

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DO MOTOR STIRLING TIPO ALFA

Jander. L. FONSECA, e-mail¹: janderLopes@outlook.com.br

Enos. S. ANICETO, e-mail²: enosaniceto@gmail.com

Beliato. S. CAMPOS, e-mail³: beliatocampos@ifba.edu.br

Raimisson. B. ASSIS, e-mail⁴: raimison_assis@ifba.edu.br

Tércio. G. MACHADO, e-mail⁵: tercio@ifba.edu.br

^{1,2,3,4,5} Instituto Federal da Bahia, Campus Jacobina, Departamento de Eletromecânica, Jacobina- BA, Brazil. Avenida Centenário, 500. Nazaré. Jacobina-BA. CEP: 44.700-000.

Resumo: O motor Stirling é um motor a combustão externa desenvolvido pelo pastor escocês Robert Stirling em 1818, tendo como primeiro modelo um protótipo utilizado para bombear água numa pedreira, passando por um aperfeiçoamento, o motor Stirling em 1843 foi utilizado para mover máquinas numa fundição agregando assim valores para o motor naquela época. Procurando ampliar os conceitos e estudos acerca do motor Stirling, o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um protótipo de um motor Stirling do tipo Alfa. Os materiais utilizados para a construção do protótipo foram matérias que podem ser reaproveitados e também com matérias de baixo custo. Para o desenvolvimento do protótipo foram seguidas as seguintes etapas: listagem e quantificação do material necessário, arquitetura, montagem e testes. Foram realizadas análises quanto a eficiência do motor como quantidade de rotações por minuto, desempenho com diferentes combustíveis e rendimento. Os resultados foram satisfatórios quanto ao desenvolvimento do protótipo do motor Stirling tipo Alfa, concretizando os resultados esperados como a confecção e funcionamento do equipamento, e também a possibilidade de analisar o motor Stirling em funcionamento com diferentes tipos de combustíveis e configurações. A partir da obtenção dos resultados e da demonstração experimental do protótipo tornou-se visual a demonstração típica do funcionamento de um motor a combustão externa obedecendo ao ciclo termodinâmico de funcionamento mostrando-se contundente a possibilidade de confecção de um protótipo de um motor Stirling com materiais que podem ser reaproveitados e com materiais de baixo custo.

Palavras-chave: Motor, Protótipo, Motor Stirling, Combustão Externa, Combustível.

1. INTRODUÇÃO

Durante a segunda Revolução Industrial descobriu-se a utilização da energia fóssil e com isso sequencialmente a invenção do motor a combustão como um ponto bastante significativo durante a segunda Revolução Industrial e que também impulsionou na criação dos automóveis primitivos na França em 1870 com os motores a combustão interna. (Cruz, 2012; Furlani e Silva, 2006)

Os motores a combustão podem ter diversos tipos de aplicações, sendo uma das mais utilizadas para o fornecimento de energia para a geração e transmissão de movimento; assim como na indústria automotiva que movimenta fortemente o nosso país com atualmente uma frota de 49.822.708 automóveis, como informa o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no ano de 2015. Os motores a combustão seguem um ciclo termodinâmico para o seu funcionamento e podendo ser intitulados, também, como motores termodinâmicos; sendo classificados quanto ao tipo de combustão em motores endotérmicos, combustão interna, e motores exotérmicos, combustão externa. O funcionamento destes motores está caracterizado pela temperatura máxima e mínima que o fluido de trabalho que opera dentro do sistema atinge, assim como a rapidez com que é capaz de realizar a troca térmica que influencia diretamente na potência.

Atualmente, com a grande preocupação com a utilização de energia quanto a sua origem e seus efeitos no meio em que vivemos, tem-se reforçado e lembrado o conceito do motor Stirling e sua empregabilidade flexível tanto com energias consideradas limpas como a bioenergia e também com energias fósseis como matrizes energéticas ligadas ao petróleo e suas vertentes. Um forte conceito e concepção que vem se destacando no setor fabril tanto como no tecnológico é o de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade que trazem uma preocupação quanto à necessidade atual de produzir sem prejudicar ou minimizar os impactos futuros da produção. (Pautz, 2003; Silva, 2006; Souza, 2008)

