

FABRICAÇÃO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA

Lourival de Assunção Corrêa Neto, netocorreia96@gmail.com¹
Victor Carvalho Pinheiro Silva, victor96carvalho@gmail.com¹
Tamires Rodrigues Costa, tamiresrodriguescosta03@gmail.com¹
Leandro Rafael de Moraes Figueiredo, rafaelmoraes00@gmail.com²
Hendrick Maxil Zárate Rocha, henzaro@gmail.com²

¹Universidade Federal do Pará - FEM, Rua Augusto Côrrea, 1 – Guamá, Belém - PA

²Universidade Federal do Pará - PPGEM, Rua Augusto Côrrea, 1- Guamá, Belém - PA

Resumo: A utilização de fontes energéticas poluentes e não renováveis se tornou uma problemática mundial. Existe um interesse proeminente de multinacionais e empresas governamentais em pesquisar e descobrir novos recursos de energia que diminuam a agressão ao meio ambiente, compara-se a eficiência de combustíveis fósseis e que mantenham os lucros gerados pela produção energética. Os motores Stirling surgem como alternativa para gerar energia limpa e renovável, a partir das mais diversas fontes de calor. O princípio desses motores se baseia na combustão externa de fluidos contidos em pistões, que sofrem variação de temperatura, volume e pressão em um ciclo operacional. Neste projeto, utilizar-se-á do motor Stirling tipo alfa para produzir trabalho mecânico com objetivo de obter-se análises quanto ao consumo, eficiência perante utilização de diferentes combustíveis, a potência efetiva gerada, vantagens e desvantagens da aplicação destes mecanismos de forma experimental e conforme a constatação da coleta de dados, o desenvolvimento destas máquinas em tamanho real emergiria como tendência fundamental para a dinâmica de geração energética renovável.

Palavras-chave: produção energética, motores Stirling, combustão externa, eficiência.

1. INTRODUÇÃO

Com advento do meio técnico científico-informacional, constatou-se a necessidade de formas efetivas de produção energética que sustentassem o sistema industrial vigente. Diante tal fato, como resposta à escassez e aos efeitos de combustíveis fósseis, as fontes energéticas renováveis emergem como solução alternativa para o estabelecimento estável da matriz energética.

O desenvolvimento de formas limpas de energia e a melhoria tecnológica permitiram seu emprego em diversos cenários industriais acelerando a viabilidade de um uso sustentável dos recursos ambientais, desta forma, externa-se o interesse em busca do desenvolvimento de novas tecnologias que permitam a geração desta concepção de energia sustentável e econômica. Neste contexto, surgem as possibilidades de aplicação disponibilizadas pelo motor do tipo Stirling, visto sua intensa acessibilidade diante a queima de combustíveis, caracterizando os motores de combustão externa, onde todo trabalho de pesquisa relacionado a eles se torna de suma importância para um maior desenvolvimento da tecnologia, visando o aumento do desempenho, principalmente com o aproveitamento das fontes de energia antes descartadas.

Motores Stirling são máquinas térmicas especiais, definidas como um arranjo mecânico cilindro-pistão e uma fonte de calor externa ao cilindro. Em relação à eficiência térmica, são capazes de superar a de outros sistemas como, por exemplo, os de ciclo de Rankine, podendo alcançar até a eficiência de Carnot (η) revelando-se como alternativa viável, econômica e energética, em relação às suas diversas aplicações, tais como: substituição de unidades solares fotovoltaicas (Shendage *et al*, 2010).

Estes motores de combustão externa são movidos pela expansão de um gás quando aquecido, seguida da compressão do mesmo quando resfriado. O gás apresenta-se em uma quantidade fixa que é transferida de um lado a outro entre a fonte fria e a quente. Um pistão móvel - ou mais - é responsável pelo direcionamento do gás entre estes dois extremos.

