

Desenvolvimento de uma bancada didática de motor *stirling*

Development of a stirling motor stand

DOI:10.34117/bjdv7n1-467

Recebimento dos originais: 10/12/2020

Aceitação para publicação: 18/01/2021

João Paulo Silva Costa

Acadêmico do 10º período do curso de Engenharia mecânica, pelo CENTRO
UNIVERSITÁRIO FIPMOC

Endereço: Rua Padre Fabiano, 120 F, Bairro Santos Reis- Montes Claros, MG, CEP:
39401-168

E-mail: joaopauloSgalo@gmail.com

João Vitor Mendes da Silva

Acadêmico do 10º período do curso de Engenharia mecânica, pelo CENTRO
UNIVERSITÁRIO FIPMOC

Endereço: Rua Artur Pereira Lopes, 1427, Bairro Santa Eugênia- Montes Claros, MG,
CEP: 39401243

E-mail: joaovitorms00@gmail.com

Michéle Santos Pimentel

Docente do curso de Engenharia mecânica, no CENTRO UNIVERSITÁRIO FIPMOC
Endereço: Rua Artur Pereira Lopes, 1427, Bairro Santa Eugênia- Montes Claros, MG,

CEP: 39401243

E-mail: michele.pimentel@professor.unifipmoc.edu.br

Bruno Maia Malveira

Docente do curso de Engenharia mecânica, no CENTRO UNIVERSITÁRIO FIPMOC
Endereço: Rua Artur Pereira Lopes, 1427, Bairro Santa Eugênia- Montes Claros, MG,

CEP: 39401243

E-mail: eng.mecanica@unifipmoc.edu.br

Vinicius Samuel Pereira Silva

Mestre em Engenharia Mecânica, pela Universidade Federal de Minas Gerais
Instituição: PPGMEC/UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais e COMAVE-
Comando de Aviação do Estado de Minas Gerais.

Endereço: Rua dos hangares, 50, Bairro Itapoa – Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP:
31710-410

E-mail: viniussamuel@yahoo.com.br

Anderson Vantuir Nobre Vieira

Mestre, Universidade estadual do sudoeste da Bahia

Instituição: Docente do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais e Discente do
PPGMEC/UFMG.

Endereço: Fazenda Varginha, km 02 da Rod. Salinas/Taiobeiras-Salinas - MG - CEP
39.560-000

E-mail: anderson.vieira@ifnmg.edu.br

Anderson Flamareon dos Santos Cruz

Tecnólogo em Manutenção de Aeronaves, pela Faculdade UNA.
Instituição: COMAVE- Comando de Aviação do Estado de Minas Gerais-
Endereço: Rua dos hangares, 50, Bairro Itapoa – Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP:
31710-410
E-mail: flamareonjet@gmail.com

Gustavo Henrique Garcia Lima

Discente de Mecânico de Aeronaves- Escola de Aviação Civil Pampulha- Belo Horizonte, MG e do PPGMEC/UFMG.
Instituição: PPGMEC/UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais e COMAVE-
Comando de Aviação do Estado de Minas Gerais- Endereço: Rua dos hangares, 50,
Bairro Itapoa – Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP: 31710-410
E-mail: ghglbh@gmail.com

RESUMO

A criação do motor *stirling* antecede a do motor a diesel e sua introdução no mercado foi um avanço para a época, mas ficou obsoleta com a evolução da ciência de materiais para construções mecânicas e o surgimento de necessidades de máquinas mais potentes. Para verificar a aplicabilidade dos motores *stirling* e levantar dados técnico-científicos, foi construída uma planta didática através do processo de usinagem em torno universal, em fresadora, utilizando o alumínio como material a ser usinado, de forma que os alunos do Centro Universitário FIPMoc pudessem estudar os princípios de funcionamento desse equipamento. A planta didática foi construída com *design* simples que possibilitou a aplicação de materiais reutilizados e de baixo custo além da transcrição do seu processo de funcionamento. Assim, esse estudo poderá contribuir com a capacidade de aprendizado dos futuros engenheiros, e a divulgação do motor *Stirling* do tipo *gama* como motor de alta eficiência e baixo consumo.

Palavras-chave: Motor *Stirling*, Planta Didática, Materiais Recicladados.