O objetivo principal deste trabalho foi confeccionar um protótipo de um motor termodinâmico de combustão externa do tipo Stirling na sua configuração Alfa. Pretendeu-se, deste modo, estudar o ciclo termodinâmico e

demonstrar neste protótipo o funcionamento de um motor a combustão externa, visando mesclar essas duas linhas de pensamento tanto do conceito de produção do setor fabril quanto do princípio sustentável de reutilização de componentes eletrônicos e mecânicos para a confecção de um protótipo de um motor Stirling tipo alfa utilizando, também, materiais que podem ser reutilizados e de baixo custo de aquisição.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Na confecção do protótipo foram definidas etapas de elaboração e desenvolvimento para uma melhor organização da elaboração do projeto e na montagem do experimento. Desta forma foram seguidas as seguintes etapas:

- Elaboração e construção teórica;
- Materiais e Ferramentas;
- Confecção do protótipo;
- Testes.

Destinado a dar um embasamento teórico sobre a confecção do projeto foi realizada uma busca aprofundada e minuciosa de informações em artigos, livros, revistas, teses e monografias relacionadas à área da termodinâmica e, principalmente, sobre o motor Stirling; desde sua história, seu funcionamento e modo de construção. Sequencialmente a busca por informações e conhecimentos sobre o assunto, deu-se início a parte da elaboração gráfica do projeto como mostra a Fig. 1 a 4, proporcionando assim uma idealização visual do que seria montado.

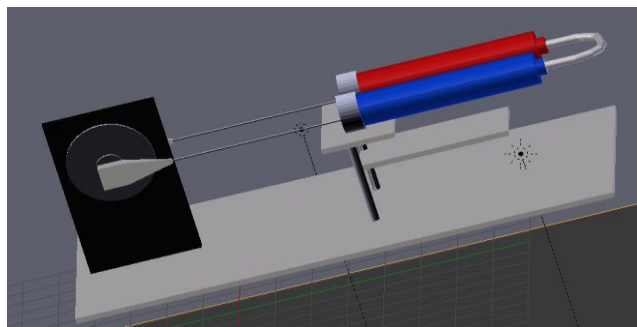


Figura 1. Esquema do protótipo do motor Stirling tipo Alfa.

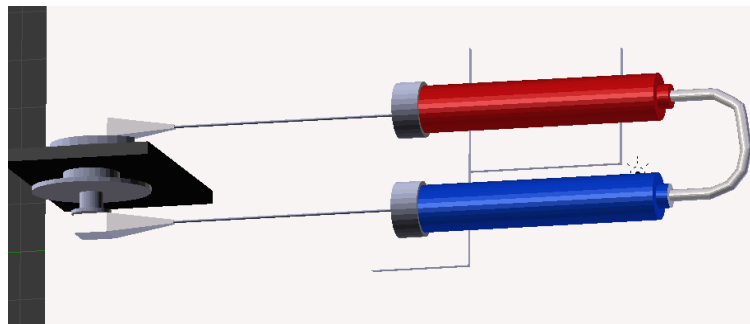


Figura 2. Vista gráfica superior do projeto Motor Stirling tipo Alfa.

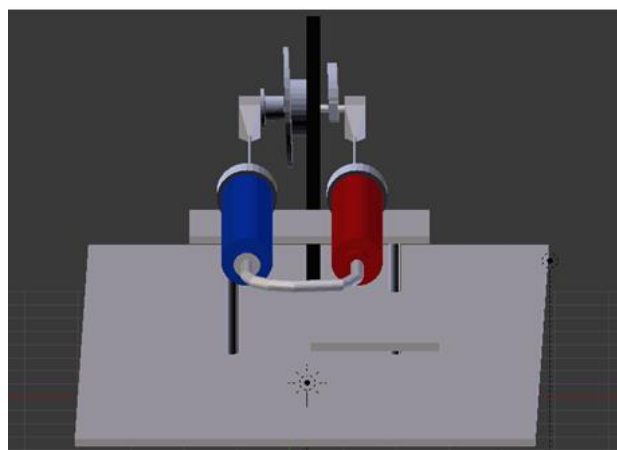


Figura 3. Vista gráfica frontal do projeto Motor Stirling tipo Alfa.

