



Desenvolvimento de um Motor Stirling Movido a Energia Solar como Fonte Geradora de Eletricidade

Tainara de Jesus Silva
tainaraasilva2@gmail.com
AEBD

Cicero Castro da Fontoura
cicero.castro@olfar.ind.br
AEBD

Gabriel Gonçalves Pessoa de Castro
gabriel.pessoa@aedb.br
AEBD

Resumo: Atualmente a preocupação com a sustentabilidade e com o bem-estar dos seres vivos do nosso planeta, vários estudos e pesquisas vem sendo realizado para que aconteça um aproveitamento mais eficiente dos nossos recursos naturais, com o foco nas fontes renováveis. O motor stirling já existe a bastante tempo, porém está voltado a ser estudado, o interesse principal no motor é ser uma boa opção para a geração de energia limpa e sustentável, uma vez que estamos vivendo uma crise energética devido o avanço das tecnologias e a chegada das indústrias 4.0, e também uma grande escassez de recursos naturais. Esse projeto visa a construção do motor stirling gama juntamente com um coletor solar, acoplado a um gerador para armazenar a energia gerada, que ocorre pelo aquecimento do cilindro através dos raios solares e assim, movimenta o pistão gerando energia mecânica e essa energia é transformada em eletricidade. De início será mostrado o princípio de funcionamento, o ciclo termodinâmico e o tipo de motor utilizado e outros conhecimentos necessários para a construção do motor. E por fim, os resultados obtidos tragos ao nosso dia a dia, pois é a ideia de o projeto trazer qualidade de vida as pessoas que moram em lugares afastados e não tem acesso à energia elétrica.

Palavras Chave: Indústrias 4.0 - Energia Solar - Motor Stirling - Energia Limpa - Sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido, recentemente, acerca da sustentabilidade, é uma busca incessante para preservar o meio ambiente, que é fundamental para a vida dos seres humanos.

Em consequência disso, nota-se que vários estudos para o aproveitamento mais eficiente dos recursos renováveis estão recebendo novos investimentos e projetos que antes haviam sido esquecidos e estão voltando a serem estudados. Um desses projetos é o motor stirling movido à energia solar, que quando desenvolvido pelo escocês Robert Stirling em 1860, antes mesmo da criação de motores de combustão interna, havia muitas limitações tecnológicas, mas com o avanço dessas tecnologias possibilitou aumentar a pressão interna de trabalho, aumentar a temperatura da fonte de calor (com o uso de materiais mais resistentes a temperatura) e a melhora da transferência de calor nos trocadores de calor utilizado, com esses avanços e a preocupação com a sustentabilidade torna a utilização do motor stirling viável.

Hoje temos uma grande demanda para consumo de energia no mundo, devido ao crescimento das tecnologias e a chegada das indústrias 4.0. Somos cada vez mais dependentes da energia elétrica, que com a chegada da quarta revolução industrial, a dependência das fontes de energia vem aumentando cada vez mais, e a necessidade de acompanhar o avanço dessas tecnologias é grande.

Porém, o mundo se encontra em uma crise hídrica e energética, também uma grande escassez de recursos naturais, a falta de chuva é o que mais nos causa preocupações, pois hoje a maioria dos abastecimentos energéticos vem das termoeletricas, uma outra forma de produzir energia sem utilizar combustíveis fósseis, mas com um custo elevado, é importante entender que não basta somente produzir mais energia e esquecer do meio ambiente, é preciso produzir energia de forma limpa e sustentável.

Sendo assim, surge uma grande necessidade de investimentos e novos estudos na geração de energia sustentável e limpa, e o motor stirling movido a energia solar é uma das alternativas, esse motor é de combustão externa, que pode utilizar para seu funcionamento diferentes tipos combustíveis, uma vez que para seu funcionamento necessita apenas de uma fonte de quente, podendo utilizar inclusive energia solar como fonte de calor.