ABSTRACT

The creation of the *stirling* engine predates that of the diesel engine and its introduction in the market was an advance for the time, but it became obsolete with the evolution of the science of materials for mechanical constructions and the appearance of needs for more powerful machines. In order to verify the applicability of the *stirling* engines and to collect technical and scientific data, a didactic plant was built through the process of machining on a universal lathe, in a milling machine, using aluminum as the material to be machined, so that students at the FIPMoc University Center could study the operating principles of this equipment. The didactic plant was built with a simple design that made it possible to apply reused and low-cost materials in addition to transcribing its operating process. Thus, this study can contribute to the learning capacity of future engineers, and the promotion of the *Stirling* engine of the *gamma* type as a high efficiency and low consumption engine.

Keywords: *Stirling*, Didactic Plant, Recycled Materials.

1 INTRODUÇÃO

A construção de plantas didáticas para o ensino da engenharia é importante, uma vez que a simulação de ambientes reais deve fazer parte do dia-a-dia de qualquer profissional. Quando um profissional utiliza de plantas tecnológicas para desenvolver sua formação, ele coloca em prática o que fará em indústrias ou laboratórios (LEITE *et al.*, 2019).

A crescente preocupação ambiental ao uso de combustíveis poluentes está aumentando a utilização de energias renováveis para a geração de energia limpa e com grande capacidade produtiva (ALFARAWI *et al.*, 2016). Sendo que, os recursos de energia solar, eólica, biomassa e geotérmica, ou seja, as energias renováveis se mostram infinitas e podem ser exploradas de forma que não prejudicar o meio ambiente, diferentemente dos combustíveis fósseis, levando assim, engenheiros a buscarem o desenvolvimento de conversores que tem a capacidade de usar diversos tipos de energias renováveis (ALFARAWI *et al.*, 2016). Um dos conversores mais simples e estudado é o motor *Stirling* que representa uma opção de substituição dos motores de combustão interna. Esse tipo de máquina tem a capacidade de utilizar diversos tipos de fontes de energia podendo ser elas politicamente correta e com custo reduzido, permitido assim a sua aplicação em diversos meios.

O motor de combustão interna, *Stirling*, foi inventado em 1816, 40 anos antes do motor a diesel (AHMADI *et al.*, 2016). Esse projeto foi desenvolvido por Robert Stirling, Clérigo Escocês, com o objetivo de reduzir o número de acidentes e os custos de operação e manutenção em fabricas que utilizava o vapor. Anos depois, sua invenção foi usada em uma montanha para bombear água. Atualmente os pesquisadores são atraídos pela facilidade de operação, construção, alta eficiência teórica, *design* compacto e ambiente de trabalho que não agride ao meio ambiente. O motor *Stirling* tem o potencial para substituir alguns motores usados atualmente, pois ele possui ciclos termodinâmicos com tecnologia para sistemas de refrigeração e motores industriais (CHENG, YANG, 2012).

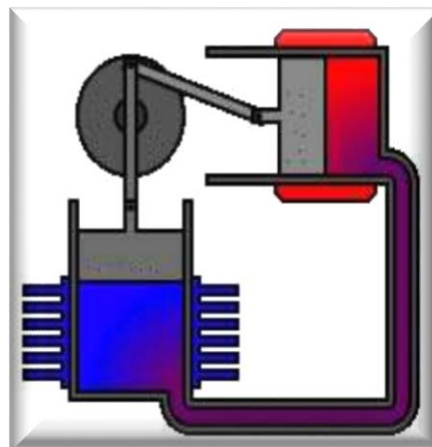
Como os motores *Stirling* são produzidos em quantidade limitada, o seu custo aumenta, se tornando inviável para alguns consumidores finais. Para compensar o custo elevado alguns engenheiros implementam, em seu projeto, materiais com baixo valor no mercado, reduz a pressão na câmara de trabalho, assim, em motores de refrigeração o custo do *Stirling* acaba sendo justificado, principalmente, quando compramos os sistemas de refrigeração atual que não são benéficos para o meio ambiente (CRUZ,2012).