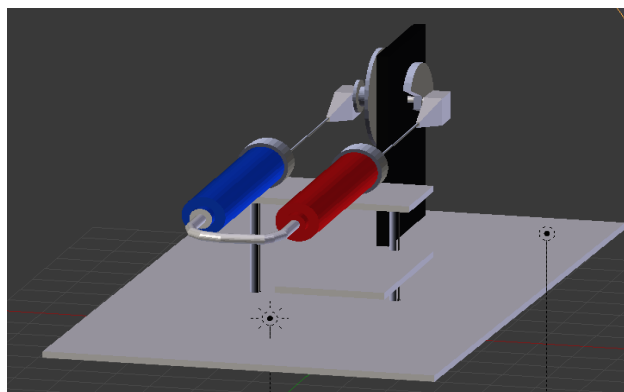


Figura 4. Vista gráfica do projeto.

Na confecção deste protótipo foi necessária a utilização de materiais de baixo custo, aparelhos eletrônicos e domésticos usados e materiais que pudessem ser reaproveitados. Materiais que são encontrados comumente em lojas comerciais ou conseguidos por meio de doações, como no caso dos aparelhos eletrônicos e domésticos que foram considerados itens obsoletos ou que estavam quebrados também foram utilizados. Todos os materiais para o desenvolvimento do protótipo em torno de sua construção estão indicados no Quadro 1, sendo especificado o nome do material e sua quantidade.

Quadro 1. Materiais utilizados na confecção do protótipo.

MATERIAIS	
QUANTIDADE	COMPONENTES
02	Seringa de Vidro com Ponta de Metal – 10 ml
01	Gravadora de DVD
02	Braçadeira
01	Bastão Rosca sem fim
10	Porcas número 11 (especificar o tamanho em polegadas ou milímetros).
06	Conectores para condutores elétricos de 6 mm
02	Raios de bicicleta de 2,5 mm
02	Chapa metálica
02	Vídeo Cassete
01	Toca Fita
01	Arruela espessa
02	Disco de Corte
-----	Lixa, Parafusos diversos e MDF
01	Lata de Refrigerante
01	Silicone Líquido de Painel Automotivo
01	Cola de Silicone de alta temperatura
02	CD

Após a coleta dos equipamentos e aparelhos eletrodomésticos foi realizado sequencialmente o desmonte para o aproveitamento de seus itens que são de interesse à montagem do protótipo, além do aproveitamento de elementos de fixação; tais como parafusos, porcas e arruelas contidas nos equipamentos eletrônicos que foram desmontados. As peças retiradas necessitaram de acabamento e adaptações para serem aproveitadas na etapa seguinte. Dessa forma, passaram por adaptações para que ficassem nas condições idealizadas no projeto. Na Figura 5 tem-se o fluxograma da montagem do protótipo.