No que diz respeito às aplicações, ele pode ser usado para obtenção de trabalho mecânico ou energia cinética com o intuito de conversão em energia elétrica, além de poder utilizar fontes térmicas que estariam sendo desperdiçadas por outro processo (Sulzbach, 2010). Por serem silenciosos, mais ecológicos e eficientes também são destinados a sistemas de refrigeração.

2. MOTORES DO CICLO STIRLING

Os motores do ciclo Stirling são máquinas térmicas descobertas em 1816 por Robert Stirling, com o objetivo de obtenção de um mecanismo equivalente ao motor a vapor, contudo, com um grau de periculosidade menor.

O ciclo operacional deste motor é baseado na expansão e compressão de um gás, denominado gás de operação, onde este é confinado a mover-se de forma cíclica a partir de uma fonte fria onde é comprimido e uma fonte quente onde ocorrerá o processo de expansão gasosa, sendo assim, a força motriz está baseada no gradiente de temperatura imposto entre as fontes.

Teoricamente, a eficiência alcançada pelo motor Stirling é maior que qualquer outro motor térmico, capaz de chegar a um valor aproximado de 45%. Contudo, alguns empecilhos enfrentados na prática reduzem a eficiência destas máquinas, como limites na transferência de calor em relação à convecção, viscosidade do fluido, atrito entre as peças e a presença ou ausência de regenerador.

2.1. Variedade de Motores Stirling

Os motores Stirling, de acordo com sua arquitetura, são classificados em três tipos: beta gama e alfa.

Na configuração beta, os pistões encontram-se alinhados em um único cilindro. Pela sobreposição entre cada movimento de ambos os pistões, uma taxa de compressão maior do motor é obtida. Entretanto, as hastes do pistão de deslocamento e o de trabalho estão alinhadas, o que torna o mecanismo de sincronização complexo.

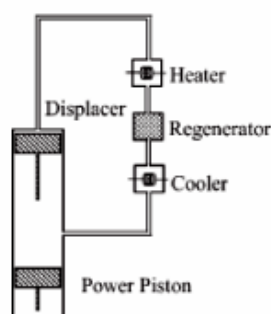


Figura 1. Configuração esquemática do tipo beta. (Bancha K. A., 2002)

A variante gama exibe a constituição de dois cilindros independentes, um quente e um frio. O quente desloca o fluido de trabalho entre as extremidades, suspenso por uma haste deslizante pelo centro do cilindro quente, que o envolve totalmente. O pistão de trabalho encontra-se separado do cilindro quente e é responsável pelo trabalho do motor, podendo ser este trabalho de compressão e expansão.

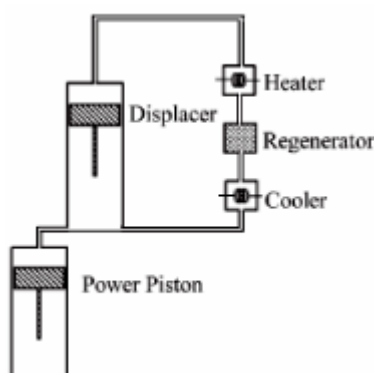


Figura 2. Configuração esquemática do tipo gama. (Bancha K. A., 2002)

Aqueles denominados do tipo alfa consistem em dois cilindros independentes conectados por uma mangueira na qual está localizado o regenerador, responsável pelo gerenciamento do calor gasoso entre câmaras, sendo que em cada cilindro há um pistão móvel com 90° de defasagem entre fontes, onde uma delas é aquecida por uma fonte de calor e a outra é mantida em temperatura ambiente ou arrefecida por água, o espaço delimitado pela distância entre os pistões permite a circulação do ar, realizando as etapas de compressão e expansão determinando o funcionamento do mecanismo.

