massa dos componentes e a rotação do volante foram as variáveis mais aferidas. Entre outros instrumentos, pode-se destacar a utilização de tacômetro para a avaliação da rotação do eixo do motor, de pirômetro óptico para aferir as temperaturas das fontes quente e fria e de balança digital para avaliar as massas dos componentes. Tais ferramentas foram fornecidas pelos laboratórios vinculados ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRN.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Baseado na metodologia de aplicação do projeto prático, produtos, na forma de trabalho escrito, vídeo e modelo CAD, foram entregues pelos grupos de alunos. A Figura 4 apresenta alguns dos motores confeccionados, em conjunto com o barco ou concentrador solar.

Por meio da análise realizada sobre os relatórios apresentados, observa-se, sobretudo, o entendimento de conceitos termodinâmicos teóricos por parte dos alunos, bem como a identificação do funcionamento do motor Stirling como máquina térmica. Os principais componentes dessa máquina (fontes quente e fria, e eixo de potência) foram fisicamente identificados por eles, que também realizaram algumas medições, de temperatura e rotação do eixo, para quantificar os calores absorvidos e rejeitados e o trabalho fornecido pelo eixo, de forma a estimar a eficiência térmica de seus motores. Outro ponto muito observado foi a descrição da variação da eficiência com as diferentes temperaturas das fontes quente e fria. Para a fonte quente, os discentes utilizaram, em geral, lamparinas a álcool construídas com latas descartáveis, que garantiam uma temperatura relativamente constante após certo tempo

de aquecimento do fundo das latas. O problema encontrado foi na fonte fria, em geral um reservatório para algum fluido refrigerante, como a água. Independente do quão gelada estivesse a água de resfriamento no início, ao longo do tempo sua temperatura aumentava, em razão da rejeição de calor pelo motor, e conseqüentemente a eficiência do motor caía. Alguns grupos visualizaram isso e registraram na forma de gráficos.

Figura 4 – Motores construídos pelos discentes de Termodinâmica I e II.



Fonte: autores.

Ainda, na discussão de seus projetos, os discentes demonstraram ter assimilado o mecanismo de conversão de energia térmica em rotação de eixo, pois muitos dos relatórios identificaram o fluido de trabalho (o ar, nesse caso) e descreveram os processos termodinâmicos componentes do ciclo Stirling e como estes aconteciam na prática, no motor construído por eles. Assim, é pertinente afirmar que, ao se afastar dos modelos expositivos de ensino e dinamizar o processo, o aprendizado tornou-se mais eficiente.

A comparação entre motores confeccionados permitiu também a elucidação de problemas de irreversibilidade, indicando imprecisões na construção que prejudicaram ou impediram o funcionamento do motor. As falhas apontadas pelos discentes foram, entre outras, fuga de ar, aquecimento da câmara de ar frio (fonte fria), os atritos e vibrações causados pela falta de concentricidade entre os eixos, folgas e erros de dimensionamento. Mais ainda, é interessante observar como cada grupo buscou soluções, diferentes ou não, para estes problemas descritos, o que se configurou como um estímulo à criatividade e inovação. Esse é o papel do engenheiro na indústria: resolver problemas, muitas vezes próximos aos observados nos motores Stirling, como é o caso do atrito nos mancais, presente em máquinas rotativas de qualquer porte, por exemplo.

Outro aspecto a ser observado é a gestão de projeto. Todo o processo de desenvolvimento de protótipo, testes e criação de conteúdo na forma de relatório e vídeo tomou bastante tempo e envolveu uma série de tarefas diferentes. Isso exigiu habilidades de gerenciamento por parte



dos discentes, tanto em relação ao tempo, controlado pela definição de metas com prazos, quanto em relação à divisão de tarefas entre si, que foi realizada de acordo com as habilidades prévias de cada membro, a fim de acelerar a execução das atividades. Ainda, o trabalho em grupo foi estimulado.