Os motores *Stirling* podem ser aplicados em sistemas como geração de energia solar, produção de calor em energia, bombas de calor e entre outras. Essa diversidade normalmente é devido ao princípio de combustão externa e se baseia em características geométricas e físicas, no tipo de fonte de trabalho utilizada, temperatura do trocador de calor e dá queda de pressão, perda de calor e demais variáveis. Esse tipo de motor opera em velocidades de 33 HZ a 67 HZ, possui eficiência compreendida entre 30% e 40%, e a temperatura do fluido de trabalho pode variar de 686° C a 800°C (SULZBACH, 2010).

Uma máquina *Stirling* é compreendida por quatro fases internamente que são em série e reversíveis: expansão isotérmica, resfriamento com o volume constante, compressão isotérmica, aquecimento com o volume constante. Em teoria a eficiência do ciclo Carnot é parecida com o ciclo *Stirling* (MARTINI, 1979).

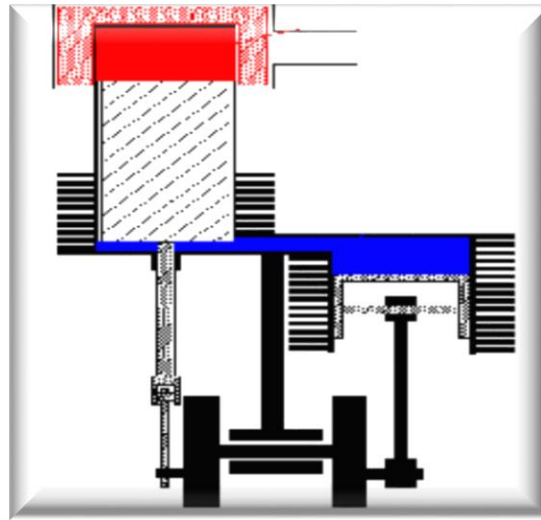
Os dispositivos que possui o ciclo *Stirling* são normalmente divididos em grupos, pois há diferença de modelos e geometrias, esses são chamados de alfa, beta e gama. Os melhores desempenhos são encontrados nas configurações alfa, como apresentado na figura 1, mas possui desvantagens como a necessidade de vedar os dois pistões, sendo um de expansão e outro de compressão.

Figura 1 – Motor *Stirling* configuração Alfa.



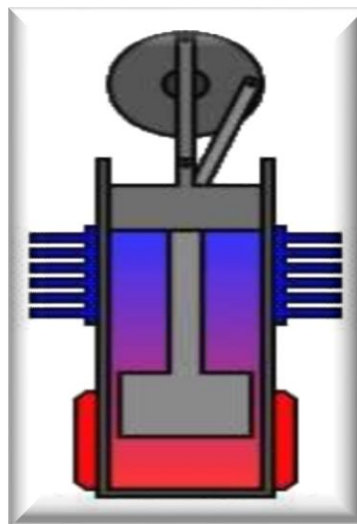
Fonte: Hirata, 1995.

No *Stirling* gama, mostrado na Figura 2, também conhecido como motor de deslocamento, o pistão de deslocamento faz a movimentação do gás de trabalho para as áreas de baixa e alta temperatura enquanto o pistão de trabalho faz a compressão e expansão do gás. Essa configuração separa o espaço de trabalho da parte quente do trocador de calor (SILVA, 2008).

Figura 2 – Desenho em corte de motores *Stirling* de tipo gama.

Fonte: Hirata, 1995.

Nos dispositivos do tipo beta, apresentado na Figura 3, os pistões de trabalho e deslocamento ficam alinhados em apenas um cilindro. Nesse sistema, tem-se uma taxa de compressão maior do motor, e geralmente pode-se ter uma potência maior do que o tipo gama (PAUTZ, 2013).

Figura 3 – Desenho em corte de motores *Stirling* de tipo Beta.

Fonte: Hirata, 1995.

Quando comparado com um motor a diesel ou demais motores, o motor *Stirling* tem um princípio de funcionamento diferente, uma vez que o motor *Stirling* possui uma combustão externa e gases de trabalho pressurizados no cilindro; sua potência é conseguida pelo aquecimento e resfriamento do gás (BRUNETTI, 2016). O pistão de deslocamento faz a transferência do movimento da câmara quente para a câmara fria e da

câmara fria para a câmara quente. Esse deslocamento de gás provoca uma mudança na pressão e provoca a movimentação do eixo (MOU, 2017).