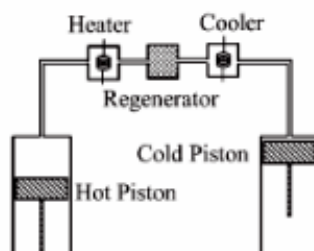


Figura 3. Configuração esquemática do arranjo tipo alfa. (Bancha K. A., 2002)

2.2. Ciclo Stirling

O ciclo Stirling ideal combina quatro processos, dois processos isotérmicos e dois processos de troca de calor em volume constante. Conforme o diagrama de pressão e temperatura na figura 4, o trabalho é feito em, ou produzidos pelo ciclo, apenas durante os processos de temperatura constante, no entanto, o calor deve ser transferido durante todos os quatro processos (Stine, 2001).

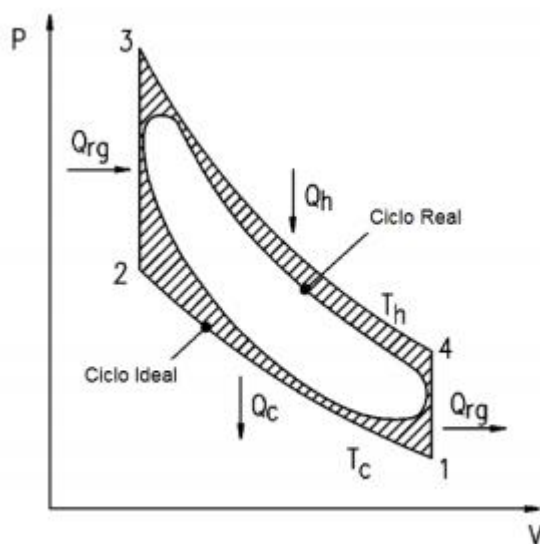


Figura 4. Diagrama P-V do Ciclo ideal Stirling.

As quatro etapas do ciclo Stirling podem ser definidas, como:

1-2. Compressão isotérmica: Nesta etapa o fluido do pistão principal é comprimido e escoado para o pistão de arrefecimento, onde o mesmo é comprimido. Neste caso, o fluido do pistão principal sofre um trabalho negativo, mas, é inferior ao trabalho realizado na primeira fase, ocorrendo em temperatura constante.

2-3. Resfriamento isocórico: o ciclo é concluído nesta etapa. O posicionamento dos êmbolos é fixado e, a expansão ocorrida anteriormente no pistão de arrefecimento, provocando uma diminuição de temperatura do fluido. Em seguida, o ciclo retoma a fase de expansão volumétrica.

3-4. Expansão isotérmica: Nesta etapa ocorre uma variação de volume positiva, ou seja, o fluido expande no pistão principal enquanto o pistão de arrefecimento comprime ambos à temperatura constante. É considerada como a fase em que o sistema realiza trabalho mecânico positivo.

4-1. Aquecimento isocórico: Neste momento, os pistões mantêm a posição anterior, ou seja, a volume constante. Entretanto, há um aquecimento do fluido interno.

. Na prática, os processos ocorrentes não seguem o ciclo ideal. Existem fatores fundamentais que dificultam o funcionamento ideal da máquina, são eles: o movimento alternativo dos pistões, a regeneração imperfeita e o volume morto.

O volume morto é a maior causa da ineficiência do motor, e é devido ao uso integral do volume do gás durante a operação, isto é, parte do gás permanece imóvel nas câmaras do motor. A regeneração trata-se de uma reciclagem de calor dentro do ciclo: Durante o resfriamento o fluido recém-aquecido perde calor para entrar em equilíbrio com a fonte fria, parte desse fluido é transportada pelo regenerador para a parte de aquecimento, assim, o fluido precisará de menos energia da fonte e há menos gasto energético. Esses fatores acabam alterando (arredondando) o diagrama de pressão-volume do sistema, expressa pela figura 4.

3. METODOLOGIA

A partir de ensaios realizados no protótipo, foi possível obter dados a fim de verificar e comparar algumas variáveis de trabalho, as quais foram consumo, temperatura de serviço, tensão e potência. Assim, uma série de procedimentos foi adotada provendo a coleta dos dados. Para cada parâmetro coletado empregou-se técnicas e equipamentos diferentes expostos a seguir.