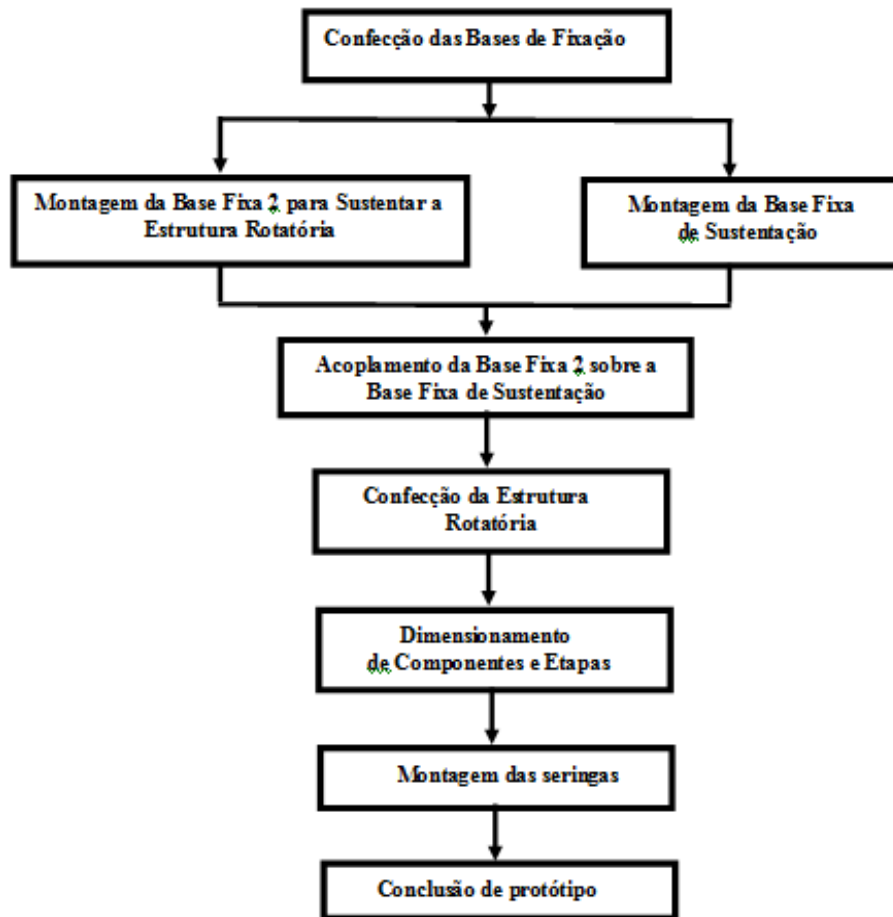


Figura 5. Fluxograma etapas de montagem.

Iniciando a etapa de montagem do protótipo, começou-se com a confecção das bases de fixação. Primeiramente com a montagem da Base Fixa de Sustentação composta pela carcaça do vídeo cassete revestida por uma placa de MDF. Na sequência foi realizada a confecção da base fixa 2 utilizada para o sustento da estrutura rotatória constituída por componentes do vídeo cassete, tais como cabeçote e estrutura plástica que sustenta o CD; e também por uma pequena placa de MDF, representado pela Fig. 6.

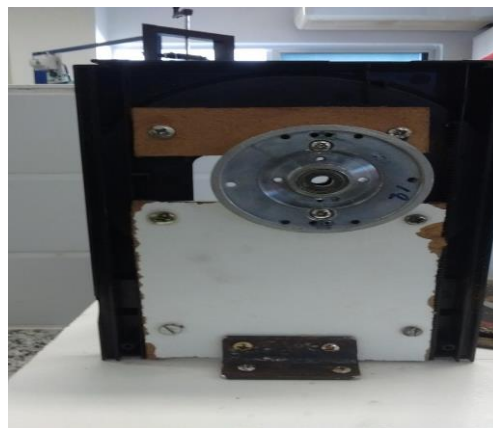


Figura 6. Base Fixa 2.

Feito a montagem das bases fixas, realizou-se o acoplamento da base fixa 2 sobre a base fixa de Sustentação. Dando sequência a montagem, efetivou-se a confecção da estrutura rotatória, e seu acoplamento à base fixa 2. Depois do dimensionamento dos componentes e das etapas, no qual foi realizado os ajustes e medições para as adaptações do projeto, foi realizado a montagem das seringas e o seu acoplamento ao restante do protótipo por meio de braçadeiras e elementos de fixação. A Figura 7 mostra esses detalhes.

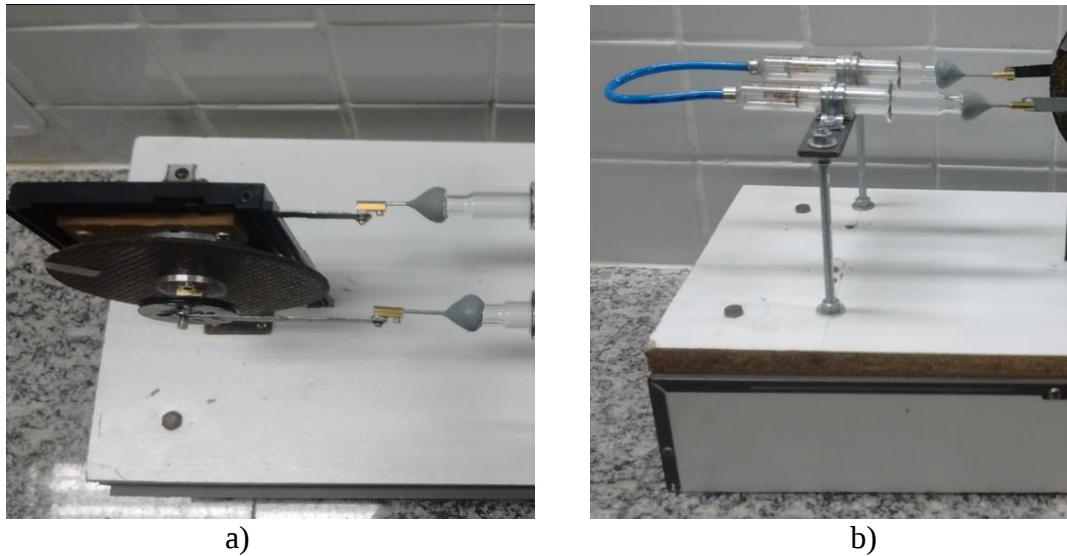


Figura 7. Montagem do protótipo: a) Estrutura rotatória e b) detalhe da seringa de vidro.