Por fim, ressalta-se a noção de metodologia científica passada aos alunos. Durante o trabalho, foi necessário, por parte deles, o estabelecimento de um método a ser seguido para a obtenção da performance do motor, o qual teve que ser bem definido no relatório. O passo a passo para cada medição teve que ser descrito, assim como o tipo e modelo dos instrumentos. Além disso, cobrou-se que os resultados fossem apresentados e, mais importante que isso, devidamente discutidos, como é comum em qualquer artigo científico.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, de acordo com a metodologia exposta, foi possível concluir que a aplicação do projeto prático (construção de um motor Stirling para um fim específico) proporcionou:

1. A elucidação de conceitos teóricos da Termodinâmica, sobretudo os relacionados às máquinas térmicas;
2. Um processo de aprendizado mais dinâmico e, conseqüentemente, mais eficiente;
3. Desenvolvimento de habilidades relacionadas à gestão, à solução de problemas e ao trabalho em equipe, fundamentais no mercado de trabalho;
4. Noção de metodologia científica, no que tange a aplicação de um método para obtenção de resultados, nesse caso relacionados ao desempenho do motor.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas (LSTEA) pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Marcelo Leandro Feitosa de; MASSABNI, Vânia Galindo. **O desenvolvimento de atividades práticas na escola: um desafio para os professores de ciências.** Ciência & Educação, Bauru, v. 17, 2011.

BORGNACKE, Claus; SONNTAG, Richard Edwin. **Fundamentos da Termodinâmica.** São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA. 2009.

CARDOSO, Fabíola de Souza. **O uso de atividades práticas no ensino de ciências: na busca de melhores resultados no processo ensino aprendizagem.** 2013. 56 f. Monografia - Centro Universitário UNIVATES, Rio Grande do Sul, 2013.

ÇENGEL, Yunus Ali; BOLES, Michael Alston. **Termodinâmica.** Porto Alegre: AMGH Editora LTDA. 2011.

EASTOP, Thomas Deas; MCCONKEY, Allan. **Applied Thermodynamics for Engineering Technologists.** Harlow: Editora Pearson Education Limited. 1993.

FERRETTI, Celso João. **A inovação na perspectiva pedagógica.** Em: GARCIA, W. E. (Coord.). Inovação educacional no Brasil: problemas e perspectivas. Campinas: Autores Associados, 1995, p. 61-83.

FOSTER, Phillip R. **Innovative Rotary Displacer Stirling Engine: Sustainable Power Generation for Private and Fleet Vehicle Applications.** The Journal of Technology studies, v.37, n. 2, 2011.

MOREIRA, Marco Antonio. **A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula.** Brasília: Editora da UnB. 2006. P. 7.

SCHULZ, Daniel. **Aprendizagem significativa de termodinâmica no ensino médio através do estudo de máquinas térmicas como tema motivador.** Disponível em: [http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo\\_stirling.htm](http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_stirling.htm). Acesso em: 25 abr. 2018.

WAGNER, Leandro. **Manual do Motor Stirling.** Disponível em: <http://www.manualdomotorstirling.blogspot.com.br/>. Acesso em: 21 abr. 2018.

WISDOM, James. **Developing higher education teachers to teach creatively.** Em: JACKSON, Norman; OLIVER, Martin; SHAW, Malcolm; WISDOM, James (Org.). Developing creativity in higher education. London: Routledge, 2006. p. 183-196.

## STIRLING ENGINE AS AN AUXILIARY TOOL IN THERMODYNAMICS LEARNING

**Abstract:** *This article presents the application of practical work as an innovative instrument in the process of learning and elucidation of theoretical content for engineering students. The following study is based on the project proposal destined to the curricular components of Thermodynamics I and II, as part of the undergraduate course in Mechanical Engineering at UFRN, consisting in the development of a homemade Stirling Engine by the students. The submitted work data from the academic periods of 2017.1 and 2017.2 were evaluated by the monitoring project of the subjects, based on three main products: complete CAD model, engine construction and presentation video and written work. From the students, the construction of a Stirling Engine was made with practical and accessible materials, and experimental data could be obtained by the use of different measurement instruments. Analyzing the results obtained, in the form of reports and videos, it was concluded that the application of a practical project improved the understanding of Thermodynamics concepts - as Work, Heat, Carnot Cycle, Working Fluid and Irreversibilities - as a consequence of the dynamization of the learning process. Furthermore, it was observed the development of skills related to project management, solution of problems and team work, essential to any engineer, as well as notions of scientific methodology, translated into results obtained from well-defined methods.*

**Key-words:** *Practical Project, Thermodynamics, Stirling Engine.*