Com o objetivo de obter a medição do consumo de combustível, utilizou-se a balança digital da marca DIGIMED modelo DG-15WT. Com a finalidade de avaliar a variação da massa em tempo real, tomada uma quantidade mássica inicial e, após um intervalo fixo estipulado de 10 minutos, utilizando um balão volumétrico de fundo chato com capacidade de 25 ml e os testes foram aplicados adotando como agentes percursoros etanol hidratado e anidro. As especificações da balança, encontradas no manual do fabricante, são registradas na tabela 01 a seguir:

Tabela 1. Especificações da balança DIGIMED DG-15WT utilizada na análise de consumo.

Parâmetros	Especificações
Fabricante	DIGIMED
Modelo	DG-15WT
Capacidade (kg)	15
Resolução	0,1g
Reprodutibilidade	$\pm 0,2g$
Linearidade	$\pm 0,2 g$
Saída digital	RS232
Alimentação (Vca)	90 a 240

A fim de adquirir específicas variáveis nos testes, empregou-se o aquisitor de dados CONTEMP A202 foi manipulado para o registro e monitoramento das variáveis analógicas e com auxílio do conversor D-501 USB o sinal analógico foi transformado em um sinal digital, o qual foi reproduzido através do software DAQ FACTORY da Azeotech. Este foi aplicado para captar os sinais emitidos pelos termopares, possibilitando sua leitura no computador. Também, com auxílio de uma protoboard contendo três resistores (220Ω cada) associados em série, com a função de simular cargas ao sistema, onde foi possível obter os parâmetros de tensão mensurados respectivamente, sem carga, uma carga, duas cargas e três cargas.

No decorrer do funcionamento, dada a estabilidade alcançada pelo protótipo empregou-se uma série de medições com um tacômetro MITUTOYO PH-200LC, a fim de verificar a rotação do volante. Todos os parâmetros citados foram amparados para todos os combustíveis em teste a fim de avaliar os resultados de eficiência, geração e consumo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diversas vantagens são encontradas em um motor Stirling, entre elas destacam-se:

- Proposta de sustentabilidade: Ao contrário dos motores de combustão interna, nos motores de Stirling, a combustão é contínua, permitindo assim uma maior eficiência, devido o gasto mais completo e eficientemente do combustível submetido.
- Variabilidade de alimentação: Os motores do ciclo Stirling podem utilizar quase todas as fontes energéticas conhecidas, visto ser de combustão externa, dentre os principais destacam-se: etanol, metanol, gás natural, diesel, biogás, energia solar e até mesmo calor geotérmico.
- O funcionamento silencioso: O fato de não possuir válvulas nem muitos elementos móveis, o nível de ruído e vibração são mais baixos que os convencionais.
- Baixa manutenção: Os produtos da combustão não entram em contato direto com as partes móveis do motor e, por conseguinte, não há contaminação do lubrificante. Nos motores Stirling, ao contrário dos motores de combustão interna, as temperaturas são menores e as paredes do motor podem ser refrigeradas, o que permite inclusive o uso da água como lubrificante no lugar dos óleos.
- Diversidade de adaptação: Como o motor de Stirling é composto por elementos simples, estes podem ser dispostos de diversas maneiras, possibilitando assim uma maior adaptação a diferentes espaços físicos.

As desvantagens se apresentam em destaque com:

- Elevado custo: O motor Stirling ainda é mais caro do que, por exemplo, um motor diesel da mesma potência. Estas diferenças de preço provêm da fabricação e da produção dos seus elementos que, apesar de possuir um arranjo simples, materiais específicos são necessários para seu efetivo funcionamento.
- Qualidade de vedação: Os motores Stirling necessitam de boa vedação das câmaras que contém o gás de trabalho para evitar a contaminação do lubrificante. O rendimento do motor é normalmente maior com altas pressões, conforme o gás utilizado, porém quanto maior a pressão de trabalho maior é a dificuldade de vedação do motor.

