

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
DCEEng – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias
Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi

EDSON RONALDO PAUTZ

ESTUDO E PROJETO DE UM MOTOR STIRLING

Panambi

2013

EDSON RONALDO PAUTZ

ESTUDO E PROJETO DE UM MOTOR STIRLING

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Banca Avaliadora:

1° Avaliador Prof. Patricia Carolina Pedrali (Mestre).

2° Avaliador (Orientador): Prof. Roger Schildt Hoffmann (Mestre).

AGRADECIMENTOS

A minha gratidão, primeira e principalmente, é a Deus, forte rochedo em que me abrigo, autor e guia de nossas vidas, por tanto amor e tanto cuidado a mim dispensados.

Agradeço a meus pais, minha esposa, e aos familiares, que sempre lutaram por seus ideais me ensinando, com isso, a persistir na caminhada, por mais árdua que ela seja, não poupando nos incentivos.

Aos meus colegas pelo apoio no entendimento de questões as quais às vezes não ficaram claras durante o período de aula.

Ao professor Roger, pelo apoio no aprendizado, expondo de forma clara os conteúdos e estar sempre disposto a motivar.

Aos professores da UNIJUÍ que sempre nos apoiaram e nos conduziram a mais essa conquista.

Obrigado a todos que estiveram presentes de uma ou outra forma.

MUITO OBRIGADO.

RESUMO

O motor Stirling até hoje ainda é pouco conhecido, o mesmo foi desenvolvido pelo engenheiro escocês Robert Stirling no ano de 1816, esse motor possui o diferencial de ter combustão externa, podendo assim gerar trabalho a partir de varias fontes caloríficas como gases, madeira, biomassa, energia solar, entre outras. No decorrer deste trabalho será realizado um estudo sobre a situação energética mundial, mostrando assim a real necessidade de se buscar tecnologias que possam se valer de fontes de energia alternativa. Diante da temática do uso da energia vinda de fontes alternativas, é mostrado a aplicabilidade dos motores Stirling, seu funcionamento e ciclo de trabalho. Utilizando os conhecimentos pesquisados, foi projetado um novo motor, demonstrando assim seu funcionamento.

Palavras-chave: Motor Stirling, Ciclo de Stirling, teoria de Schmidt, Motor de ar quente, motores de combustão externa.

ABSTRACT

The Stirling engine to date is still unknown, it has been developed by Scottish engineer Robert Stirling in 1816, this engine has the distinction of having external combustion, thus being able to generate work from various heat sources like gas, wood, biomass , solar energy, among others. In this work a detailed study about the world energy situation, thus showing a real need to seek technologies that can take advantage of alternative energy sources. Given the theme of the use of energy from alternative sources, is shown the applicability of Stirling engines, its operation cycle. Using knowledge surveyed, we designed a new engine, thus demonstrating its operation.

Keywords: Stirling Engine, Stirling Cycle, theory Schmidt, Motor hot air, external combustion engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética mundial e brasileira.....	14
Figura 2: Motor original de Robert Stirling.....	18
Figura 3: Foto de Robert Stirling.....	20
Figura 4: Desenho em corte de motores Stirling de tipo Beta.....	24
Figura 5: Princípio de trabalho do motor Stirling tipo Beta.....	25
Figura 6: Desenho em corte de motores Stirling de tipo Gama.....	26
Figura 7: Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Gama.....	27
Figura 8: Motor tipo Alfa.....	28
Figura 9: Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Alfa.....	29
Figura 10: Esquema de um motor Stirling tipo Alfa.....	32
Figura 11: Croqui do motor Stirling a ser construído.....	38
Figura 12: Cilindro de expansão.....	39
Figura 13: Cilindro de compressão.....	41
Figura 14: Volume varido pelo pistão de compressão.....	41
Figura 15: Disposição da membrana no pistão de compressão.....	42
Figura 16: Montagem do volante e virabrequim.....	43
Figura 17: Detalhe da haste.....	43
Figura 18: Maquete de motor Stirling pronta para testes.....	44
Figura 19: Primeiro teste da maquete.....	45
Figura 20: Segundo teste da maquete.....	45
Figura 21: Projeto de motor Stirling.....	50
Figura 22: Posicionamento do motor Stirling.....	50
Figura 23: Câmara de expansão do motor Stirling.....	51
Figura 24: Cilindro de expansão.....	52
Figura 25: Guia do deslocador.....	52
Figura 26: Conjunto câmara pistão e biela.....	53
Figura 27: Conjunto virabrequim e volante.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Variáveis da teoria de Schmidt.....	31
Tabela 2 - Variáveis aplicadas ao protótipo.....	47
Tabela 3- Dados de entrada utilizados na teoria de Schmidt.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

BEN – Balanço Energético Nacional.

PURPA – Public Utility Regulatory Policies Act.

PVC- Policloreto de polivinila.

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de giro	°
a	Variável a	-
B	Variável B	-
C	Variável C	-
D_x	Ângulo de fase	°
E_C	Energia indicada de compressão	J
E_E	Energia indicada de expansão	J
E_I	Energia indicada	J
H	Eficiência indicada	-
M	Massa total do gás de trabalho	kg
N	Rotação do motor	Hz
P	Pressão do motor	Pa
P_C	Potência indicada de compressão	W
P_E	Potência indicada de expansão	W
P_I	Potência indicada	W
P_{max}	Pressão Máxima	Pa
P_{med}	Pressão média	Pa
P_{min}	Pressão mínima	Pa
R	Constante de gás	J/kgK
S	Variável S	-
t	Temperatura relativa	-
T_C	Temperatura do gás no espaço de compressão	K
T_E	Temperatura do gás no espaço de expansão	K
T_R	Temperatura do gás no Regenerador	K
V	Volume total momentâneo	m ³
v	Volume percorrido relativo	-
V_C	Volume momentâneo do espaço de compressão	m ³
V_{DC}	Volume morto do espaço de compressão	m ³
V_{DE}	Volume morto do espaço de expansão	m ³
V_E	Volume momentâneo do espaço de expansão	m ³
V_R	Volume do regenerador	m ³
V_{SC}	Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de potência.	m ³
V_{SE}	Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento.	m ³
X	Volume morto relativo.	-

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 CONCEITOS GERAIS	13
1.1 CONCEITOS DE ENERGIA.....	13
1.1.1 Cenário energético mundial e a realidade brasileira.....	13
1.1.2 A geração de energia	15
1.1.3 A tecnologia na geração de energia elétrica.....	16
1.1.4 Geração de energia com o uso de máquinas Stirling.....	18
1.2 MOTORES STIRLING.....	20
1.2.1 Biografia de Robert Stirling	20
1.2.2 A história do motor Stirling	21
1.3 FUNCIONAMENTO DOS MOTORES STIRLING.....	22
1.3.1 Configurações dos motores Stirling	23
1.3.2 Ciclos teóricos em motores	23
1.3.2.1 Motor Stirling modelo beta	24
1.3.2.2 Motor Stirling modelo gama	26
1.3.2.3 Motor Stirling modelo alfa	28
1.4 TEORIA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING	30
1.4.1 Considerações gerais	30
1.4.2 Motor Stirling modelo alfa	32
2 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR STIRLING.....	38

2.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	39
2.1.1 Cilindro de expansão	39
2.1.2 Cilindro compressão	40
2.1.3 Virabrequim e volante	42
2.1.4 Montagem do motor	43
2.2 SÍNTESE DOS ENSAIOS REALIZADOS	46
3 PROJETO DE UM MOTOR STIRLING MODELO DIDÁTICO	49
3.1 DESCRIÇÃO GERAL	49
3.2 CÂMARA E PISTÃO DE EXPANSÃO	51
3.3 ESPAÇO E PISTÃO DE COMPRESSÃO	53
3.4 ESPAÇO E PISTÃO DE COMPRESSÃO	53
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56

INTRODUÇÃO

O consumo de energia tem aumentado de maneira vertiginosa nas últimas décadas. Para Figueiredo (2007), os fatores que contribuíram para este aumento foram o desenvolvimento do parque industrial, a modernização da agricultura, o aumento da capacidade de consumo da população e a elevação dos níveis de conforto individual e familiar. A questão energética tem preocupado a todos os países, principalmente os chamados países industrializados. Velásquez (2000) fala que as crises energéticas, nas décadas de setenta e oitenta, fizeram aflorar diversos problemas a serem enfrentados para a economia continuar crescendo.

O planeta Terra é rico em energia, o principal desafio é conseguir transformar essas diversas formas de energia em um trabalho mecânico, em energia elétrica, ou em qualquer outra forma usável. Em 1816 foi desenvolvido pelo engenheiro escocês Robert Stirling o modelo de um motor que ficou conhecido como motor *Stirling*. Sulzbach (2010) mostra que esse motor tem a finalidade de transformar a energia calorífica oriunda de muitas fontes como biomassa, solar, carvão, combustíveis fósseis, etc., em energia mecânica. Esse motor utiliza um volume de um gás qualquer que é aquecido externamente, com o aquecimento o gás se expande realizando o trabalho de deslocamento de um pistão, esse movimento por consequência é transformado em movimento rotacional, podendo ser usado para o acionamento de qualquer equipamento que necessite desse movimento.

O interesse por essa tecnologia vem se despertando por utilizar inúmeros materiais que atualmente são descartados e transformá-los em energia mecânica, e, além disso, também pode ser alimentado pela energia solar. Trata-se de uma energia disponível e sem custo de produção, e que está disponível em grande parte do planeta.

A tecnologia citada acima não está sendo utilizada, até onde se tem conhecimento, mas está em estudo por muitos, pois solucionaria uma parcela dos problemas energéticos da humanidade, ao utilizar a energia solar para geração de energia elétrica. Por outro lado, as informações sobre o assunto não estão ainda difundidas nas redes de comunicação, e pouco material didático é encontrado sobre o assunto. É de interesse neste trabalho explicar o funcionamento do motor Stirling, explanar o ciclo termodinâmico, construir uma maquete com o fim de elucidar o funcionamento e, após essa fase, projetar um motor para a geração de trabalho mecânico a partir da energia solar.