A potência do motor *Stirling* depende, na maioria das vezes, da pressão e temperatura de trabalho. O desenvolvimento de um motor com ciclo *stirling* deve levar sempre em consideração dois fatores para sua construção: mecânica dos fluidos e materiais para construção mecânica (ZARE, 2019).

O fluido de trabalho escolhido para usar no motor *Stirling* deve ter alta capacidade de calor específico (MOU, 2017). Para determinar um fluido mais adequado é necessário fazer avaliação mais aprofundada, mesmo que de forma teórica. Atualmente, muitos gases como hélio, nitrogênio e hidrogênio são usados devido ao fato de possuírem temperatura e eficiência parecidas na operação, mas é necessária a avaliação da aplicação do motor e do seu *design*. Assim, um mesmo motor dificilmente poderá usar o mesmo tipo de gás em diferentes funções (PAUTZ, 2013).

Atualmente existem diversos tipos de materiais, cada um com características distintas (SOUZA, 2010). Nesse cenário, torna-se importante observar a resistência dos materiais, principalmente quando se tem pessoas operando qualquer máquina ou equipamento, os quais devem suportar diferentes esforços como: tensão, compressão, torção, cisalhamento e suas combinações, além de serem leves. (SILVA, *et al*, 2019). Dessa forma, a escolha de materiais para serem usados na construção do motor *Stirling* deve levar em conta a dimensão e o material mais adequado para temperatura e pressão requeridas no projeto (BARROS, 2005).

Tem-se, o objetivo de construir um motor *Stirling* do tipo *Gama* e comprovar seu funcionamento através de testes de operação. Ao final do projeto o motor será usado por alunos do Centro Universitário FIPMoc.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em duas etapas quais sejam pesquisa sobre o motor *Stirling* tipo *Gama* e desenvolvimento do projeto de uma planta didática para o Centro Universitário FIPMoc, com a utilização de materiais doados e adquiridos durante o projeto. Assim, foi feito o levantamento dos dados científicos sobre o seu funcionamento e aplicabilidade de acordo com sua potência máxima e mínima. Toda pesquisa foi desenvolvida em oficinas de usinagem, devido à disposição de equipamentos de construção e testes.

A pesquisa visou buscar conhecimento acerca do funcionamento e da aplicação do motor *Stirling* do tipo *Gama* tal como geração de energia, produção de calor, entre outras aplicações. A elaboração do protótipo deste motor foi realizada com base nos dados pesquisados. A construção da bancada didática levou em conta: a escolha dos materiais, a escolha do combustível, a produção de peças e a montagem do motor.

Nesse estudo, o motor *Stirling* do tipo *Gama* foi escolhido como ideal para a função, e projetado e fabricado de forma que funcionasse em temperaturas relativamente mais baixas. Para facilitar a elaboração do projeto, as peças do motor foram desenhadas no *software* CAD SolidWorks.

Na escolha dos materiais para construção do protótipo, optou-se por escolher materiais e que pudessem ser fabricado de formas simples. Utilizou-se o alumínio, vidro e madeira.

Um dos primeiros passos foi a fabricação da câmara do motor. Utilizou-se liga de alumínio devido a características como condutividade térmica, durabilidade quando exposto a ambientes corrosivos e úmidos, além disso, esse material é de fácil usinagem.

O mecanismo de partida irá funcionar de forma manual, através do impulso de uma roldana. Assim o motor poderá ser estudado por alunos da faculdade, uma vez que o protótipo ficará disponível no laboratório para que os futuros engenheiros compreendam o funcionamento do motor *Stirling* do tipo *gama* e entender de forma prática a importância do trocador de calor no ciclo do motor.

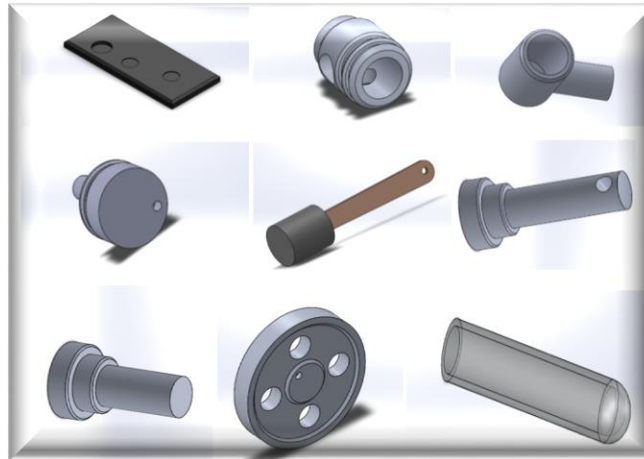
O fluido usado para se ter transferência de calor foi o álcool devido a sua capacidade de combustão, assim foi construído uma lamparina contendo um pavio de algodão e adicionado álcool ao seu interior.