A questão central deste trabalho é analisar o armazenamento de energia solar através do ciclo stirling e identificar qual o tempo necessário para o abastecimento de uma residência no período de no mínimo 24 horas.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é conceituar energia solar e o motor stirling, apresentar as principais características da energia solar obtida através de uma máquina térmica, construir um protótipo funcional que represente o funcionamento do motor stirling gama com uma antena para a captação dos raios solar, para que os próximos investimentos no projeto possibilite automatizar o giro da antena pra que ela acompanhe desde o nascer até o pôr do sol, analisar os resultados obtidos com o protótipo e trazer esses resultados para a pratica do nosso cotidiano.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. FONTE DE ENERGIA SOLAR

Estudos e pesquisas em cima do tema de energias renováveis estão cada vez mais sendo realizadas, com o intuito de diminuir a utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia, que atualmente nota-se que esse tipo de utilização tem causado muitos danos ao meio ambiente.

Uma pesquisa realizada pelo IEA (International Energy Agência, 2005), mostrou que a utilização no mundo em 2003 de energia gerada por combustíveis fósseis foi de aproximadamente 10579 megatoneladas de petróleo equivalente. Grande parte dessa energia (86,5%) vem de fontes não renováveis como: energia nuclear, gás natural, petróleo e carvão mineral. E 13,5% dessa energia vem de fontes renováveis como a energia solar e eólica, a biomassa e a energia geotérmica (BARROS, 2005).

A energia solar pode ser convertida em energia elétrica por efeitos causados em determinados tipos de materiais, como os refletores. O aproveitamento da energia solar tem muitas utilidades, podendo ser utilizado em iluminações residenciais, para aquecer fluidos, climatizar ambientes, e gerar potência elétrica e mecânica, como fonte de energia térmica (ANEEL, 2005).

É possível notar que a utilização de fonte solar para aquecer fluidos é através de concentradores ou coletores solares, exemplificada na figura 1.

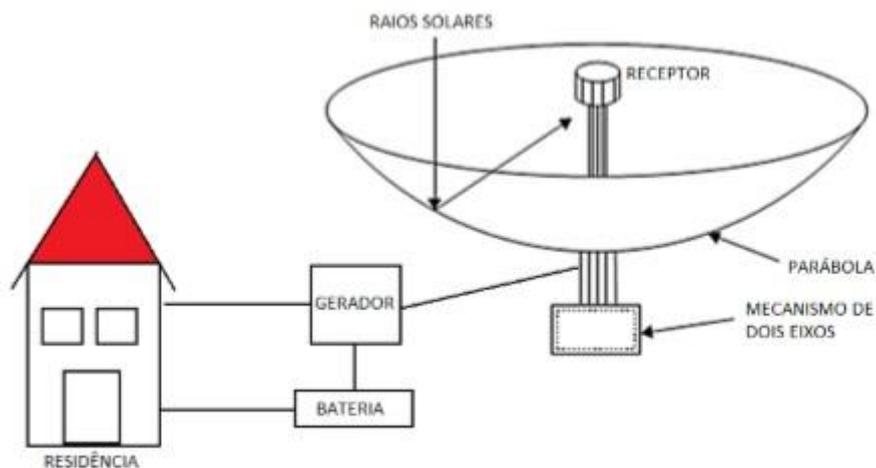


Figura 1: Concentrador Solar.

Fonte: Kalogirou (2009).

Segundo BANDEIRA (2012), os concentradores solares são formados por áreas grandes e espelhadas, essas áreas concentram a luz solar em um ponto específico, gerando assim altas temperaturas que são destinadas a produção de vapor e secagem de grãos. Quando vapor é produzido por concentrador solar, pode gerar energia mecânica com auxílio de um motor stirling ou turbina a vapor, e, logo após com o auxílio de um gerador poder gerar a eletricidade.

Conseguir converter diretamente energia solar em energia elétrica é um dos objetivos desse projeto, a conversão direta dessa energia é o resultado dos efeitos da radiação sobre materiais semicondutores, aparecendo então os efeitos fotovoltaicos e termoeletrônicos.

Um dos materiais mais adequados para converter energia solar em elétrica, destaca-se o silício. Cerca de 80% das células fotovoltaicas é utilizado silício cristalino na sua fabricação (SILVA, 2015).