1 CONCEITOS GERAIS

1.1 CONCEITOS DE ENERGIA

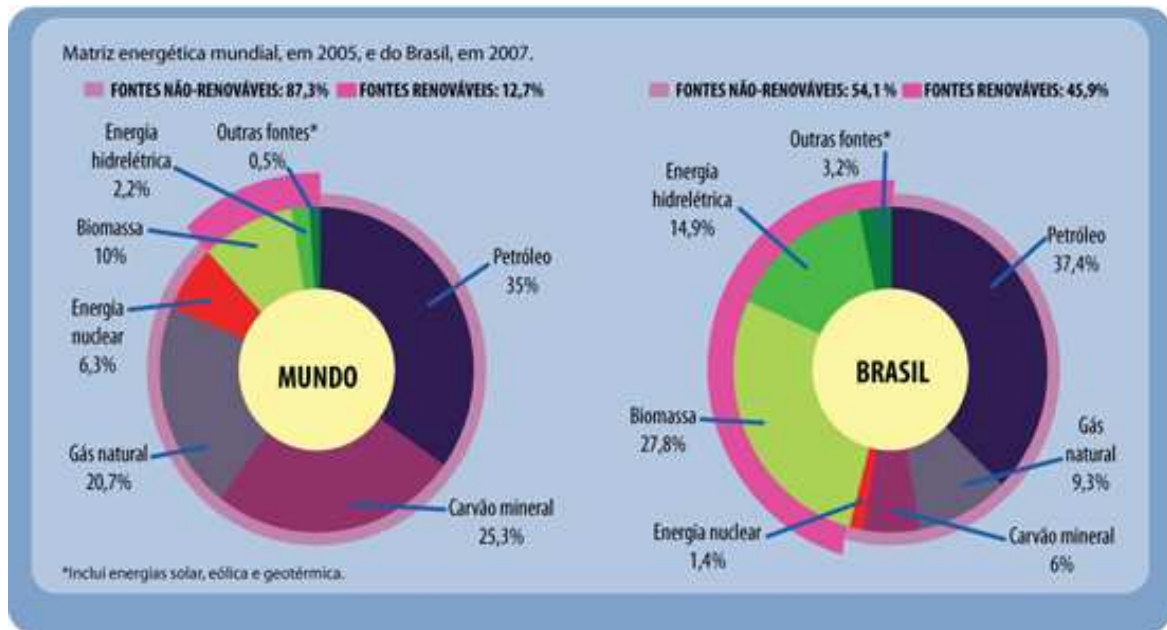
O conceito de energia é, na verdade, algo intuitivo, pois não existe uma definição específica para esse fenômeno físico. Está relacionado com a capacidade de por em movimento ou transformar algo, e fisicamente associado a geração de trabalho. No âmbito econômico e tecnológico, a energia refere-se a um recurso natural e aos elementos associados que permitem fazer um uso industrial do mesmo.

A energia sempre foi reconhecida como a base do desenvolvimento das civilizações. No final do século XIX, por exemplo, o mundo se modernizou após a Revolução Industrial, principalmente devido às novas fontes de energia. Conforme relata Alves, et al. (2009), as fontes de energia podem ser classificadas em renováveis, conhecidas também como energia limpa, como por exemplo a energia solar, eólica, biomassa e hídrica, que obtêm repostas da natureza em períodos relativamente curtos de tempo; e as não renováveis, também chamadas de energia suja, cujas reservas esgotam sempre que utilizadas, sendo que a reposição das mesmas na natureza pode levar milhões de anos, ou simplesmente não mais ocorrer (SILVA, et. al., 2009).

1.1.1 Cenário Energético Mundial e a Realidade Brasileira

O Brasil encontra-se em um período de desenvolvimento econômico robusto em processo de mudanças na sua estrutura econômica e de produção de energia. Em 2006, o país inverteu a balança de importação de petróleo e hoje, tem a possibilidade de se tornar um grande produtor de petróleo e gás natural com atuação internacional. Para Figueiredo (2007), diminuir a dependência desses combustíveis fósseis e não renováveis e, buscar soluções ambientalmente corretas, como a utilização da biomassa como fonte de energia, não apenas reduzirá os impactos globais pela queima de combustíveis fósseis como também contribuirá com a matriz energética dos países. Diante disso, o Brasil apresenta uma matriz energética predominantemente renovável, o que o torna competitivo perante o mercado mundial. A Figura 1 mostra a dependência brasileira em comparação aos níveis de dependência mundial de fontes renováveis e não renováveis de energia.

Figura 1: Matriz energética mundial e brasileira.



Fonte: Giansanti.

O gráfico acima mostra que em todo o mundo a dependência da energia vinda de fontes não renováveis derivadas do petróleo é na ordem de 35% e, no caso do Brasil está na ordem de 37,4%. Por outro lado o Brasil já faz uso de energia de fontes renováveis na ordem de 45,9% o que está bem acima da média mundial que é de 12,7%. Mas em contra partida, o Brasil só pode aumentar em 20% a geração de energia elétrica por meio de hidroelétricas, e isso tem despertado interesse ao desenvolvimento de novas soluções em energia.

Desde os anos 70, a crise no setor elétrico brasileiro vem se agravando, visto que as tarifas da eletricidade se mantiveram mais baixas tornando inviáveis investimentos necessários para que a oferta de energia fosse garantida. Entre 1992 e 1997 o crescimento no consumo de eletricidade foi de mais de 16% surgindo, dessa forma, grande preocupação com o déficit de energia e riscos de interrupção no fornecimento (VELÁZQUEZ, 2000).

De acordo com Bronzatti (2008) as novas estimativas, que contemplam o período até 2021, o crescimento médio anual da demanda total de eletricidade será de 4,5% ao ano no período, passando de 472 mil giga watts-hora (GWh) em 2011 para 736 mil GWh em 2021. Esse crescimento se dá devido o crescimento da economia de todos os países, e ainda mais pelo crescimento populacional.

De acordo com os dados e análises apresentados, o petróleo continuará como grande fornecedor de energia para o desenvolvimento do país, pelo menos até 2020. No entanto, essa situação pode estender-se caso seja comprovada a viabilidade de produção na reserva de Tupi, localizada na bacia de Santos a 250 km da costa, o que pode aumentar em até 50% as

reservas nacionais de petróleo e deslocará o pico de produção para 2030. Além disso, a grande quantidade de gás natural associado ao petróleo trará novo vigor como recurso energético.

Há forte indicação que algumas fontes energéticas destacam-se como estratégicas em um planejamento de longo-prazo e a diversificação das matrizes energéticas é salutar ao desenvolvimento do país. Isso não diminui a importância do petróleo, que é altamente estratégico e pode ser utilizado em momentos propícios como manobra de desenvolvimento dentro do âmbito mundial. Para 2020 prevê-se que 80% do potencial de geração provavelmente já estarão sendo utilizados e as restrições ambientais não permitirão o uso pleno dos 20% restantes, Bronzatti (2008). Para suprir essa deficiência, outras matrizes energéticas poderão aumentar a participação no quadro de geração de eletricidade. Esse suprimento deve ocorrer em dois momentos distintos devido ao grau de maturidade das tecnologias existentes. Em um primeiro momento, o gás natural apresenta capacidade complementar, o que possibilita suprir a necessidade de energia elétrica e manter o nível da produção. E em um segundo momento, com o amadurecimento das tecnologias na área de energia limpa.

1.1.2 A Geração de Energia

O Brasil tem caminhado a passos largos na geração de energia limpa se comparado com outros países, mas isso devido ao seu potencial na geração nas hidroelétricas. Por outro lado o tema geração de energia tem motivado todos os setores na busca pela excelência na geração energética. Vários trabalhos são desenvolvidos e publicados dando ênfase a questão energética.

No contexto da geração de energia, Figueiredo (2007) trata da questão do lixo nos aterros sanitários, os quais são geradores de gás, e que podem ser utilizados na geração de energia. São materiais resultantes das indústrias, das residências, e que muitas vezes são descartados de forma irregular e que são fontes de energia, e deixam de ser reaproveitados.

Segundo a ANEEL, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a conseqüente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e bicomustível, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição aos derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. No Brasil, em

2007, a biomassa, com participação de 31,1% na matriz energética, foi a segunda principal fonte de energia, superada apenas por petróleo, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2008.

As energias renováveis vêm ganhando mais força nos últimos tempos, favorecendo assim seu desenvolvimento, disseminação e aplicação, tornando-se uma alternativa totalmente viável para a atual situação em que o mundo se encontra, com as crises de petróleo nos países produtores, e a grande fragilidade do sistema de hidroelétricas, que ocasionou os últimos apagões no Brasil, além da inviabilidade e perigo de construção de termelétricas, usinas nucleares e outras formas de energia suja, assim denominadas, pois a utilização das mesmas gera uma grande carga de poluentes e, conseqüente degradação ambiental, o qual é visível e notório do ponto de vista social, econômico e humano, conforme descreve Silva et al. (2009).

Para Aguiar (2004) o Brasil, pela sua matriz energética relativamente limpa, é um dos países que mais condições tem de se tornar “auto suficiente em sustentabilidade”, pode e deve assumir a sua parte no desenvolvimento e institucionalização deste conceito. Condições naturais não faltam, as condições sociais imploram. Assim, se chama a atenção para à micro geração de eletricidade com tecnologias que usem combustíveis renováveis, e que a energia gerada tenha o seu custo estratégico baixo, ou seja, que não exponham o país a novas dependências, portanto, de investimento justificável no médio e longo prazo. No Brasil a geração de energia atual é fruto de um esforço estatal e usando a tecnologia nacional de construção de barragens.

1.1.3 A Tecnologia na Geração de Energia Elétrica

O desenvolvimento da malha de geração de energia vem se diversificando ano após ano. Muitas formas de geração de energia estão sendo desenvolvidas e testadas, outras ainda buscadas no tempo, voltam a ter o interesse despertado.

Segundo Santos (2006), a tecnologia tem sido aplicada de diversas formas na geração de energia, uma forma muito conhecida é a energia eólica. No País, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos multi-pás para bombeamento de água, algumas medidas precisas de direção, velocidade, constância do vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial de energia eólica, ainda não explorada. A capacidade instalada no Brasil está acima de 20 MW, com turbinas eólicas de médios e grandes portes

conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas, tais como bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

Outra forma de energia que vem ganhando destaque é a aplicação do efeito fotoelétrico, ele tem sem dúvida, uma aplicação mais direta e que resolve o problema da eletrificação pontual com grande eficiência, mas seu custo ainda é alto se comparado com outras formas de geração. Esta tecnologia está pouco desenvolvida no Brasil. Historicamente, pode-se considerar que em 1989 foi dado o primeiro impulso à produção nacional de painéis fotovoltaicos. Através do programa PROSOLAR, pretendeu-se preparar o aparato tecnológico do país ao mercado de energia solar. Com a instabilidade da empresa Helio dinâmico para continuar no mercado iniciou-se, nesta época, articulações para a entrada no mercado brasileiro de diversas empresas, já atuantes no mercado mundial, através de ações diretas ou através de financiamento, como foi o caso do governo alemão através da firma Siemens. Nessa fase também se deu incentivo a programas de eletrificação usando energia renovável, as quais despertaram um interesse maior nos investidores (FIGUEIREDO, 2007).

Outra fonte de geração de energia que tem se destacado é a geração de energia elétrica a partir do biogás. A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002).

Outra forma de geração de energia que vem ganhando apoio nos países desenvolvidos é a geração solar térmica. Essa tecnologia vem sendo desenvolvida nos Estados Unidos da América desde o começo dos anos 80 usando diversas tecnologias, entre elas a de concentradores parabólicos. Incentivada pela lei de apoio aos produtores independentes (PURPA Act.) várias unidades foram construídas, mas limitadas à potência de 80 MW. Depois de alguns altos e baixos na política de incentivo às formas renováveis de energia, e a diminuição dos preços internacionais de derivados do petróleo, a principal empresa empreendedora destes projetos, *Luz International*, entrou em concordata. As nove usinas construídas são operadas por empresas que foram adquirindo a massa falida. A geração solar térmica conta, porém, com uma alternativa tecnológica que se adaptaria às condições de micro geração descentralizadas, em regiões em desenvolvimento.