Foi feita uma base de madeira para que este possa ser transportado de forma fácil e seja um mau condutor térmico. O motor *Stirling* do tipo *gama* fabricado foi avaliado por diferentes procedimentos para validar os parâmetros de funcionamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo foi construído a partir de esboços e de dimensionamento de seus componentes, como mostrado na Figura 4. Após a validação do desenho no *software*, foi feito um estudo que validou a sua funcionalidade de acordo com o formato de seus componentes.

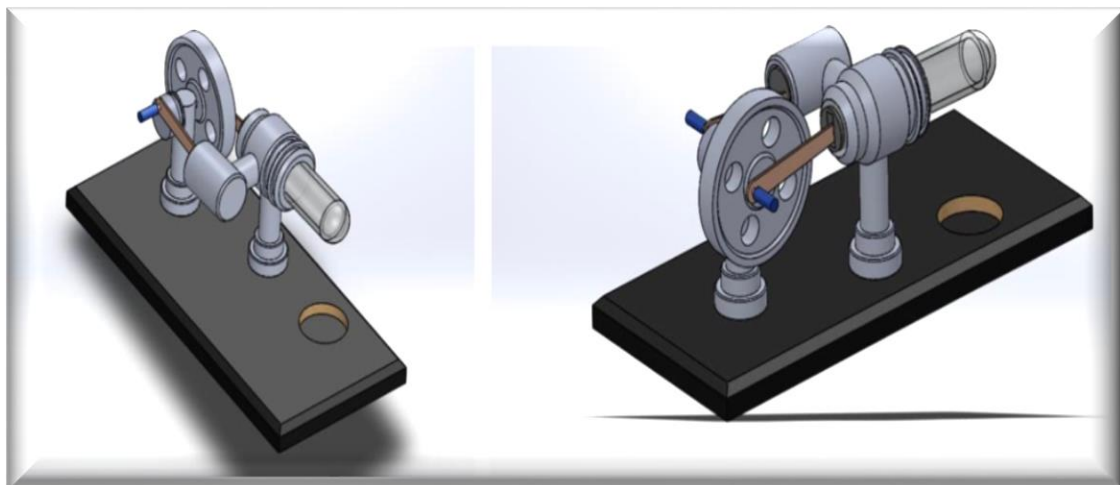
Figura 4 – Desenhos das peças do motor *Stirling* de tipo Gama feitas no *software* SolidWorks



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

O protótipo da bancada didática foi elaborado como é apresentado da Figura 5.

Figura 5 – Desenho do motor no SolidWorks.



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

O motor foi projetado para que o pistão de trabalho inicie seu movimento para frente fazendo a compressão do fluido e a temperatura constante. No segundo momento, com o aquecimento constante, o pistão se desloca para trás forçando o fluido de trabalho no segundo êmbolo a se movimentar na câmara de expansão. Na terceira etapa, com a expansão isotérmica, o pistão de trabalho é forçado a se movimentar para frente novamente. Assim, na quarta etapa do processo ocorre a movimentação do pistão de deslocamento para trás e o fluido de trabalho é comprimido.

O aquecimento do fluido de trabalho acontece pela reação de queima do pavio, tem-se, dessa forma, transferência de calor para a câmara quente aumentando o volume do gás em seu interior. Quando o gás é aquecido, esse calor é transferido pelo pistão de

deslocamento expandindo o fluido e forçando o pistão de trabalho a se mover para traz. No segundo êmbolo, o fluido frio sofre compressão, e tende a empurrar o segundo pistão para traz. Essa alternância de compressão em ambos os êmbolos permite a movimentação da manivela da polia movida, que transforma a movimentação linear dos pistões em giro do eixo principal.