Conseguir utilizar energia solar para gerar eletricidade nos traz diversos benefícios desde o socioeconômico ao ambiental (ABSOLAR, 2016).

2.2. MOTOR STIRLING

Depois de conhecer o fluido de trabalho utilizado para a geração de energia no protótipo montado, vamos conhecer a máquina térmica que irá transformar energia solar em eletricidade.

Criando em 1816, com a ajuda de seu irmão James Stirling, o pastor escocês Robert Stirling criou o motor stirling conforme a figura 2 (FINKELSTEIN & ORGAN, 2001). Um motor de combustão externa de ciclo fechado, patenteou e na patente era descrito a construção e o uso do regenerador pela primeira vez na história.

A motivação para a criação desse motor, foi devido a quantidade de acidentes que ocorria na época com os trabalhadores, pois as máquinas a vapor explodiam constantemente devido a tecnologia metalúrgica da época não suportar a toda pressão que era submetida, e pensando em uma solução criaram o motor stirling. A busca era por uma máquina que ao ocorrer falhas no material ela não explodisse, e sim parasse de funcionar.

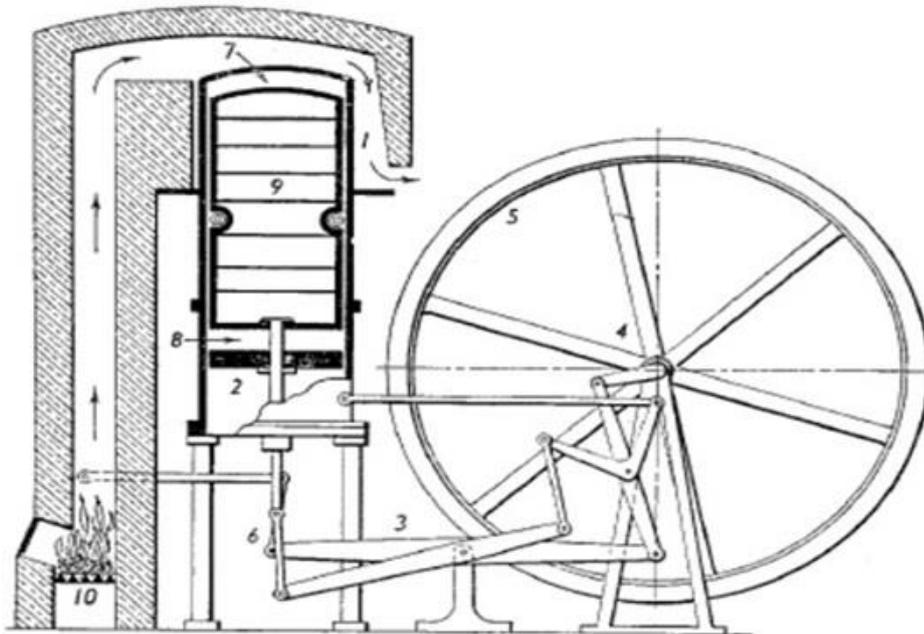


Figura 2: Motor Stirling Original.

Fonte: Finkelstein & Organ (2001).

2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CICLO TERMODINÂMICO

O motor stirling possui uma câmara quente e outra fria, que entram em contato com os trocadores de calor, existe um trocador quente para a câmara quente e um trocador frio para a câmara fria.

O funcionamento do motor acontece pela contração e expansão do fluido de trabalho, que realiza um movimento do lado frio para o lado quente, movimento esse realizado por um pistão (deslocador), ou dois, um para deslocamento e o outro para trabalho, que varia de acordo com o tipo de motor utilizado, o motor alfa, beta ou gama. A mudança de temperatura que acontece com fluido de trabalho, causa uma mudança na pressão desse fluido que gera força para movimentar o pistão (CRUZ, 2012).

O ciclo consiste em quatro processos termodinâmicos representados na figura 2, esse é funcionamento do ciclo stirling ideal, pois não considera as perdas existentes no sistema.