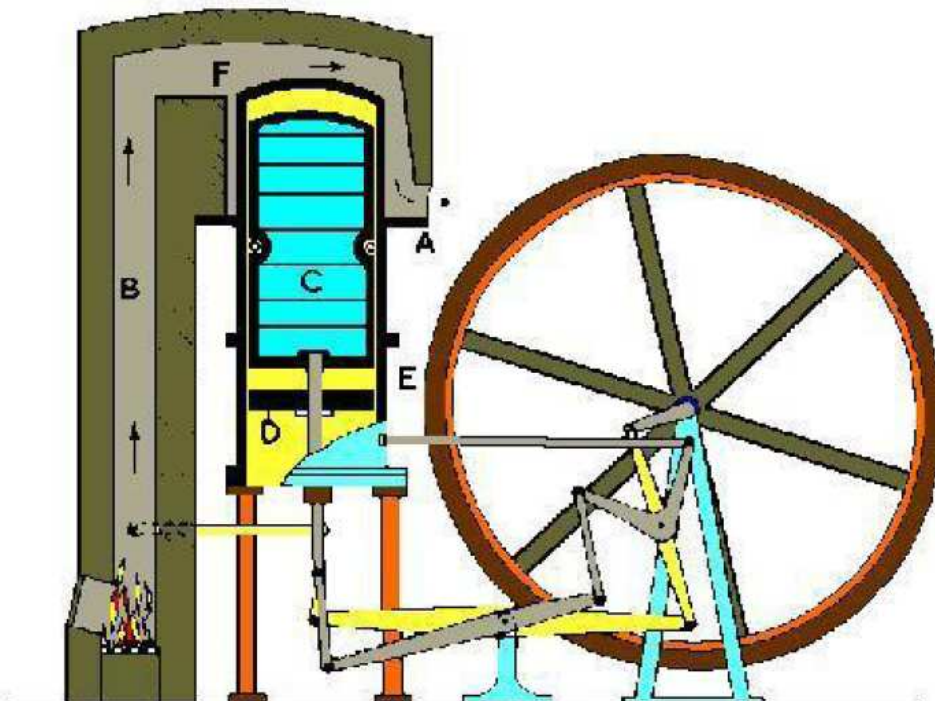
O desenvolvimento de motores que podem ser alimentados a partir de fontes de energia renováveis é de extrema importância para o aumento da utilização desse tipo de

energia. Os motores Stirling são alvo de vários estudos e pesquisas científicas devido a sua capacidade de uso eficiente de energia proveniente de qualquer fonte de calor. Assim o desenvolvimento e investigação de motores Stirling tornam-se aspectos importantes para muitos institutos científicos e empresas comerciais (CRUZ, 2012).

1.1.4 Geração de Energia com o uso de Máquinas Stirling

Existem varias métodos de converter energia calorífica em energia mecânica, um desses métodos teoricamente associado com a máxima eficiência é o motor Stirling, ou motor a ar quente. Esse motor necessita apenas de uma fonte de calor externa para entrar em funcionamento. Máquinas com ciclo termodinâmico de “Stirling” foram concebidas antes que a termodinâmica científica tivesse sido criada pelos experimentos de Joule, entre 1840 e 1849, de Von Helmholtz, em 1847, e outros. Ela foi criada com o nome de “Máquina de Ar Quente”, em 1816 por Robert Stirling e conseguia transformar parte do calor gerado, pela queima de um combustível, em trabalho e é mostrada na Figura 2.

Figura 2: Motor original de Robert Stirling.



Fonte: Cruz, 2012.

Permaneceu em uso, e com bastante aceitação por muitos anos (ZEMANSKY, 1968). Esses motores oferecem alta eficiência com baixa emissão de poluentes em comparação com

os tradicionais motores a combustão (TAVAKOLPOUR, et. al., 2008). A sua aplicação para a conversão de energia solar data de 1864. Com o desenvolvimento das máquinas a vapor e das máquinas de combustão interna ficou finalmente obsoleta, até que a partir de 1939, quando foram finalmente denominadas Máquinas de Stirling, voltaram a despertar interesse. Hoje são usadas especialmente para resfriamento criogênico. Por ser um ciclo reversível ele se aplica ao resfriamento, se a entrada do sistema for o trabalho, com a saída sendo o calor retirado de um dos lados do sistema.

Algumas empresas têm hoje alguns protótipos, para demonstração, baseados na técnica de captação de energia solar por concentradores parabólicos e em forma de disco, com uma máquina Stirling no foco. Estas unidades, com cerca de 10 metros de diâmetro, têm potência nominal de 25 KW. Empresas conseguiriam colocar no mercado uma destas unidades por US\$ 1.800,00 o KW instalado, caso a taxa de encomendas atinja as 2.000 unidades por ano. Este preço poderia ainda cair para US\$ 600,00 se as encomendas chegassem a dez mil unidades por ano. A eficiência, da conversão do calor para trabalho, prometida pelo fabricante, fica na faixa de 38 a 40%. Se um projeto for desenvolvido para as condições nacionais e para fabricação no Brasil estes valores poderiam ser ainda menores.

As máquinas de Stirling, por serem de combustão externa, se prestariam a trabalhar com mais de uma fonte de calor, se assim fossem projetadas, oferecendo a possibilidade de trabalharem durante os períodos de insolação, recebendo calor do sol, e durante a noite com calor produzido por qualquer outro combustível, inclusive biomassa. Podem ser máquinas bastante simples com manutenção e operação fáceis. Permitem operação silenciosa e com pouca vibração. Segundo Kongtragool (2002) seriam as máquinas ideais para regiões isoladas onde sejam permitidas mudanças lentas na potência de saída e uma partida não instantânea. Há ainda muito espaço para a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas cada vez mais eficientes e operacionais.

Este sistema solar térmico poderia ser um fator coadjuvante na adaptação do homem ao clima do semi-árido nordestino, fixando a mão de obra à terra e criando possibilidades para o desenvolvimento regionalizado em face das necessidades por energia não se restringirem somente ao uso doméstico. Quanto às técnicas para o aproveitamento fotovoltaico, fica claro que para o Brasil de hoje muito terá que se investir para o total domínio desta forma de geração, e o seu uso ser repensado, principalmente entre as camadas de população com menos renda.

O motor Stirling representa uma alternativa para a eletrificação de comunidades remotas e que não são amparadas pela rede elétrica convencional, pois podem operar

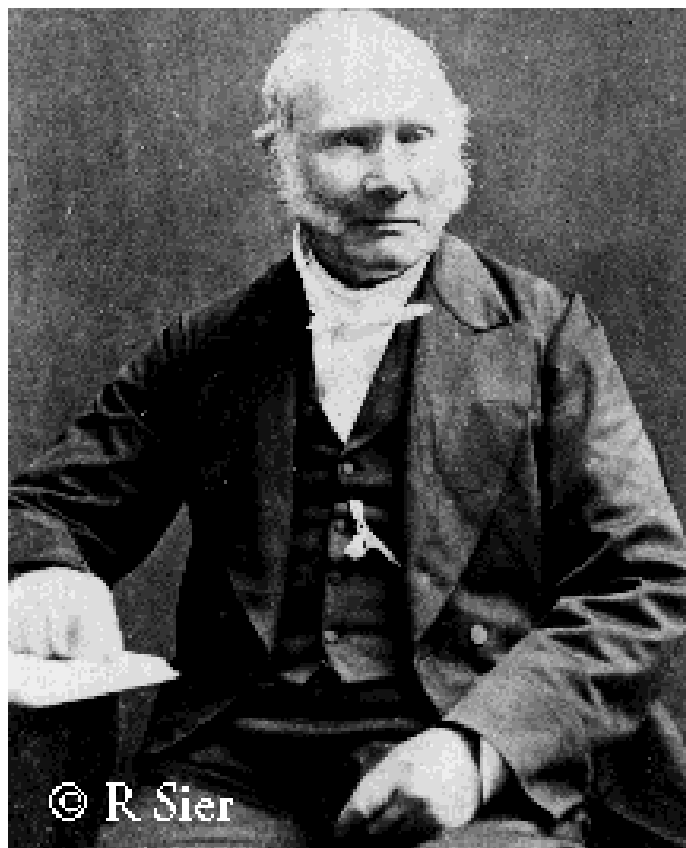
alimentadas através de qualquer fonte de calor. Ainda existem diversas limitações para o desenvolvimento desse tipo de motor, porém se as restrições operacionais forem resolvidas, diferentes opções de projetos viáveis podem ser desenvolvidos (CRUZ, 2012).

1.2 MOTORES STIRLING

1.2.1 Biografia de Robert Stirling

Robert Stirling nasceu em 25 Outubro de 1790 em Glog, no condado de Perthshire, na Escócia, e faleceu a 6 de Junho de 1878 em Galston, cidade localizada a cerca de 30 km ao sul de Glasgow. Foi o terceiro filho de uma família de oito, e um brilhante aluno tanto na escola como na universidade. Estudou na Universidade de Edimburgo de 1805-1808 onde teve latim, grego, lógica, Matemática e Direito. Também estudou Teologia na Universidade de Glasgow. Casou-se em 10 de Julho de 1819, com Jean Rankin. O casal teve sete filhos. Os seus quatro rapazes tornaram-se engenheiros ferroviários (Patrick, William, Robert e James), outro, optou por se tornar um clérigo (David). A Figura 3 é uma foto de Robert Stirling (HIRATA, 1995).

Figura 3: Foto de Robert Stirling.



Fonte: Hirata, 1995.

1.2.2 A História do Motor Stirling

Durante os primeiros dias da Revolução Industrial, os irmãos James e Robert Stirling estavam procurando uma alternativa mais segura para os motores a vapor convencionais da época. Em 1815, eles inventaram o chamado Mecanismo de Stirling e construíram um primeiro protótipo. A patente original n° 4081 de 1816 tinha o obscuro título: *“Improvements for Diminishing the Consumption of Fuel, and in Particular an Engine Capable of Being Applied to the Moving (of) Machinery on a Principle Entirely New – Melhora para Redução do Consumo de Combustível, e em Particular um Motor Capaz de ser Aplicado ao Movimento de Máquina com um Princípio Completamente Novo”*. Nesta patente, Robert Stirling não apenas descrevia a construção e o uso do regenerador pela primeira vez na história, como também prevê as suas principais aplicações, como para fornos de vidros ou para fusão de metais. Também está incluída uma descrição do primeiro motor de ciclo fechado, (BARROS, 2005).

O motor Stirling utilizava ar, ao invés de vapor, como fluido de trabalho. Dessa forma era evitado o risco de explosão dos motores a vapor, muito comum naqueles dias. As caldeiras a vapor explodiam frequentemente fazendo vítimas, devido a problemas de projeto, má qualidade dos materiais, ausência de regras de utilização e manutenção. Foram esses desastres, aliados às descobertas científicas e tecnológicas, que levaram Robert Stirling a imaginar um motor sem caldeira, submetido a fortes pressões. O dispositivo Stirling foi utilizado pela primeira vez em 1818 para bombear água para uma pedreira, além de ser utilizado para retirar água de poços (BARROS, 2005).

Em 1843, as alterações ao desenho feitas por Stirling e pelo seu irmão tinham já permitido um aumento de potência suficiente para mover máquinas numa fundição em Dundee na Escócia, ainda que com muitos problemas técnicos, (HIRATA, 1995).