Nas Figuras 8 e 9 temos o protótipo completo.



Figura 8. Protótipo do Motor Stirling Tipo Alfa.



Figura 9. Protótipo do Motor Stirling Tipo Alfa: detalhamento.

Após a montagem e funcionamento do protótipo foram realizados alguns testes quanto ao funcionamento do motor, tais como variação da taxa de compressão da zona morta da seringa de vidro, aplicação de CD e diferentes discos de corte para o volante, aplicação de palha de aço e diferentes combustíveis para a lamparina.

No teste de Variação da Taxa de compressão da zona morta da seringa de vidro foi realizada uma avaliação do desempenho do Motor Stirling tipo Alfa nos parâmetros de rotações por minuto e tempo para entrar em funcionamento. Para realização do teste foi aplicado como taxa de compressão na seringa quente um volume de 3 ml para zona morta e para a seringa sem aquecimento (fria), um volume de 1ml para zona morta. Depois de analisado o resultado foi aplicado na seringa quente um volume de 4 ml para zona morta e para a seringa sem aquecimento um volume de 2 ml para zona morta.

Quanto à aplicação da palha de aço, foi introduzida na seringa aquecida uma pequena quantidade de palha de aço e avaliado seus parâmetros tais como rotações por minuto e tempo de acionamento.

No outro teste referente à aplicação de discos de corte com diâmetros e pesos diferentes, foi realizada avaliação quanto ao desempenho do protótipo nos parâmetros de rotações por minuto e tempo para funcionamento para cada disco de corte aplicado e testado no sistema. Foram aplicados dois CD ao protótipo no lugar do disco de corte para desempenhar a função de volante, sendo também avaliado seu desempenho.

A utilização de diferentes tipos de combustíveis para a lamparina foi realizado como teste por meio da aplicação e acionamento da chama por meio de combustíveis tais como querosene, óleo diesel e álcool. Para todos os testes em que foram avaliados os parâmetros de rotações por minuto e tempo de acionamento, foi respeitado um limite máximo de cinco minutos de aquecimento na seringa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a montagem do protótipo, deu-se início aos testes com a aplicação de discos de corte distintos com diâmetros e pesos diferentes, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Discos de operação.

Disco	Peso (G)	Diâmetro (mm)
1	96,7595 g	135,6200 mm
2	72,3131 g	115,4500 mm
3	50,9300 g	98,0300 mm
4 (1+2)	169,0726 g	135,6200 mm

O disco de corte desenvolve a função de volante, estando associado ao eixo e absorvendo a energia proveniente do movimento das estruturas conectadas as seringas; gerando seu movimento rotatório. Além desta função, o disco realiza a função de proporcionar a partida manual do motor, gerando ao restante do sistema uma energia de arranque, propiciando uma força necessária para vencer a inércia.

No Quadro 3 tem-se o desempenho obtido nos discos estudados. Foi avaliado os parâmetros de rotação (rpm) e o tempo de acionamento, em segundos, para cada disco.

Quadro 3. Desempenho dos Discos.

Disco	Rotações por minuto (rpm)	Tempo de Acionamento (S)
1	600 rpm	100 segundos
2	620 rpm	75 segundos
3	720 rpm	60 segundos
4 (1+2)	523 rpm	70 segundos

O disco 1 possui o maior diâmetro entre os discos testados, fornecendo ao sistema 600 rotações por minuto e necessitando de um tempo de 100 segundos para entrar em acionamento. Comparando-se com os outros discos foi o que gastou mais tempo para entrar em funcionamento, o que já era esperado visto que esse disco apresenta o maior diâmetro.

O sistema com o disco 2 proporcionou 620 rotações por minuto, precisando de 75 segundos para ser acionado. Enquanto o disco 3, que possui o diâmetro menor e mais leve, teve um desempenho consideravelmente bom com o melhor índice de rotações por minuto com 720 rpm e também com o menor tempo para o acionamento, necessitando de apenas 60 segundos para entrar em funcionamento.