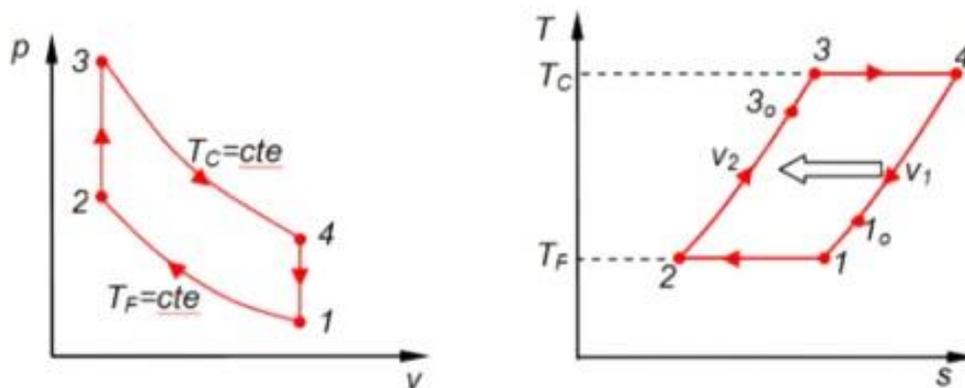


Figura 3: Diagrama P-V e T-S do ciclo stirling.

Fonte: Finkelstein & Organ (2001).

Onde:

- 1 - 2: Compressão isotérmica, onde temos rejeição de calor.
- 2 - 3: Calor é transferido ao fluido de trabalho a volume constante.
- 3 - 4: Expansão isotérmica, onde ocorre uma transferência de calor ao fluido de trabalho.
- 4 - 1: Calor é rejeitado a volume constante.

2.4. MOTOR STIRLING GAMA

O tipo de motor utilizado foi o gama, ele possui um deslocador muito parecido com o motor beta, mas esse é montado em outro cilindro, conforme a figura 3. Esse tipo de motor separa a parte quente do trocador de calor, parte essa que está ligada ao pistão de deslocamento, do espaço de compressão, ligado ao pistão de trabalho (MELLO, 2001).

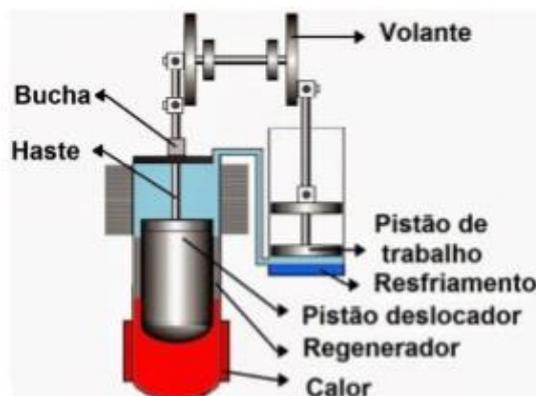


Figura 4: Motor stirling tipo gama.

Fonte: Mello (2001).

Em uma comparação com o tipo beta, o mecanismo do motor gama é mais simples, e são fáceis de obter incremento na área de transferência de calor e ajustes na taxa de compressão. Porém, parte do processo de expansão ocorre no espaço de compressão e causa uma redução na potência de saída, e apresenta volumes mortos maiores (MELLO, 2001).

2.5. COLETOR SOLAR

A finalidade para o uso de um concentrador solar espelhado, além de concentrar raios solares, também é para que o calor seja transmitido, e na forma de radiação, aquece o receptor e as temperaturas aumentam (ROXO, 2007).

O receptor armazena o calor recebido da radiação e é considerado um reservatório térmico de alta temperatura e a atmosfera reservatório de baixa temperatura, para o funcionamento do motor stirling.

A temperatura que o receptor consegue atingir vai depender da irradiação incidente sobre a abertura do espelho. Foi escolhida como geometria do concentrador solar, uma superfície que resultaria a rotação de uma parábola em torno de seu eixo central, e as antenas parabólicas atende esse critério, representado nas figuras 5 e 6.