A Philips “ressuscitou” o desenho no final dos anos 30 e início dos anos 40 com vista à alimentação de rádios de válvula em zonas sem energia elétrica (numa altura em que os motores Stirling tinham praticamente deixado de ser usados) (MARTINI, 1983).

Robert Stirling e o seu motor não tiveram de modo algum a “fama” que mereciam. Nos tempos que correm quase três séculos depois do nascimento Robert Stirling, tendo em conta as preocupações na área da energia e da ecologia em que o mundo se encontra, começam a dar-lhe o mérito que ele tanto merece.

1.3 FUNCIONAMENTO DOS MOTORES STIRLING

O motor Stirling é um motor térmico muito diferente do motor de combustão interna ou de um motor a vapor. Ele tem o potencial de utilizar qualquer fonte de calor como combustível e pode ser mais eficiente do que um motor a gasolina ou motor diesel. Com os limites de nossos recursos energéticos fósseis tornando-se evidentes, os cientistas e engenheiros recordaram o princípio de Stirling para utilizar fontes alternativas de energia. Um motor Stirling é uma máquina térmica que opera por meio da compressão cíclica e da expansão de ar ou de outro gás (o fluido de trabalho) a diferentes temperaturas de modo a que haja uma conversão líquida de calor em trabalho mecânico.

Este tipo de motor é como uma máquina a vapor na qual toda a transferência de calor tem lugar através da parede do mesmo. É por norma entendido como um motor de combustão externa, em contraste com os motores de combustão interna nos quais a entrada de calor é efetuado pela combustão de um determinado combustível dentro do corpo do motor. Ao contrário das máquinas a vapor, que usam água tanto no estado líquido como no gasoso, como fluido de trabalho, os motores Stirling restringem uma quantidade fixa de fluido permanentemente gasoso, como ar atmosférico, azoto, ou hélio. O ciclo geral para estes motores, à semelhança do que sucede em todas as máquinas térmicas, é constituído pela compressão do gás frio, pelo aquecimento do gás, e pelo arrefecimento do gás antes da repetição do ciclo.

Os motores Stirling são divididos em geral em três grupos, Alfa, Beta e Gama, de acordo com a configuração dos cilindros e pistões. O ciclo de Stirling precisa de quatro processos para a geração de potência: compressão a temperatura constante, aquecimento a volume constante, expansão a temperatura constante e rejeição de calor a volume constante. É, portanto, impossível executar o ciclo utilizando-se de apenas um pistão. Conseqüentemente, nos motores Stirling em geral, se tem dois espaços com diferentes temperaturas, sendo que o gás de trabalho flui de um para o outro. O movimento de tal gás é feito pelo deslocador (*displacer*) nos motores Stirling de deslocamento, e por dois pistões (pistão de compressão e de expansão) nos motores Stirling de dois pistões (HIRATA, 1995).

Um permutador de calor opcional para motores Stirling é uma espécie de recuperador, usado quando é requerida uma elevada eficiência na conversão a entrada de calor para a saída de trabalho mecânico.

Nos motores Stirling o regenerador ou permutador de calor, é espaço temporário de armazenamento de calor situado entre os espaços quentes e frios da estrutura que permite que

o fluido de trabalho passe primeiro num sentido (e não no outro). A sua função é reter no interior do sistema o calor que de outra maneira iria ser trocado com o ambiente, permitindo assim uma maior eficiência desse ciclo.

1.3.1 Configurações dos Motores Stirling

Os motores Stirling são classificados pelo tipo funcionamento. Os de deslocamento e os de dois pistões.

Em motores Stirling do tipo deslocamento, o gás de trabalho é movimentado do espaço de alta para o de baixa temperatura pelo deslocador (*displacer*), enquanto o pistão de trabalho faz a compressão e a expansão do gás. Existem dois tipos de motores Stirling de deslocamento, sendo eles: motor Stirling tipo Beta, e motor Stirling tipo Gama (MARTINI, 1983).

1.3.2 Ciclos Teóricos em Motores

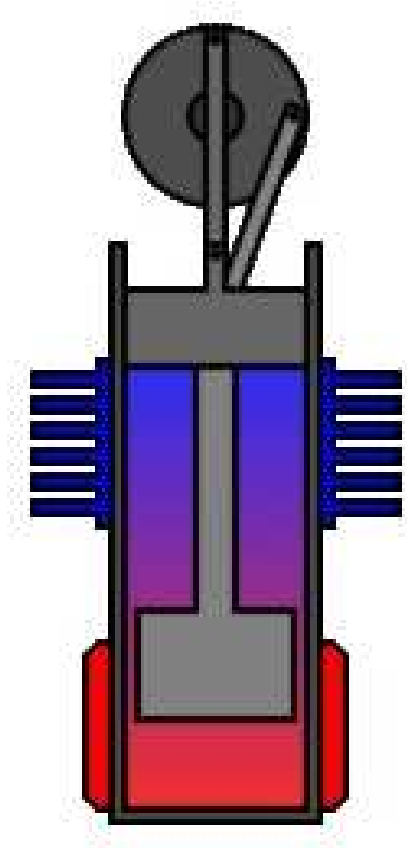
O princípio de funcionamento do Motor Stirling é completamente diferente dos motores de combustão interna comuns. Um motor Stirling sempre contém um gás pressurizado (ar, hélio ou hidrogênio) no seu interior, que é chamado de gás de trabalho. A Potência é gerada não pela queima explosiva de combustível no cilindro, mas pelo aquecimento e resfriamento do gás de trabalho pelo lado externo do cilindro. Esse gás de trabalho é movimentado da parte fria para a parte quente do motor e vice-versa, através de pistões, no caso de motores Stirling Alfa, ou por um pistão de deslocamento (*displacer*), no caso dos motores Stirling do tipo deslocamento – Beta e Gama. Com isso, se obtém acréscimo ou decréscimo da temperatura do gás de trabalho. A mudança na temperatura do gás de trabalho causa uma subsequente mudança na pressão do mesmo, que gera força para movimentar o pistão. A potência de saída do motor é entregue ao eixo do volante.

O princípio de funcionamento do motor Stirling é baseado em um ciclo fechado, onde o gás de trabalho é mantido dentro dos cilindros e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho através de trocadores de calor. Nesta seção serão apresentadas as configurações de motores Stirling bem como seus ciclos termodinâmicos teóricos.

1.3.2.1 Motor Stirling Modelo Beta

Na configuração Beta, mostrada a seguir, o deslocador e o pistão de trabalho estão alinhados em um único cilindro. Pela sobreposição entre cada movimento de ambos os pistões, uma taxa de compressão maior do motor é obtida, e pode-se obter maior potência que o motor Stirling tipo Gama. Entretanto, as hastes do deslocador e do pistão de trabalho estão alinhadas, o que torna o mecanismo complicado (HIRATA, 1995). O motor Beta apresenta a configuração clássica, patenteada em 1816 por Robert Stirling. Um esquema do motor Stirling tipo Beta é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Desenho em corte de motores Stirling de tipo Beta.



Fonte: Hirata, 1995.

O ciclo de trabalho básico do motor Stirling tipo Beta é descrito a seguir, é dividido em quatro partes:

- 1 – 2: O pistão de trabalho é movimentado para a esquerda e o gás é comprimido. O gás é resfriado através do circuito de água de resfriamento, com o objetivo de realizar a compressão a temperatura constante;

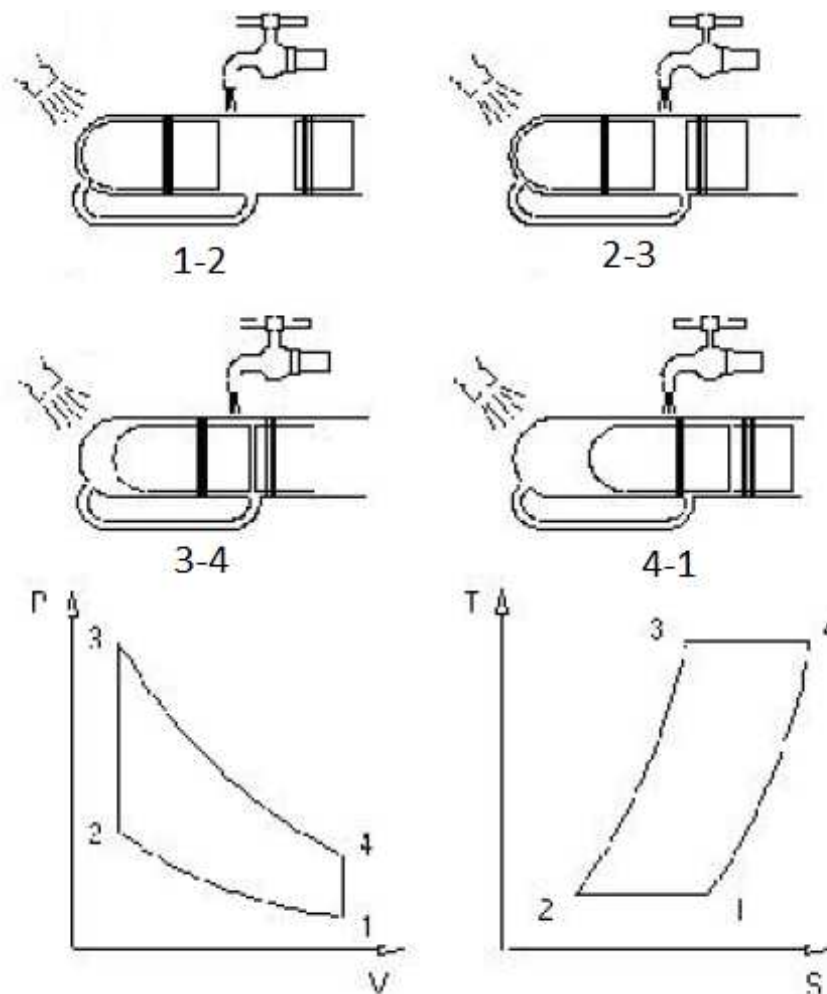
- 2 – 3: O pistão de deslocamento é movimentado para a direita, forçando o gás a passar através do canal de conexão para o volume quente, onde o gás é aquecido por um queimador. Quando o gás é aquecido, sua pressão aumenta. Porém é importante notar que o volume nesse processo é constante;

- 3 – 4: Ambos os pistões movimentam para a direita, devido à expansão do gás. O gás é aquecido pelo exterior por um queimador com o objetivo de se obter uma expansão a temperatura constante;

- 4 – 1: O pistão de deslocamento é movimentado para a esquerda, forçando o gás a passar pelo canal de conexão para o volume frio, onde o gás é resfriado pela água de resfriamento. Quando o gás é resfriado, sua pressão reduz até a pressão inicial. É importante notar que o volume neste processo é constante.

O ciclo termodinâmico também pode ser representado pela Figura 5 a qual mostra cada fase do funcionamento do motor.