O disco 4, que é a resultante do acoplamento dos discos 1 e 2, é o sistema mais pesado e que teve como desempenho uma rotação de 523 rpm; menor valor obtido quando comparado aos testes com os de diâmetro e peso menor.

A partir dos dados coletados nos testes tornou-se possível traçar um gráfico do tempo para acionamento e das rotações por minuto. O Gráfico 1 apresenta as variáveis de tempo de acionamento e rotações por minuto obtidos.

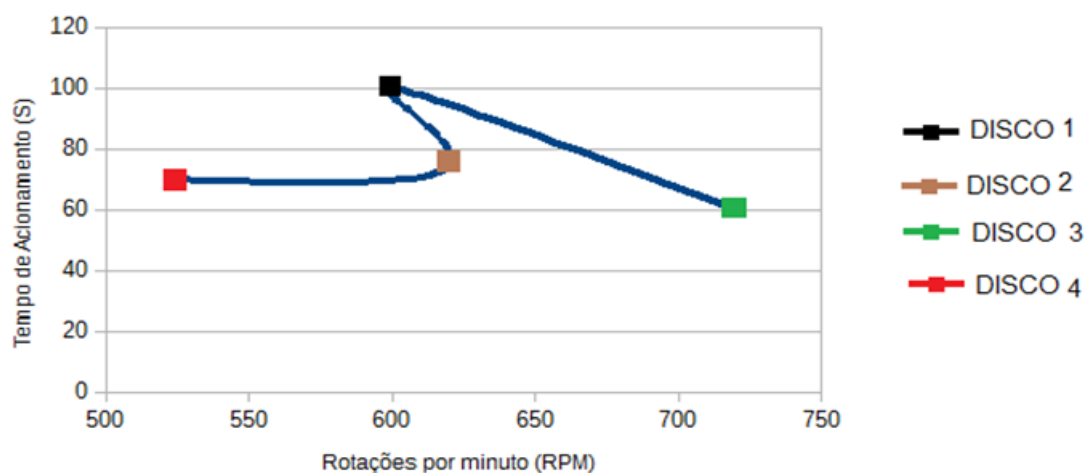


Gráfico 1. Tempo por Rotações.

A partir deste teste foi possível perceber que o disco 3, mais leve e com diâmetro menor, foi o que obteve um melhor desempenho quanto aos parâmetros de rotações por minuto e menos tempo para entrar em funcionamento.

Após o bom desempenho realizado pelo disco de corte menor e mais leve, foi realizada a aplicação de CDs para o desenvolvimento da função de volante outrora desempenhado pelo disco de corte.

O Quadro 4 mostra o diâmetro e o peso dos CDs utilizados. O teste realizado nos CDs foi para avaliar seu rendimento exercendo a função de volante no protótipo.

Quadro 4. Dados dos CD's.

Quantidade de cd's	Peso (g)	Diâmetro (mm)
1	14,6457 g	120, 11 mm
2	30,2434 g	120, 11 mm
3	45,9258 g	120, 11 mm

Após a realização deste teste foi obtido como resultado desta alteração 500 rotações por minuto em um tempo de 70 segundos para acionamento. Desta forma é possível a utilização de CDs como volante do protótipo Motor Stirling tipo Alfa, porém possuindo um desempenho menor quando comparado ao sistema Stirling com o disco de corte como volante que apresentou um rendimento superior quando comparado aos parâmetros avaliados.

No aquecimento das seringas foram utilizadas lamparinas caseiras feitas com frascos de desodorante. Para a utilização foi feito o teste de verificação dos combustíveis, sendo eles: querosene, óleo diesel e álcool.

No Quadro 5 tem-se as características dos combustíveis testados, podendo-se verificar detalhadamente os parâmetros tais como densidade, ponto de ebulição, ponto de fusão e ponto de fulgor; características essas fundamentais para que possam ser manipulados com segurança e adequados para certos sistemas termodinâmicos.

Quadro 5. Combustíveis.

Combustíveis	Densidade	Ponto de ebulição	Ponto de fusão	Ponto de fulgor
Querosene	0,82 g/cm ³	150°C/290 °C	- 45,6 °C	>38 °-72 °C
Óleo diesel	0,853 kg/l	288°C/338 °C	-18°C/- 34 °C	>62 °C
Álcool	789 kg/m ³	78 °C	- 114,1 °C	16,6 °C

O querosene e o óleo diesel quando aplicados nas lamparinas e acionado sua chama liberam uma fumaça de tonalidade escura e com um odor não agradável, passando para a seringa a ser aquecida um acúmulo de partículas sólidas oriundas da fumaça; proporcionando uma baixa visibilidade do sistema das seringas.