Com os valores finais apresentados, é possível calcular a eficiência do sistema a partir da relação direta entre a potência térmica (ou fluxo de calor) e a potência eficaz na saída do gerador elétrico. Vale ressaltar que esta forma de cálculo não leva em consideração as perdas decorrentes dos fenômenos de condução e convecção que ocorrem durante o aquecimento da câmara de expansão do motor Stirling.

Potência térmica (ou fluxo de calor) é definida como sendo a transmissão de energia térmica de um corpo mais energético para outro de menor energia, sendo que esta pode ser realizada por três modos de propagação: condução, convecção e radiação.

A potência térmica de dado combustível é determinada a partir da equação:

$$Q = \left(\frac{m}{\Delta t} \right) * PCI \quad (1)$$

Onde: Q – Potência Térmica (W);

m – massa (kg);

Δt – Variação do Tempo (s);

PCI – Poder Calorífico Inferior (kJ/kg).

O poder calorífico inferior é definido como a quantidade de calor que pode produzir 1kg de combustível, quando este entra em combustão com excesso de ar e os produtos de combustão são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada. (Moreira, 2011)

Tabela 2. Especificações do Poder calorífico de alguns combustíveis. (ANS/SPD).

Combustível	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
Etanol Anidro	28242
Etanol hidratado	26359
Biodiesel (B100)	37656
GLP	46442
Gasolina de Aviação	44350
Querosene iluminante	43514

A eficiência térmica consiste na parcela de potência consumida por um sistema que é convertida em trabalho, e é dada por:

$$\eta = \frac{Pe}{Q} \quad (2)$$

Onde: η - Rendimento

Q - Potência térmica da fonte quente;

Pe - Potência efetiva de saída do gerador;

A figura 5 mostra a temperatura da chama, que chegou por volta dos 750 °C.

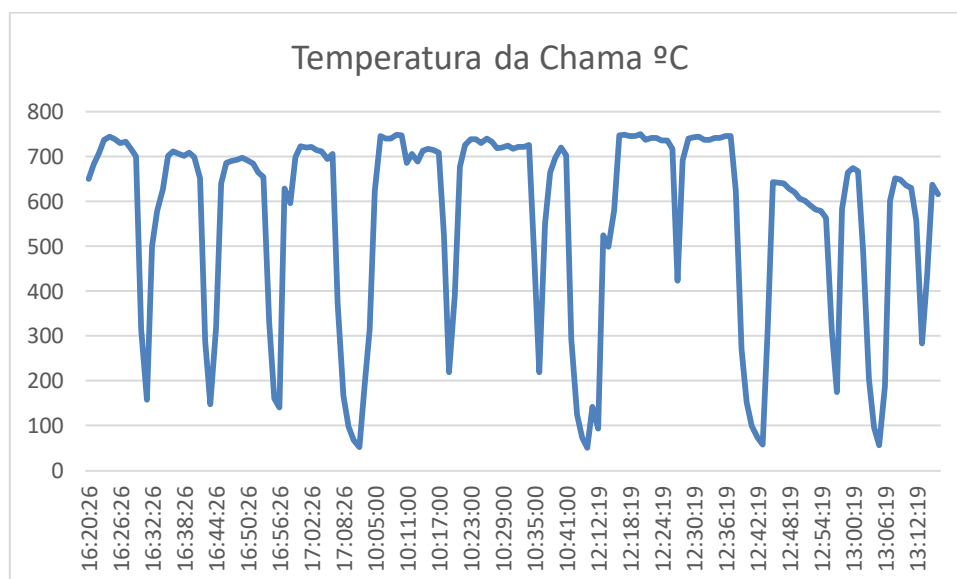


Figura 5. Temperatura da Chama

A figura 6 mostra a tensão gerada por cada carga adicionada no motor, variando de 0 V, para sem carga e próximo de 4,5 V para uma resistência de 660 Ω