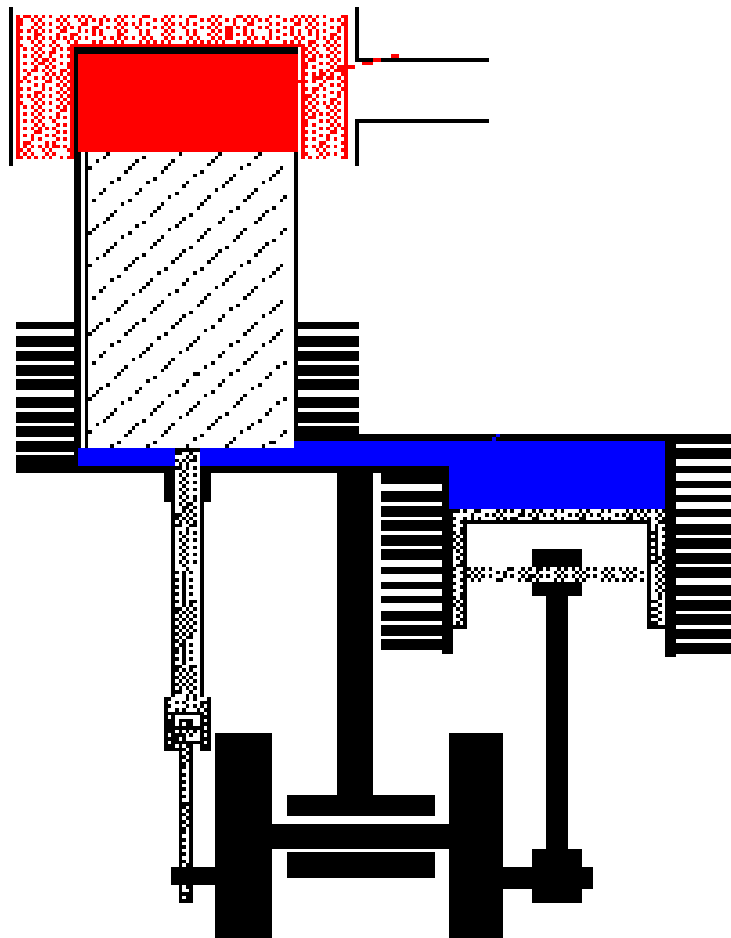
Figura 5: Princípio de trabalho do motor Stirling tipo Beta.



1.3.2.2 Motor Stirling Modelo Gama

O motor Gama tem um deslocador similar ao do motor Beta, porém este é montado em outro cilindro, e é visto na Figura 6. Essa configuração tem o conveniente de separar a parte quente do trocador de calor, que é associada ao pistão de deslocamento, do espaço de compressão, associado ao pistão de trabalho (MELLO, 2001).

Figura 6: Desenho em corte de motores Stirling de tipo gama.



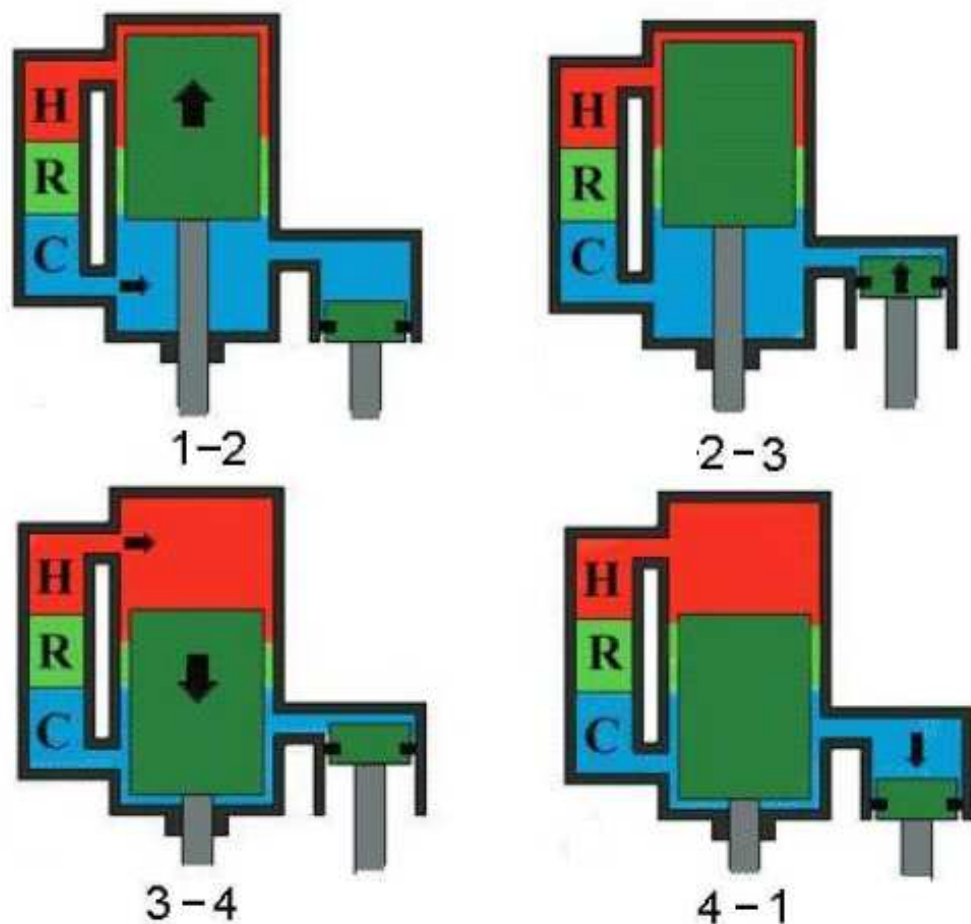
Fonte: Hirata, 1995.

Comparando o motor tipo Gama com o motor tipo Beta, o seu mecanismo é mais simples, e ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor são relativamente fáceis de obter (HIRATA, 1995), apresenta, entretanto, volumes mortos maiores, além do fato de parte do processo de expansão ocorrer no espaço de compressão, causando redução na potência de saída (MELLO, 2001).

O ciclo teórico do motor tipo Gama é descrito a seguir e representado pela Figura 7. Para o motor Stirling tipo Gama, tem-se:

- 1 – 2: Compressão Isotérmica: O pistão de trabalho é movimentado para cima, realizando trabalho de compressão sobre o fluido de trabalho, enquanto rejeita-se calor para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante;
- 2 – 3: Aquecimento a volume constante: O pistão de deslocamento é movimentado para baixo, fazendo com que o fluido de trabalho passe para o espaço de expansão, recebendo calor da fonte externa, e elevando a pressão;
- 3 – 4: Expansão Isotérmica: Com o aumento de pressão do motor, o pistão de trabalho é movimentado para baixo, realizando trabalho. Este processo é realizado a temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;
- 4 – 1: Rejeição de calor a volume constante: O pistão de deslocamento é movimentado para cima, fazendo com que o fluido de trabalho passe para o espaço de compressão, rejeitando calor para o sistema de resfriamento, e reduzindo a sua pressão até a condição 1.

Figura 7: Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Gama.

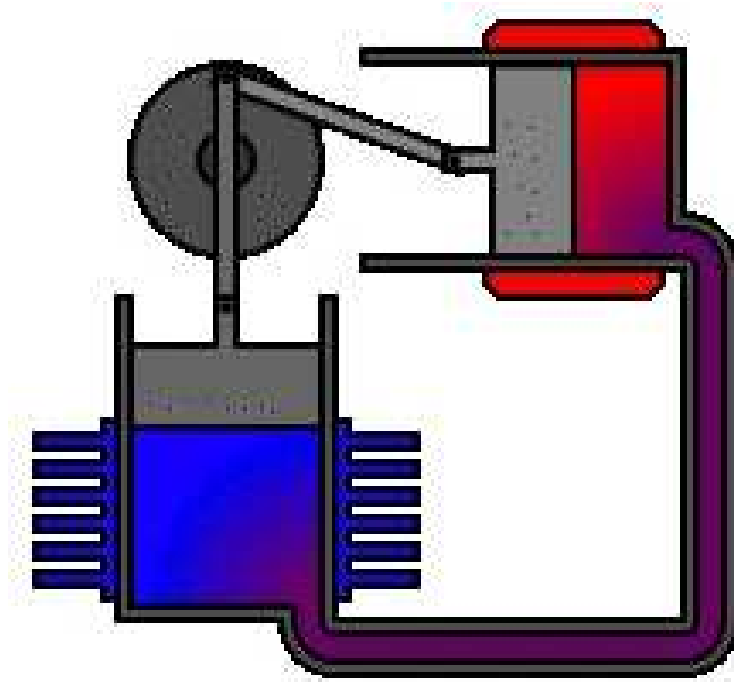


Fonte: Hirata, 1995.

1.3.2.3 Motor Stirling Modelo Alfa

O motor Stirling de dois pistões é um dos três tipos fundamentais de motores Stirling, é chamado de motor Stirling tipo Alfa. Este tipo de motor tem dois pistões, sendo um de compressão e um de expansão, e estes são defasados em 90° . Há um lado quente (espaço de expansão) e um lado frio (espaço de compressão), unidos entre si. Os dois pistões em conjunto comprimem o gás de trabalho no espaço frio, movimentam o gás para o espaço quente onde ele se expande e depois volta para a parte fria (MARTINI, 1983). Na configuração Alfa, Figura 8, o motor tem dois pistões que são conectados em série pelo trocador de calor de aquecimento, o regenerador e o trocador de calor de resfriamento (MELLO, 2001).

Figura 8: Motor tipo alfa.



Fonte: Hirata 1995.

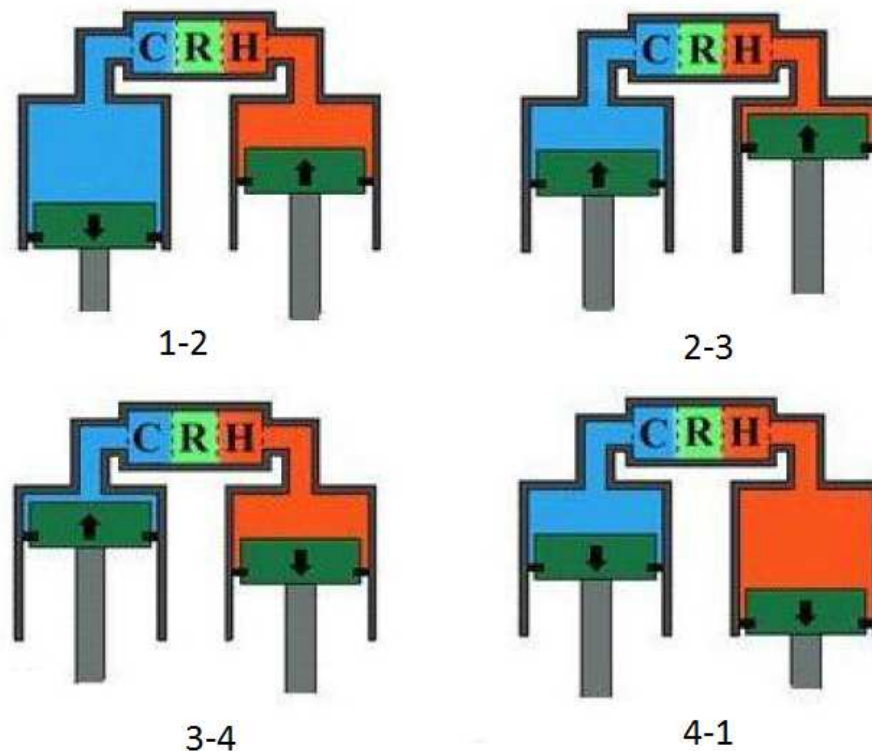
Embora possua a configuração mais simples, o motor Alfa apresenta a desvantagem de ambos os pistões necessitarem de vedação por conter gás de trabalho. Esses motores podem ser construídos em configurações compactas, com múltiplos cilindros e elevadas potências de saída, necessárias nas aplicações automotivas.