O álcool, por sua vez, não apresentou fumaça ou liberação de partículas sólidas ao entrarem em combustão para o acionamento da lamparina. Apesar de este apresentar o menor ponto de fulgor dos combustíveis utilizados, a chama formada foi suficiente para aquecer os gases dentro da seringa, ocorrendo a agitação das moléculas do gás (ar).

Após a finalização do teste, optou-se pela utilização do álcool, pois proporcionou uma maior clareza e visibilidade do sistema como um todo; além de atender as solicitações técnicas quando comparado com os outros dois (óleo diesel e querosene).

Na realização do teste para análise de desempenho do protótipo Stirling seguindo os parâmetros de rotações por minuto e tempo de acionamento para o motor entrar em funcionamento foi realizada a aplicação de uma pequena quantidade de lã de aço, de aproximadamente 5 cm de diâmetro, dentro da seringa que seria aquecida.

Partindo da hipótese da lã de aço desempenhar a função de regenerador, melhorando assim as relações de trocas de calor do ar aquecido nos ambientes, a aplicação deste material implicaria no aprimoramento do desempenho do Motor Stirling tipo Alfa.

Durante a avaliação a lã funcionou de fato como um regenerador, melhorando o aquecimento, pois absorveu calor fazendo com que, quando o ar frio retornasse para o cilindro quente, existisse uma transferência térmica da lã para o fluido de trabalho de maneira eficaz. Além de uma maior área de contato, o pedaço de lã de aço permaneceu imóvel dentro da seringa aquecida. Desta forma não aconteceu sua desintegração dentro do cilindro aquecido.

O Quadro 6 mostra os itens avaliados, tais como rotações por minuto e tempo de acionamento em dois testes diferentes: sendo um com a lã de aço desempenhando o papel do regenerador e outro sem a lã de aço dentro da seringa aquecida.

Quadro 6. Aplicação da lã de aço.

Seringa	Rotações por minuto (rpm)	Tempo de acionamento (S)
com lã de aço	819,1 rpm	80 segundos
sem lã de aço	680,0 rpm	65 segundos

Desta forma foi possível observar um melhor desempenho do protótipo quando comparado ao teste de funcionamento sem a lã de aço, apresentando uma maior quantidade de rotações por minuto (819,1 rpm) e um tempo de acionamento dentro de uma faixa de 80 segundos para entrar em funcionamento. Neste teste, usando a lã de aço, foi conferido o maior índice de rotações por minuto que o protótipo do motor Stirling tipo Alfa alcançou em seu funcionamento.

O teste de determinação da taxa de compressão da Zona Morta consiste na variação da taxa de compressão da zona morta provocando assim uma diferença quanto aos itens de avaliação de desempenho. A zona morta é uma área dos cilindros que não é preenchida com a finalidade de reduzir a compressão. Nesta avaliação foram observados duas configurações destinadas a zona morta com o volume de 1 ml para a seringa não aquecida e 3ml para a seringa aquecida. Na outra configuração foi alterada para 2 ml de volume do cilindro frio e 4 ml para a seringa em aquecimento representada na Fig. 10.

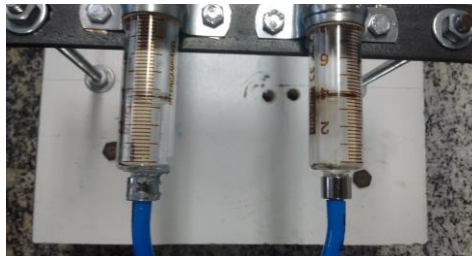


Figura 10. Taxa de Compressão 4:2.

No Quadro 7 tem-se os parâmetros de avaliação referentes a cada tipo de configuração.

Quadro 7. Taxas de Compressão.

Taxa de compressão	Rotações por minuto (rpm)	Tempo de acionamento (s)
3:1	819,1 rpm	65 segundos
4:2	692,0 rpm	105 segundos

Após essa avaliação foi observado um melhor desempenho da configuração utilizando os volumes de 1 ml na seringa fria e 3 ml na seringa aquecida, provocando uma maior quantidade de rotações por minuto e um tempo de acionamento mais eficiente.