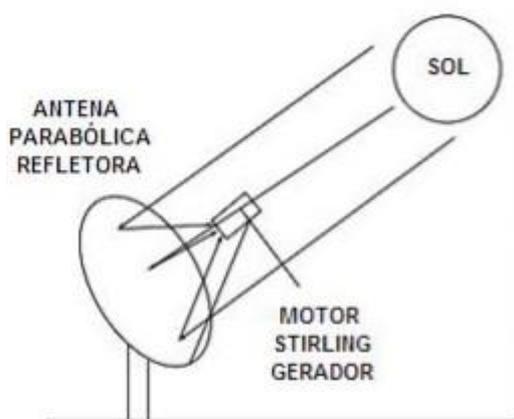


Figura 5: Coletor solar parabólico

Fonte: CULLEN (2011).

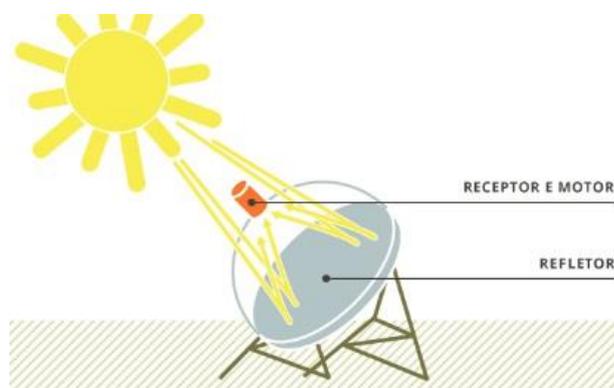


Figura 6: Esquema do projeto.

Fonte: Energia Heliotérmica (2016).

3. MATERIAIS E METODOS

Atualmente, pesquisas estão sendo realizadas para melhorar a tecnologia do motor stirling, são criados motores de variados tamanhos e configurações, que são alimentados por diferentes tipos de combustíveis. Nesse tópico iremos apresentar como foi a montagem e desenvolvimento do projeto, será explicado de uma forma sucinta a metodologia utilizada para a montagem do projeto do motor stirling gama movido a energia solar de pequeno porte.

Esse projeto tem como foco principal, mostrar a viabilidade do motor stirling para gerar energia elétrica, e incentivar investidores e novos pesquisadores para o desenvolvimento de motores com maiores escalas para atender a população na geração de energia.

3.1. MATERIAIS E DIMENSIONAMENTO

Foi utilizado um software de desenho fusion 360 para desenhar os componentes que seria usinado conforme a figura 7, para as dimensões e tamanhos de peças levamos em conta a proporção geralmente verificada em motores já existentes, sendo assim, obedecer a seguinte regra é essencial para o funcionamento do motor, que nos diz que o cilindro deslocado precisa ser 40% a 60% maior que o cilindro de potência. O teorema de schmidt nos dá os parâmetros construtivos, conforme tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Parâmetros para a construção do motor.

Diâmetro do Pistão de potência (cm)	4,8
Diâmetro do Pistão de deslocamento (cm)	5,8
Diâmetro do cilindro de deslocamento (cm)	6,0
Curso do Pistão de Potência (cm)	4,4
Curso do Pistão de deslocamento (cm)	4,4
Comprimento do Cilindro de potência (cm)	12
Comprimento do pistão de potência (cm)	6
Comprimento do Cilindro de deslocamento (cm)	20
Volume morto do espaço de expansão (cm ³)	24
Volume morto do espaço de compressão (cm ³)	35
Volume deslocado pelo pistão de deslocamento (cm ³)	124,4
Volume deslocado pelo pistão de potência (cm ³)	79,6
Volume do regenerador (cm ³)	0
Temperatura do espaço de expansão (°C)	400
Temperatura do espaço de compressão (°C)	60
Constante dos gases (R)	8,314
Ângulo de fase (°)	90

Fonte: HIRATA (1997).

Para escolher como fazer o protótipo selecionamos um projeto já existente do tipo gama, avaliamos os componentes que precisaríamos para que o motor funcionasse. Porém, estávamos limitados em peças recicláveis e motores feitos com materiais descartáveis, e como a ideia não é mostrar somente o funcionamento, optamos por usinar todas as peças no motor e tornando-o um projeto rentável, o anexo 1 estará os componentes e indicações de cada peça do protótipo.