O ciclo teórico do motor Alfa é muito semelhante ao do motor Gama, porém, na seqüência do ciclo para o motor Stirling tipo Alfa, é interessante observar a defasagem entre os pistões de compressão e de expansão de 90° . Portanto, tem-se:

- 1 – 2: Compressão Isotérmica: Neste processo, ambos os pistões (compressão e expansão) se movem para cima, realizando trabalho de compressão sobre o fluido de trabalho, enquanto calor é rejeitado para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante;
- 2 – 3: Aquecimento a volume constante: O pistão de compressão vai até o ponto morto superior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para baixo. Com isso o fluido de trabalho passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa aumentando a pressão;
- 3 – 4: Expansão Isotérmica: Neste processo, ambos os pistões (compressão e expansão) se movem para baixo, expandindo o fluido de trabalho e realizando trabalho. Este processo é realizado a temperatura constante, sendo que durante a expansão, o gás de trabalho recebe calor da fonte externa;
- 4 – 1: Rejeição de calor a volume constante: O pistão de compressão se movimenta até o ponto morto inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para cima. Com isso, o fluido de trabalho passa para o espaço de compressão, tendo calor rejeitado pelo sistema de resfriamento, reduzindo a sua pressão até a condição 1.

O ciclo termodinâmico descrito do motor Alfa pode ser visto na Figura 9.

Figura 9- Princípio de Funcionamento do Motor Stirling tipo Alfa.



Fonte: Hirata, 1995.

1.4 TEORIA DE SCHMIDT PARA MOTORES STIRLING

1.4.1 Considerações Gerais

Para a construção de um motor Stirling, existem alguns pontos que devem ser observados como tratado no decorrer deste trabalho, para tanto Gustav Schmidt, em 1871, desenvolveu uma análise teórica dos motores Stirling. A análise desenvolvida serve para realizar-se uma aproximação do desempenho do motor que será desenvolvido ou para analisar um motor já construído. Essa teoria faz algumas simplificações do funcionamento e através dela consegue-se estimar a potência e rendimento do motor.

A teoria de Schmidt baseia-se nos métodos de cálculos isotérmicos, fundamentando-se na expansão e compressão isotérmica de um gás ideal, ou seja, nesse método se mantém constante a temperatura, o que na prática não se verifica com tanta perfeição.

O desempenho de um motor Stirling é estimado utilizando um diagrama P-V. O volume do motor é calculado a partir da geometria do motor em análise. Essa estimativa é feita pelo equacionamento e método do gás ideal, e que é apresentado pela equação (1).

$$PV = mRT \quad (1).$$

Onde:

P= pressão - Pa

V=volume – m³

m= massa – kg

R= constante universal dos gases – J/kg. K

T= temperatura – K

Para a realização da análise devem ser feitas algumas considerações prévias, as quais são apresentadas por Sulzbach, 2010.

- a) Durante as trocas de calor não há perdas, também não há diferença interna de pressão;
- b) Os processos de expansão e compressão são isotérmicos;
- c) O gás de trabalho é considerado ideal;
- d) Não há perdas no regenerador quando esse existir;
- e) O volume morto de expansão mantém a temperatura do gás na expansão – T_E, e o volume morto de compressão mantém a temperatura do gás na compressão;

- f) A temperatura do gás no regenerador é uma média da temperatura do gás na expansão – T_e e na compressão – T_c ;
- g) O volume de expansão – V_E e o volume de compressão – V_C , variam na forma senoidal.

A Tabela 1 mostra todas as variáveis que fazem parte da teoria de Schmidt, e também suas unidades de medidas respectivamente.

Tabela 1-Variáveis da Teoria de Schmidt; Fonte: HIRATA, 1995.

Pressão do motor	P	Pa
Volume percorrido pelo pistão de expansão ou de deslocamento.	V_{SE}	m^3
Volume percorrido pelo pistão de compressão ou de potência.	V_{SC}	m^3
Volume morto do espaço de expansão	V_{DE}	m^3
Volume do regenerador	V_R	m^3
Volume morto do espaço de compressão	V_{DC}	m^3
Volume momentâneo do espaço de expansão	V_E	m^3
Volume momentâneo do espaço de compressão	V_C	m^3
Volume total momentâneo	V	m^3
Massa total do gás de trabalho	M	kg
Constante de gás	R	J/kgK
Temperatura do gás no espaço de expansão	T_E	K
Temperatura do gás no espaço de compressão	T_C	K
Temperatura do gás no Regenerador	T_R	K
Ângulo de fase	D_X	°
Temperatura relativa	$T=T_C/T_E$	-
Volume percorrido relativo	$V=V_{SC}/V_{SE}$	-
Volume morto relativo.	$X=V_D/V_{SE}$	-
Rotação do motor	N	Hz
Energia indicada de expansão	E_E	J
Energia indicada de compressão	E_C	J
Energia indicada	E_I	J
Potência indicada de expansão	P_E	W
Potência indicada de compressão	P_C	W

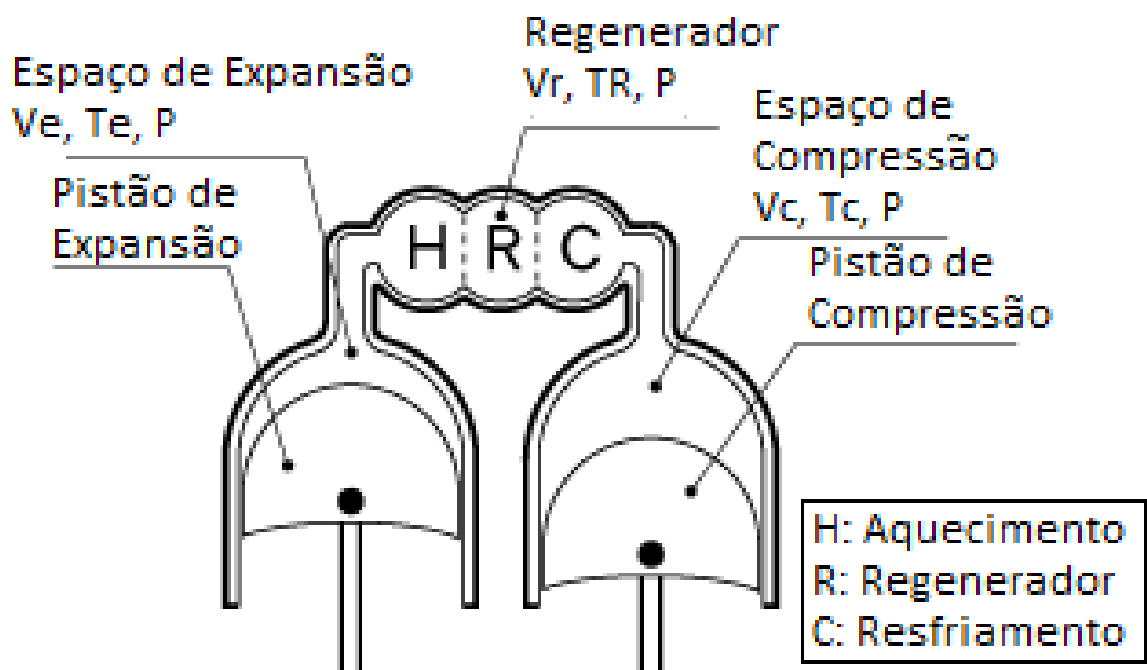
Potência indicada	P_1	W
Eficiência indicada	H	-

A literatura consultada apresenta o equacionamento para ambos os três tipos tradicionais de motores Stirling, porém, será apresentado a seguir uma aplicação dos cálculos, ao motor que foi construído, tipo Alfa, o qual é descrito logo após esse capítulo.

1.4.2 Motor Stirling Modelo Alfa

A teoria de Schmidt tem a finalidade de comparar a teoria com o funcionamento real dos motores. A Figura 10 apresenta um desenho esquemático de um motor Stirling tipo Alfa, contendo as principais variáveis do modelo de cálculo.

Figura 10: Esquema de um motor Stirling tipo Alfa.



Fonte: Hirata, 1995.

Primeiramente, determinam-se os volumes de expansão e de compressão para um determinado ângulo de rotação do eixo do motor. O volume instantâneo é descrito por um ângulo do eixo – x . Este ângulo do eixo é definido como $x = 0$ quando o pistão de expansão está localizado na posição superior (ponto morto superior). O volume de expansão instantâneo

- V_E é descrito pela equação (2) em função do volume percorrido pelo pistão de expansão - V_{SE} , um volume morto de expansão - V_{DE} abaixo das condições assumidas (g).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos X) + V_{DE} \quad (2).$$

O volume de compressão instantâneo - V_C é calculado pela equação (3) em função do volume percorrido pelo pistão de compressão - V_{SC} , o volume morto de compressão - V_{DC} e um ângulo de fase - dx .

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2}[1 - \cos(x - dx)] + V_{DC} \quad (3).$$

O volume total instantâneo é calculado pela equação (4).

$$V = V_{E+} + V_R + V_C \quad (4).$$

Pelas suposições (a), (b) e (c), a massa total no motor - m é calculada usando a pressão do motor - P , cada temperatura - T , cada volume - V e a constante do gás - R .

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad (5).$$

A Temperatura relativa - t , o volume percorrido relativo - v e os volumes mortos relativos são encontradas usando as seguintes equações:

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (6).$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (7).$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (8).$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (9).$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (10).$$

A temperatura do regenerador - T_R é calculada pela equação (11), pelo uso da suposição (f).