4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste trabalho pode se concluir que o protótipo do motor Stirling Tipo Alfa conseguiu alcançar seus objetivos, produzindo-se o protótipo de um motor com princípios termodinâmicos e eficiência

comprovada. Após a realização dos testes foi perceptível que a configuração que demonstrou um melhor desempenho e aproveitamento foi o protótipo aquecido com a lamparina com álcool como combustível, possuindo o disco de corte com menor diâmetro para desempenhar a função de volante e aplicando a lâ de aço como regenerador com uma zona morta de 1 ml de volume na seringa a frio e 3 ml para a seringa aquecida. Portanto, tendo como base os testes realizados, esta é a configuração mais adequada para um melhor rendimento.

O protótipo possui ainda um grande potencial didático podendo ser utilizado pelos docentes da Instituição para aulas da disciplina de Física no conteúdo de termodinâmica e também podendo abordar os conteúdos de Energia Potencial, Cinética, Mecânica e Térmica. No curso técnico em eletromecânica pode ser utilizado para o ensino do conteúdo de motores à combustão externa da disciplina de Equipamentos Industriais e afins. Futuramente poderá ser aplicada uma parte elétrica por meio de um motor elétrico DC 12 v para funcionar como elemento de partida, fazendo-se assim com que não necessite mais de apenas uma partida manual; optando-se por um sistema de partida manual, elétrico ou manual/elétrico. Quando em funcionamento, o motor poderá ser utilizado como gerador.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao grupo de pesquisa Automação, Eficiência Energética e Produção do IFBA – Campus Jacobina pelo apoio e suporte técnico no desenvolvimento deste projeto, bem como ao técnico de laboratório Jailton Bezerra da Mota pela colaboração e apoio na montagem do protótipo.

6. REFERÊNCIAS

- CRUZ, V. G. Desenvolvimento Experimental de um motor Stirling tipo Gama. João Pessoa. 2012.
FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. D. Motores de Combustão Interna. Jaboticabal, p. 2. 2006.
PAUTZ, E. R. Estudo e Projeto de um Motor Stirling. Panambi. 2013.
SILVA, R. P. D. Projeto Motor Stirling. Unicamp. [S.l.].
SOUZA, B. L. F. E. R. P. D. Motor Stirling. Unicamp, Relatório Final, 2008.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF THE STIRLING TYPE ALPHA ENGINE

Jander. L. FONSECA, e-mail¹: janderLopes@outlook.com.br
Enos. S. ANICETO, e-mail²: enosaniceto@gmail.com
Beliato. S. CAMPOS, e-mail³: beliatocampos@ifba.edu.br
Raimisson. B. ASSIS, e-mail⁴: raimison_assis@ifba.edu.br
Tércio. G. MACHADO, e-mail⁵: tercio@ifba.edu.br

^{1,2,3,4,5} Instituto Federal da Bahia, Campus Jacobina, Departamento de Eletromecânica, Jacobina- BA, Brazil. Avenida Centenário, 500. Nazaré. Jacobina-BA. CEP: 44.700-000.

Abstract. *The Stirling engine is an external combustion engine developed by the Scottish shepherd Robert Stirling in 1818, having as first model a prototype used to pump water in a quarry, undergoing an improvement, the engine Stirling in 1843 was used to move machines in a foundry thus adding values for the engine at that time. In order to expand the concepts and studies about the Stirling engine, the present work aims at the development of a prototype of an Stirling type Alpha engine. The materials used for the construction of the prototype were materials that can be reused and also with low cost materials. For the development of the prototype the following steps were followed: listing and quantification of the necessary material, architecture, assembly and tests. Analyzes were performed on the efficiency of the engine such as number of revolutions per minute, performance with different fuels and performance. The results were satisfactory in terms of the development of the prototype of the Stirling type Alfa engine, achieving the expected results such as the confection and operation of the equipment, as well as the possibility of analyzing the Stirling engine in operation with different types of fuels and configurations. From the results obtained and the experimental demonstration of the prototype it became visual the typical demonstration of the operation of an external combustion engine obeying to the thermodynamic cycle of operation showing conclusively the possibility of confection of a prototype of a Stirling engine with materials which can be reused and with low cost materials.*

Keywords: Engine, Prototype, Stirling Engine, External Combustion, Fuel