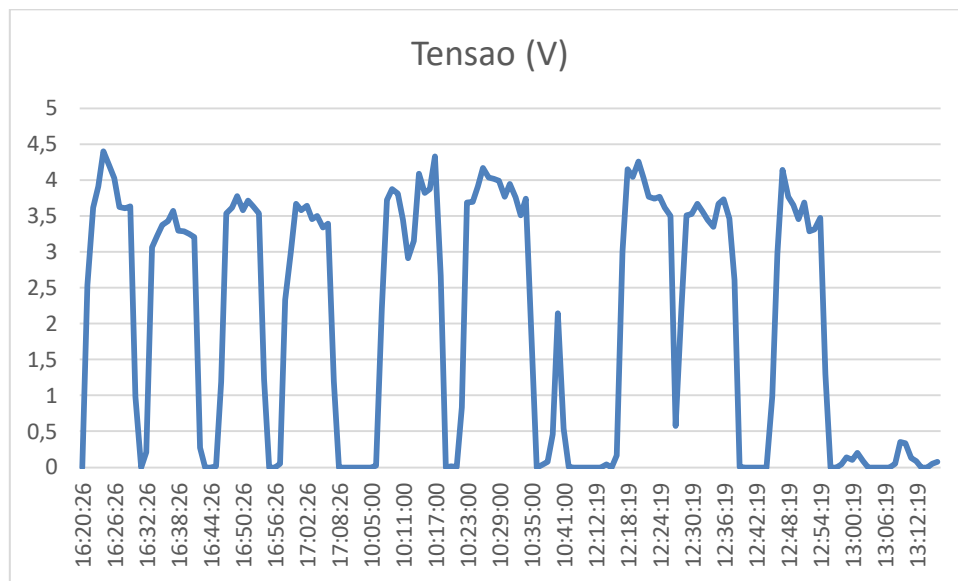


Figura 6. Tensão gerada.

Tabela 3. Dados para o cálculo da Eficiência Térmica utilizando Etanol Anidro.

Carga Resistiva	Fluxo mássico (kg/s)	Potência Térmica (kW)	Potência efetiva (Elétrica)(W)	Eficiência Térmica (%)
220 Ω	0,0005647	15,9483	0,041456	0,00025994
440 Ω	0,0006995	19,7553	0,02046	0,00010354
660 Ω	0,0006409	16,8935	0,01056	0,00006251

Tabela 4. Dados para o cálculo da Eficiência Térmica utilizando Etanol Hidratado.

Carga Resistiva	Fluxo mássico (kg/s)	Potência Térmica (kW)	Potência efetiva (Elétrica)(W)	Eficiência Térmica (%)
220 Ω	0,0006735	17,7396	0,04256	0,0002399
440 Ω	0,0006229	16,4217	0,02241	0,0001365
660 Ω	0,000704242	18,5567	0,01080	0,0000582

A figura 7 mostra o desenho esquemático do motor utilizado para coleta dos dados

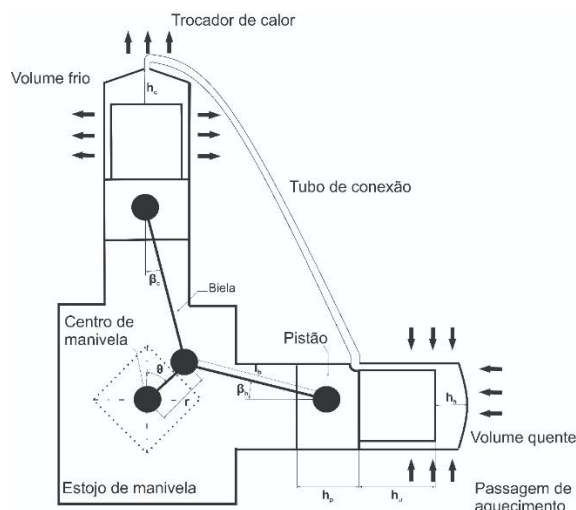


Figura 7. Representação esquemática do motor utilizado.