O funcionamento descrito foi testado virtualmente no *software* SolidWorks, e a partir desse momento foi realizada a construção do protótipo. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas, respectivamente, o êmbolo onde o pistão deve se movimentar, e a usinagem de peças para o protótipo.

Figura 5 – Trocador de calor.



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

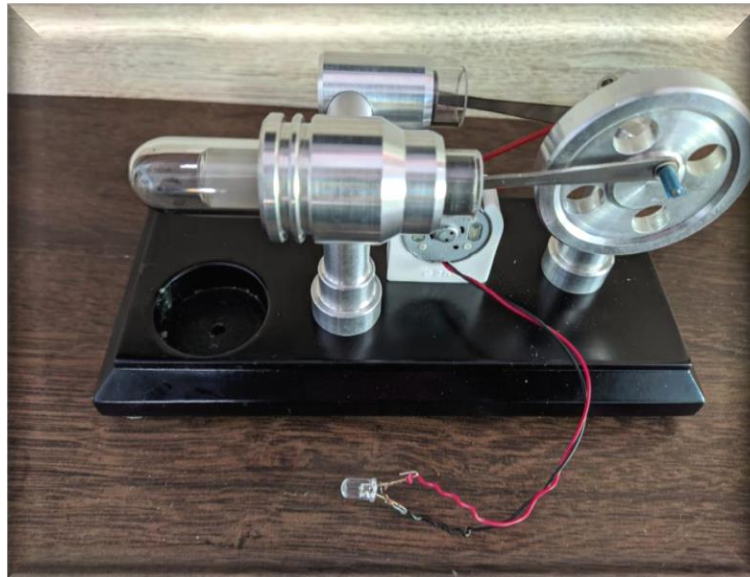
Figura 6 – Peças que passaram pelo processo de usinagem.



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

O protótipo finalizado é mostrado na Figura 8. Com a análise do motor concluído foi possível verificar sua funcionalidade e outros combustíveis, como o óleo de soja.

Figura 8 – Bancada pronta.



Fonte: Dados da pesquisa (2020).

A queima do álcool não proporcionou a troca de calor desejada, impedindo a movimentação dos pistões com a eficiência requerida. A queima do óleo de soja promoveu maior poder calorífico, e, em poucos segundos após o início da troca térmica, foi possível acionar o motor manualmente e perceber o aumento gradativo da rotação do eixo principal.

Outra abordagem que se considerou para essa bancada foi a elaboração de um passo a passo para a utilização da bancada didática para ser usado pelos acadêmicos da UNIFIPMoc de forma simples e funcional. No guia abaixo foram resumidos os dez passos para a realização do teste de funcionamento.

1. Coloque o modelo do motor na posição horizontal.
2. Gire suavemente o volante com a mão para verificar se o volante está funcionando corretamente.
3. Verifique se a haste de conexão está conectada corretamente.
4. Verifique se as duas hastes de conexão são articuláveis em um ângulo de 90° com a manivela, caso contrário, ajuste as hastes de conexão.
5. Mova lentamente a lâmpada de combustível sob a cabeça do cilindro principal e acenda com fogo.
6. Espere trinta segundos para que a câmara aqueça, e então comece a girar suavemente o volante até que esse continue a movimentação indefinidamente.
7. Depois de usar o motor deixe a lâmpada de combustível esfriar naturalmente.

8. Após o motor esfriar naturalmente, coloque-o em um local seguro.
9. Os alunos devem estar acompanhados por um responsável técnico.
10. Ao aquecer, tome cuidado para evitar queimaduras, durante todo o processo de aquecimento, mantenha as mãos longe do cilindro principal.

A elaboração dessa guia permite que os alunos usem o motor de forma segura e sem provocar danos ao protótipo e a saúde das pessoas. Um *checklist* é sugerido como Anexo 1 desse estudo. Além disso, é importante adicionar combustível, caso a lâmpada esteja desligada por longos períodos de tempo. Por fim, o motor pode girar em alta velocidade produzindo vibrações que podem fazer com que o protótipo mova-se de lugar. Por isso é necessário atenção com o uso do equipamento.

4 CONCLUSÃO

Nesse estudo, projeto do motor *Stirling* foi realizado considerando um *layout* simples e de fácil manuseio. Ele foi desenvolvido para ser utilizado pelos alunos dos cursos de engenharia do Centro Universitário FIPMoc. O *design* do motor e sua otimização são baseados no tipo *gama*. Assim, as variáveis de projeto são parâmetros feitos com base em desenho desenvolvido no SolidWorks.