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (11).$$

Quando a equação (5) é modificada, usando as equações (6) e (11), a massa total de gases - m é descrita pela equação (12).

$$m = \frac{P}{R_x T_C} \left(tx V_E + \frac{2xtx V_R}{1+t} + V_C \right) \quad (12).$$

A equação (12) é transformada na equação (13), usando as equações (2) e (3).

$$m = \frac{P V_{SE}}{2 R T_C} [S - B \cos(x - a)] \quad (13).$$

Agora;

$$a = \operatorname{tg}^{-1} \frac{v \cdot \operatorname{send} x}{t + \operatorname{cos} dx} \quad (14).$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (15).$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \operatorname{cos} dx + v^2} \quad (16).$$

A pressão do motor - P é definida pela equação (17) usando a equação (13).

$$P = \frac{2mRT_C}{V_{SE} [S - B \cos(x - a)]} \quad (17).$$

A pressão média - P_{med} pode ser calculada como se segue:

$$P_{med} = \frac{1}{2\pi} \oint P dx = \frac{2mRT_C}{V_{SE} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (18).$$

Sendo c definido pela equação 19:

$$c = \frac{B}{S} \quad (19).$$

Como resultado, a pressão do motor - P , baseada na pressão média do motor - P_{med} é calculada pela equação (20).

$$P = \frac{P_{med} \sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{med} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (20).$$

Em outro caso, quando $\cos(x - a) = -1$, a pressão do motor - P torna-se a pressão mínima - P_{min} , a próxima equação é introduzida.

$$P_{min} = \frac{2mRT_C}{V_{SE} (S + B)} \quad (21).$$

Conseqüentemente, a pressão do motor - P , baseada na pressão mínima - P_{min} é descrita pela equação (22).

$$P = \frac{P_{min} (S + B)}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (22).$$

Similarmente, quando $\cos(x-a)=1$, a pressão do motor - P torna-se a máxima pressão - P_{\max} . A equação (23) é introduzida.

$$P = \frac{P_{\max}(S-B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{\max}(1-c)}{1-c\cos(x-a)} \quad (23).$$

A energia indicada para a expansão e para a compressão, pode ser calculada como uma solução analítica fazendo uso dos coeficientes encontrados acima. A energia indicada na expansão - $E_E(J)$, baseada na pressão media - P_{med} , na pressão mínima - P_{\min} e na pressão máxima - P_{\max} , é descrita pela equação (24).

$$E_E = \oint PdV_E = \frac{P_{\text{med}}V_{SE}\pi.c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{\min}V_{SE}\pi.c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = \frac{P_{\max}V_{SE}\pi.c.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (24).$$

A energia indicada de compressão - $E_C(J)$ é descrita pela equação (25).

$$E_C = \oint PdV_C = \frac{P_{\text{med}}V_{SE}\pi.ct.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{\min}V_{SE}\pi.ct.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = \frac{P_{\max}V_{SE}\pi.ct.sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (25).$$

A energia indicada em um ciclo do motor - $E_I(J)$ é apresentada na equação (26).

$$E_I = E_E + E_C = \frac{P_{\text{med}}V_{SE}\pi.c(1-t)sena}{1+\sqrt{1-c^2}} = \frac{P_{\min}V_{SE}\pi.c(1-t)sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1+c}}{\sqrt{1-c}} = \frac{P_{\max}V_{SE}\pi.c(1-t)sena}{1+\sqrt{1-c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1-c}}{\sqrt{1+c}} \quad (26).$$

A potência indicada de expansão - $P_E(W)$, a potência indicada de compressão - $P_C(W)$ e a potência indicada do motor - $P_I(W)$ estão definidas nas equações seguintes, utilizando a rotação do motor, $n(\text{rps, Hz})$.

$$P_E = E_E \cdot n \quad (27).$$

$$P_C = E_C \cdot n \quad (28).$$

$$P_I = E_I \cdot n \quad (29).$$

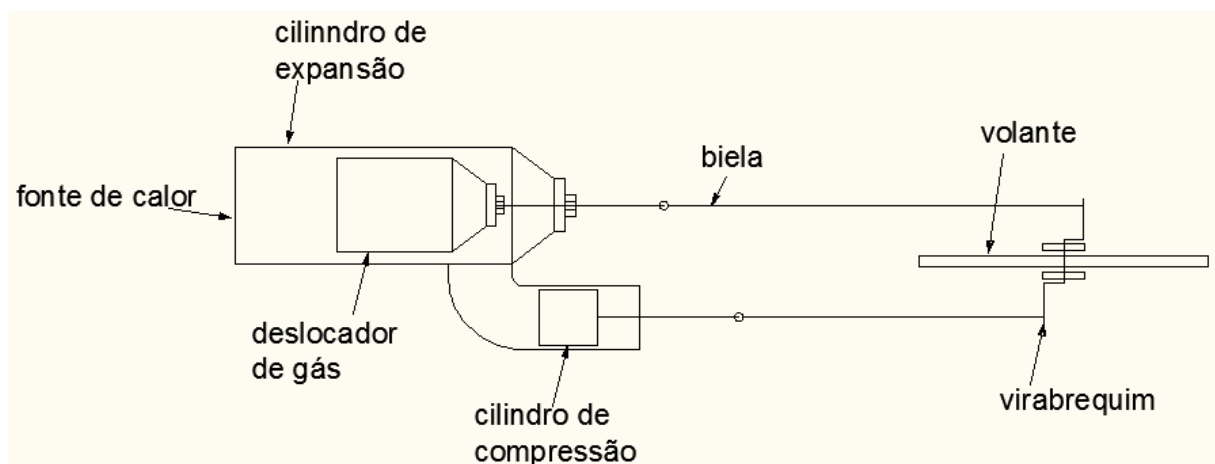
A energia indicada de expansão - E_E descrita pela equação (24) significa o calor de entrada através da fonte de calor para o motor. A energia indicada de compressão - E_c descrita pela equação (25) significa a rejeição de calor do motor para o fluido de resfriamento (água ou ar). Então, a eficiência térmica do motor - η_t é calculada na próxima equação.

$$n_T = \frac{E_I}{E_E} = 1 - t \quad (30).$$

2 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DE UM PROTÓTIPO DE MOTOR STIRLING

Após a busca por materiais didáticos, que são escassos, e muitos deles representarem a construção de protótipo sem êxito, onde o motor não atingiu um regime de funcionamento aceitável, passou-se então à construção de um protótipo experimental. Para tal ocasião foi escolhido o motor Stirling modelo Alfa, o qual tem sua construção simplificada, pois é acionado por dois pistões, facilitando dessa maneira a sua fabricação, haja vista que seria uma maquete com a finalidade de levantar os parâmetros iniciais, testes, para a partir desse ponto tirar conclusões para o novo projeto. Sulzbach (2010) havia construído um protótipo de motor Stirling, e conclui que a principal causa do não funcionamento era a questão dos vazamentos entre pistão e a haste. Tendo em vista as conclusões obtidas, desenhou-se um croqui de um possível motor a ser construído, como é mostrado pela Figura 11.

Figura 11: Croqui do motor Stirling a ser construído.



Fonte: O autor.

A literatura pesquisada mostra que um problema difícil de ser solucionado nos motores Stirling é a vedação no cilindro de compressão, e na haste do cilindro de expansão, pois se trata de uma vedação longitudinal, uma vez que o atrito também deve ser baixo, para que possa haver movimento do mesmo.

Como a construção da maquete devia ter um custo baixo, optou-se pela construção de um protótipo feito com materiais reutilizáveis como latas, borracha, madeira, aço, entre outros disponíveis. Após busca na Internet e visualização de alguns vídeos tratando sobre a construção prática de motores Stirling e, tendo em mente alguns materiais que estavam ao dispor para a construção, partiu-se a construção das partes que integrariam o mesmo. O principal ponto observado foi a questão da vedação, pois é trazido uma solução prática para a

construção do cilindro de pressão, que ao invés de ser construído por uma camisa e pistão foi construído com uma membrana, nesse caso era utilizado um balão.

2.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para demonstrar a construção do protótipo será apresentado cada parte em separado, e após isso o conjunto montado e testes do protótipo.

2.1.1 Cilindro de Expansão

Para a construção do cilindro de expansão utilizou-se uma lata de spray aerossol, com 57 mm de diâmetro e altura de 230 mm. A lata foi cortada ao meio, e da metade superior retirado 100 mm, para que dessa forma pudesse ser confeccionada a câmara de expansão com 130 mm de comprimento a qual foi fechada à parte inferior com a parte superior utilizando-se de massa epóxi. Antes do fechamento da câmara foi montado o pistão deslocador de gás. Para isso foi utilizado uma lata de 50 mm de diâmetro por 65 mm de altura, trata-se de uma lata de fermento químico. O cuidado aqui estava em conseguir ambas as latas com uma pequena diferença de diâmetro, pois durante o funcionamento do motor o ar deve passar na folga entre o pistão e a câmara de expansão, para assim fazer a troca de calor. Se esta folga for muito pequena isso resulta em perda pelo deslocamento do ar com dificuldade no interior da câmara, se houver muita folga uma quantidade maior de ar não vai migrar entre as regiões internas do motor, isso também acarreta em perdas. A Figura 12 mostra a solução encontrada para a construção do cilindro de expansão.

Figura 12: Cilindro de expansão.



Fonte: O autor.

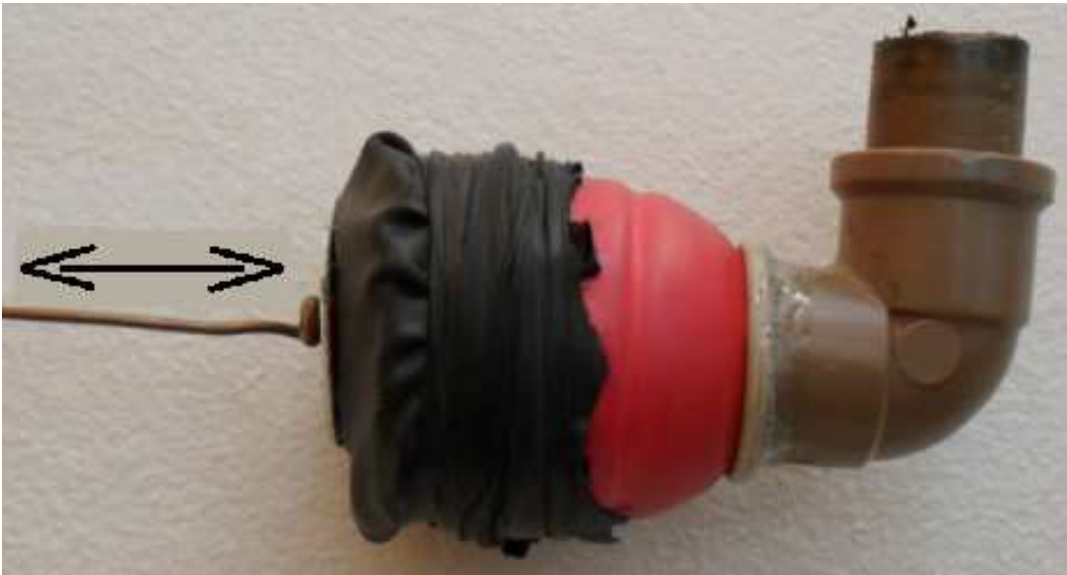
Durante a montagem e confecção das peças a maior dificuldade que se apresentou, foi quanto na vedação da haste. Para isto foi utilizado um bico de alimentação de arame de solda, ele tem um furo de 1 mm de diâmetro por meio do qual foi introduzido o arame que serviria de biela para o deslocador de gases.

Após a construção da câmara de expansão já demonstrada anteriormente, partiu-se a um breve teste, o qual se constituiu em colocar uma seringa cortada, presa a ponta da curva. Para esse teste foi utilizada uma seringa empregada na vacinação animal de 30 ml, colada com massa epóxi na peça de PVC, fazendo assim a completa vedação do conjunto. O próximo passo foi aquecer o cilindro para ter o aquecimento do ar interno, para dessa forma medir-se um deslocamento de água dentro da seringa. Observou-se o deslocamento de uma quantidade de 22 ml, aproximadamente. Essa medição foi realizada fazendo o movimento do deslocador, o qual possui uma variação na posição na ordem de 36 mm, tendo assim um volume deslocado de 91,8 ml. Este experimento teve por função levantar dados para o desenvolvimento da maquete, mais precisamente do virabrequim e do cilindro de compressão. Esse dado incide diretamente sobre o volume do cilindro de trabalho (compressão), o qual foi dimensionado posteriormente, levando em conta o volume percorrido pelo pistão (V_{SC}).