5. CONCLUSÕES

Nota-se que o motor Stirling se revela como uma ferramenta alternativa em diversas aplicações de aproveitamento de uma fonte de energia, pois dependendo do seu porte, poderá, por exemplo, carregar uma bateria de um motor estacionário ou acender algumas lâmpadas, demonstrando sua diversificação quanto ao uso de combustíveis e sua aplicabilidade. Neste protótipo, a construção deu-se de forma simples, porém o projeto requer certas precauções quanto a questão do atrito entre as partes móveis, visto sua geração ser pequena, este fator torna-se relevante quanto a rendimento desta máquina térmica.

O protótipo tem como objetivo a análise em escala menor, monitorando dados de consumo e geração para fins de extrapolação a um motor de porte maior, aumentando suas condições de utilização e, baseado nos resultados, buscar o aperfeiçoamento deste motor visando seu custo-benefício e expandindo a ideia de recorrer às soluções de caráter sustentável no setor energético.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Hendrick Maxil Zárate Rocha por todo suporte e colaboração dispostos durante o processo de formulação e elaboração do projeto, bem como a ajuda fornecida pelo Laboratório de Motores, o qual faz parte do Grupo EBMA- Energia Biomassa e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Pará. E, também, aos familiares e amigos pelo apoio e compreensão.

7. REFERÊNCIAS

- Bancha K. A. "Review of Solar-Powered Stirling and Low Temperature Differential Stirling Engines, Renewable and Sustainable Energy Reviews", 2002.
- C.H. Cheng, Y.F. Chen, "Numerical simulation of thermal and flow fields inside a 1-kW beta-type Stirling engine", Appl. Therm. Eng., 2017, pages 554–561.
- Corria, M. E., Cobas, V. M., Lora, E. S. "Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil." Elsevier, 2006.
- Hossain, M. D., Das, S. K; Hossain, M. S. "Fabricaton & Performance Test of a Low Temperature Differential Stirling Engine." International Journal of Scientific & Engineering, v. 5, janeiro, 2014.
- Moreira, José R. S; Tópicos Seleccionados de Aplicações da Termodinâmica. São Paulo: SISEA, 2011.
- Shendage, D. J., Kedare, S. B., Bapat, S. L., "An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism". Renewable Energy. 36, 2010.
- Stine, W., 2001. Power From The Sun. Disponível em: <http://www.powerfromt/>. Acesso em 03 de março 2018.
- Sulzbach, Jaimir. "Projeto e fabricação de um motor Stirling modelo didático. Panambi": UNIJUI, 2010.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MANUFACTURING AND ANALYSIS OF A STIRLING TYPE ALPHA ENGINE PROTOTYPE

Lourival de Assunção Corrêa Neto, netocorrea96@gmail.com¹

Victor Carvalho Pinheiro Silva, victor96carvalho@gmail.com¹

Tamires Rodrigues Costa, tamiresrodriguescosta03@gmail.com¹

Leandro Rafael de Moraes Figueiredo, rafaelmoraes00@gmail.com²

Hendrick Maxil Zárate Rocha, henzaro@gmail.com²

¹Federal University of Pará - FEM, Rua Augusto Côrrea, 1 – Guamá, Belém - PA

²Federal University of Pará - PPGEM, Rua Augusto Côrrea, 1- Guamá, Belém - PA

Abstract: *The use of polluting and non-renewable energy sources has become a global problem. There is a prominent interest of multinationals and government companies in researching and discovering new energy resources that reduce environmental aggression, compare fossil fuel efficiency and maintain the profits generated by energy production. Stirling engines come as an alternative to generate clean and renewable energy, from the most diverse sources of heat. The principle of these engines is based on the external combustion of fluids contained in pistons, subjected to temperature changes, volume and pressure in an operating cycle. In this project, the Stirling type alpha engine will be used to produce mechanical work in order to obtain analyzes on the consumption, efficiency of the use of different fuels, the effective power generated, the advantages and disadvantages of the application of these mechanisms experimentally and according to the data collection, the development of these machines in real size would emerge as a fundamental trend for the dynamics of renewable energy generation.*

Keywords: *energy production, Stirling engines, external combustion, efficiency.*