Figura 7: Desenho completo do protótipo.

Fonte: Autor (2019).

O regenerador, reservatório frio, a fonte de calor, pistão de trabalho e o pistão de deslocamento, são peças essenciais para o funcionamento do motor, o esquema mostrado na figura 8 explica essas funções.

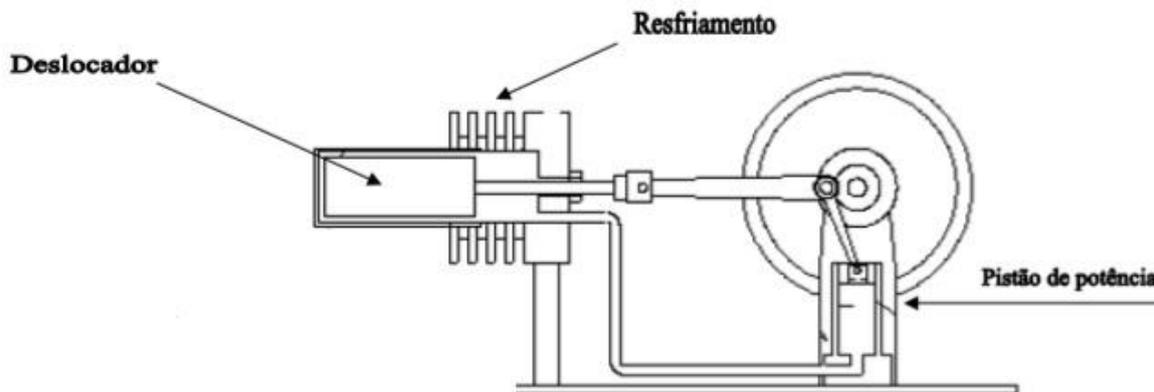


Figura 8: Desenho esquemático do protótipo.

Fonte: CRUZ (2012).

É importante enfatizar que o aquecimento do cilindro trocador de calor, figura 9, será feito através do coletor solar. Esse aquecimento se dará através da fita reflexiva que a antena parabólica está encapada para que o sol refletido incida na parte inferior do motor, modelo conforme figura 10.



Figura 9: Cilindro trocador de calor.

Fonte: Autor (2019).



Figura 10: Esquema de aquecimento do cilindro.

Fonte: Autor (2019).

3.2. CUSTOS COM O PROTOTIPO

A usinagem do motor foi entregue a USITEL na cidade de Porto Real, para a fabricação de todas as peças que o motor precisa, os custos dessas peças ficaram no valor de R\$ 1800,00. O coletor solar parabólico utilizado no projeto foi uma doação, mas seu custo varia de R\$200,00 a R\$300,00, também utilizamos uma fita reflexiva para encapar a antena, orçada no mercado livre custa R\$35,00.

E o protótipo motor Stirling gama em pequena escala custou em média R\$ 2135,00. Uma estimativa feita pela empresa SOLAR PACE, conseguimos uma estimativa do custo do motor de 2007 e uma previsão para 2030, mostrado na tabela 2, 3 e 4.

Tabela 2: Estimativa de custo de implantação do motor stirling com energia solar.

Implantação (continua)	US\$/kW (2007)	US\$/kW (2030)
Concentrador Parabólico	4.200,00	300,00
Receptor	200,00	70,00
Motor Stirling	5.500,00	90,00
Gerador	60,00	40,00
Sistema de Refrigeração	70,00	30,00
Material Elétrico	50,00	25,00
Construção da Planta	500,00	240,00

Fonte: Solar Paces (2007).

Tabela 3: Estimativa de custo de implantação do motor stirling com energia solar.

Implantação (conclusão)	US\$/kW (2007)	US\$/kW (2030)
Engenharia	1.080,00	115,00
Início de Operação	350,00	18,00
TOTAL:	12.010,00	928,00

Fonte: Solar Pace (2007).

Tabela 4: Estimativa de custo de implantação do motor stirling com energia solar.

Operação	US\$/kW (2010)	US\$/kW (2030)
Mão de obra	0,12	0,0055
Materiais	0,09	0,0050
TOTAL:	0,21	0,0105

Fonte: Solar Pace (2007).