O trabalho cumpriu seu objetivo, revisando as técnicas de projetos e desenvolvimento para que os alunos tivessem segurança e facilidade de manuseio durante todo seu estudo. Percebeu-se durante a construção e funcionamento do protótipo o real funcionamento do motor e suas possíveis aplicações, assim o seu uso por engenheiros poderá melhorar a base de conhecimento em máquinas térmicas.

Um dos primeiros problemas encontrados foi a falta de locais para usinar as peças devido o projeto ter sido desenvolvido durante uma pandemia. Mas foi possível encontrar uma tornearia que realizou o serviço de forma esperada.

Em trabalhos futuros, sugere-se a construção de um protótipo movido por energia solar, e a aplicação do motor em uma máquina para que se possa estudar e comparar com outros tipos de motores.

REFERÊNCIAS

AHMADI MH, AHMADI MA, POURFAYAZ F. Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review. *Renew Sustain Energy* Ver 2017; 68:168–84. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.033>. Acesso em: 04/2020.

ALFARAWI S, AL-Dadah R, MAHMOUD S. Potentiality of new miniature-channels Stirling regenerator. *Energy Convers Manage* 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.017>. Acesso em: 04/2020.

BARROS, R. W. Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo161 Operando com Diferentes Combustíveis. Itajubá, 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2005.

BRUNETTI, Franco. Motores de combustão interna. São Paulo, SP: Edgard Blucher. v. 1 .553 p., Il. ISBN 8521207085, 2016.

CHENG CH, YANG HS. Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based on theoretical analysis. *Appl Energy* 2012;92:395–405. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.046>. Acesso em: 05/2020.

CRUZ, V. G. Desenvolvimento Experimental de um Motor Stirling Tipo Gama. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. 2012.

HIRATA, K. Schmidt theory for stirling engines. National Maritime Research Institute. Tokyo, Japão, 1997.

LEITE, V. S.; SILVA, R. B.; SANTOS, M. P. Construção de uma planta didática de um elevador para o ensino das engenharias. Juiz de Fora, MG Congresso de Engenharia de Juiz de Fora, 2019.

MARTINI, W. B. Stirling engine design manual. In: M.J. Collie, editora. Stirling engine design and feasibility for automotive use. New Jersey: Noyes, 1979. p.60.

MOU J, H.G. Startup mechanism and power distribution of free piston Stirling engine. *Energy* 2017; 123:655–63.

PAUTZ, E. R. Estudo e Projeto de um Motor Stirling. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013.

SILVA, et. al. Desenvolvimento De Tecnologia Capaz De Identificar Choques Mecânicos De Alta Energia Em Helicópteros. *Brazilian Journal Of Development*; Vol. 6, No 8 (2020). ISSN: 2525-8761. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-245>. Acesso em: 10/2020.

SILVA, R. Projeto Motor Stirling. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2008.

SOUZA, G. R. Estudo experimental e numérico do sistema de admissão de um motor de combustão interna. 2010. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2010.

SULZBACH, J. Projeto e fabricação de um motor stirling modelo didático. Panambi: UNIJUI, 2010.

ZARE S, T. A. FreepistonStirlingengines: A review. Int J EnergyRes 2019. Disponível em: <https://sites.google.com/site/motordestirling/motor-de-stirling/classificacao-dos-motores>. Acesso em: 04/2020.

ANEXO 1 - CHECK LIST

Aluno: _____

Responsável

técnico: _____

| Condições | | Sim | Não |
|-----------|---|-----|-----|
| A | A iluminação dos locais de trabalho é adequada às operações e tipos de trabalho a realizar? | | |
| B | Foram realizadas ações para avaliar as condições do motor antes do uso? | | |
| C | O combustível encontra-se no local devido? | | |
| D | O motor está bem posicionado? | | |
| E | O recipiente do combustível encontra-se próximo ao motor? | | |
| F | Existem riscos de acidentes? | | |

Obs: No caso de surgirem respostas negativas para os itens de A a E, e positiva para o item F, as correções necessárias devem ser feitas para minimizar o risco de acidentes.