Depois de analisar esses resultados dos custos feito pela empresa Solar Pace, podemos dizer que o retorno que o motor stirling dá em relação a custo benefício em grande, em 2030 esse projeto de gerar energia com o motor stirling é quase zero, comparando com o retorno dado pela eficiência na geração de energia.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos com o motor do tipo gama atingiram o esperado, sua configuração nos mostrou que esse motor era a melhor opção para a geração de energia, que é o intuito do desenvolvimento do protótipo.



Além dos cálculos nos mostrar o motor ideal para armazenar a energia solar em forma de calor e transformar em energia elétrica, também foi possível compreender o ciclo termodinâmico que ocorre em uma máquina térmica, conforme abordado em sala nas aulas de sistemas térmicos e termodinâmico.

Chegamos ao esperado, a montagem e funcionamento do protótipo para que os próximos estudante e pesquisadores consigo continuar com o intuito de geração de energia elétrica através do motor stirling gama, inserindo assim um gerador e uma bateria para que seja convertida a energia para o uso em residências.

5. CONCLUSÃO

A geração de energia elétrica, através do uso de coletores solares e motor stirling, é uma excelente opção ao setor energético, pois se trata de uma forma de gerar energia limpa, que causa um baixo impacto ambiental e não tem emissão de poluentes na natureza.

Essa construção do protótipo foi proveitosa, mostrando as dificuldades da manufatura que esse motor de configuração gama tem, onde o fluido de trabalho fica totalmente confinado, esse sistema deve estar balanceado e com menor atrito possível, foi constatado que essas variáveis afetam diretamente a performance do motor. Com o protótipo também conseguimos concluir que o comportamento do fluido para o tipo gama é complexo, pois nele ocorre rápida troca de calor e pressão dentro do motor.

A hipótese de funcionamento silencioso se confirma, pois os ruídos detectados ocorrem somente pelas folgas existentes no mecanismo, e não há explosão. Também podemos afirmar com esse projeto que sua construção é relativamente simples e tem um funcionamento estável. O protótipo também prova que o motor pode ser alimentado por energia solar, e que diminui a utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia e aumenta o uso de fontes de energias renováveis.

Portanto, podemos concluir que a experiência na realização desse projeto proporcionou um entendimento no ciclo stirling, oferecendo novos caminhos para novos estudos sobre o assunto. É uma tecnologia quase nunca vista no Brasil, mas que prova poder contribuir para o nosso desenvolvimento, e uma das principais aplicações é gerar energia em áreas isoladas de difícil acesso onde as energias convencionais não chega. Tornando-se um trabalho viável a novos investimentos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da Energia Elétrica do Brasil. Brasília – DF, 2005. 2ª Edição.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Geração Distribuída Solar Fotovoltaica. Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE. Rio de Janeiro, 2016.

BANDEIRA, F. P. M. O aproveitamento da energia solar no Brasil – situação e perspectivas. Brasília. Câmara dos Deputados. 2012.

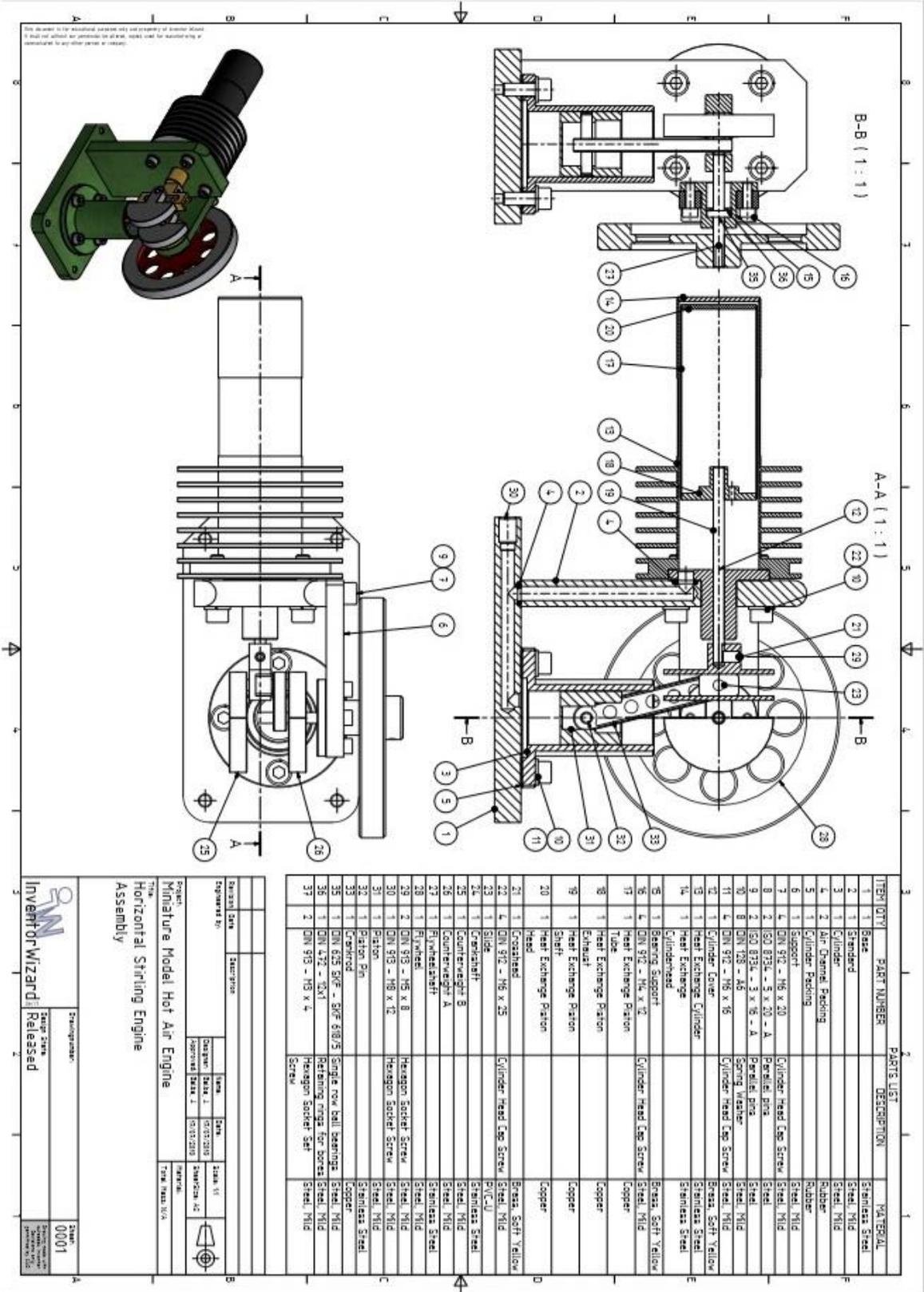
BARROS, R. W. Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling modelo 161, Operando com Diferentes Combustíveis. Itajubá, 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2005.



- CULLEN, B.** The Combined Otto and Stirling Cycle Prime-Mover-Based Power Plant. Dublin Institute of Technology, 2011.
- CRUZ, V.** Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama. Universidade Federal da Paraíba, 2012.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA.** O que é energia heliotérmica?, 2015. Disponível em <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-que-e-energia-heliotermica>>. Acesso em 19 mai. 2019.
- HIRATA K.** Schmidt Theory for Stirling Engines. National Maritime Research Institute (NMRI). 1997.
- KALOGIROU, S. A.** Solar Energy Engineering: Processes and Systems. California: Academic Press, 2009.Ed. 1st.
- MELLO, M. G.** Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001.
- ROXO, L. B.** Geração de energia elétrica com coletor solar e motor Stirling. 2007. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.



ANEXO 1



		Desenvolvido por: 0001	
Engenharia Design Center Released		Engenharia Design Center Released	
Elaborado por: Data:	Desenhado por: Data:	Aprovado por: Data:	Data:
Project:		Title:	
Miniature Model Hot Air Engine		The Horizontal Stirling Engine Assembly	