2.1.2 Cilindro de Compressão

O cilindro de compressão seguiu a forma construtiva descrita em vídeos assistidos na Internet, os quais se utilizavam de uma membrana feita de material elástico (borracha), para fazer o papel do cilindro de compressão. Para essa peça foi utilizado um balão surpresa, utilizado em festas infantis, o qual foi recortado e amarrado sobre a boca de um tubo de alumínio. Foi escolhido esse balão por apresentar uma excelente flexibilidade, garantindo assim o movimento da haste devido a baixa restrição causada pelo mesmo. Ao seu centro foi presa a haste que faria o movimento do volante do motor. Para fixar o balão sobre o tubo, observou-se que o mesmo deveria apresentar um movimento de tal forma a permitir o avanço e recuo, de acordo com a quantidade deslocada no teste realizado. Dessa forma observou-se que o diâmetro deveria ser de aproximadamente 30 mm, como havia disponível uma lata de alumínio com 40 mm de diâmetro utilizou-se esta, e foi trabalhado no curso do conjunto. Na extremidade da lata foi feito um alargamento da boca onde seria preso a membrana. A Figura 13 mostra o conjunto do cilindro de compressão montado. Pode-se observar a seta que indica o sentido do movimento da haste, o qual tem um deslocamento total de 20 mm.

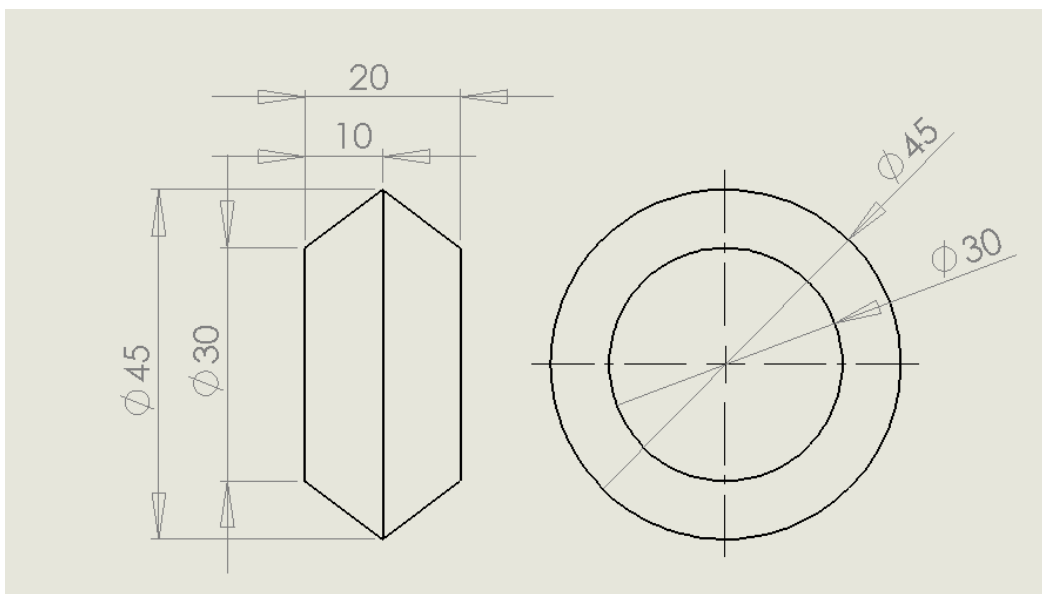
Figura 13- Cilindro de compressão.



Fonte: O autor.

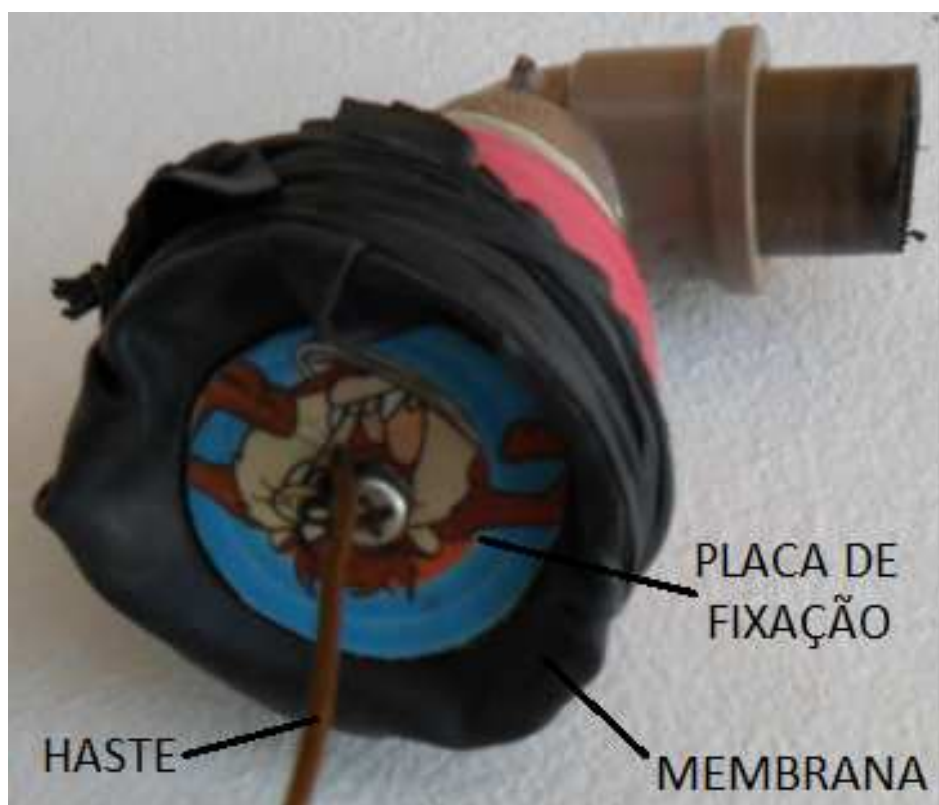
O volume percorrido pelo cilindro que fará o movimento do volante do motor é mostrado pela Figura 14. O volume deslocado durante o funcionamento é de 22 ml aproximadamente, dado esse retirado do ensaio realizado com a aplicação de uma seringa descartável e descrito anteriormente. O curso do cilindro é descrito pela cota 20 mm, dado esse que deverá ser observado posteriormente na construção do virabrequim. A cota de 45 mm equivale ao diâmetro do cilindro onde a membrana foi presa, e a cota 30 mm o diâmetro da placa de fixação entre a membrana e a haste que são mostrados na Figura 15.

Figura 14: Volume varido pelo pistão de compressão.



Fonte: O autor.

Figura 15: Disposição da membrana no pistão de compressão.



Fonte: O autor.

2.1.3 Virabrequim e Volante

Para construção do virabrequim foi utilizado um arame de cobre de 1,5 mm de diâmetro, o qual foi dobrado de forma a ficar defasado 90°. Foi escolhido um material de fácil conformação, tendo como referência um possível ajuste dimensional caso fosse necessário.

Sobre o virabrequim foi montado o volante, que desempenha o papel de manter o movimento rotacional constante. A construção do volante foi feita se utilizando de quatro CDs, os quais foram prensados sob uma bucha de borracha. Esse conjunto posteriormente montado a dois mancais. Os mancais que receberiam o virabrequim foram feitos de chapa de aço com 1,55 mm de espessura. Os mesmos receberam os furos para fixação à base e os furos para assentar o virabrequim. A furação que receberia o virabrequim foi feita utilizando uma broca de 2 mm de diâmetro, garantindo assim ao sistema deslizar suavemente, sem apresentar folga excessiva. Para melhorar o funcionamento e reduzir o atrito no conjunto, foi feito o emprego de grafite em pó, o qual serve como lubrificante e reduz significativamente o atrito entre as peças em contato. Essa lubrificação foi realizada após a montagem do conjunto. O conjunto do virabrequim e volante pode ser visto na Figura 16, onde já estão montados sobre o conjunto de mancais, acoplados sobre a base.

Figura 16: Montagem do volante e virabrequim.



Fonte: O autor.

2.1.4 Montagem do Motor

Durante a confecção das peças principais, foi também desenvolvida uma base onde seriam fixadas as peças. Esse processo de construção foi iterativo haja vista que não havia um projeto propriamente dito, com dimensões determinadas e conjuntos previamente planejados.

O primeiro passo foi fixar o conjunto do volante sobre a base, posteriormente foi posicionado o conjunto de pistões para perceber a que distância os conjuntos deveriam ficar um do outro para um funcionamento aceitável, após alguns testes verificou-se uma distância ótima entre 200 e 300 mm, para tanto se optou por montar a 250 mm, assumindo assim uma posição intermediária. O conjunto foi pré-fixado, após esse processo partiu-se à confecção das pontas das hastes, acertando assim o comprimento de cada uma, esse detalhe é mostrado pela Figura 17.

Figura 17: Detalhe da haste.



Fonte: O auto.

Como pode ser visto anteriormente o arame que foi utilizado como haste para transmitir os esforços, teve sua ponta enrolada, de forma a formar uma espécie de mancal, o qual seria fixado posteriormente sobre o eixo do virabrequim. Seguindo-se o processo de ajuste do conjunto, foi feita uma simulação do giro do motor manualmente, sendo que durante esse processo o pistão deslocador de gás atingiu o fim de curso antes de completar a revolução, assim, fez-se necessário ajustá-lo novamente, até seu funcionamento, para tanto foi afastado o conjunto do cilindro de expansão da posição em que estava em relação ao suporte do virabrequim até que permitiu o giro do volante. A montagem do conjunto é mostrada pela figura 18, a qual mostra a maquete de motor Stirling já pronta para testes.

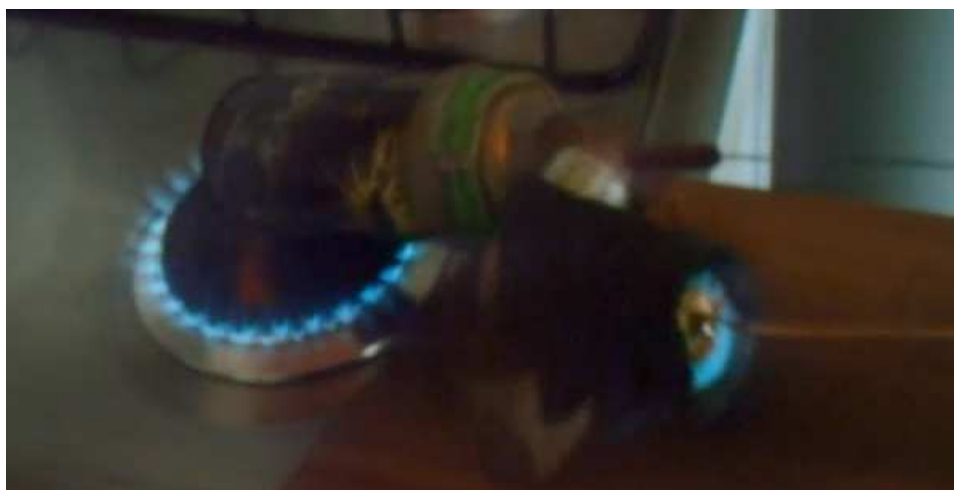
Figura 18: Maquete de motor Stirling pronta para testes.



Fonte: O autor.

Quando enfim a montagem estava completa partiu-se aos testes. Para isso foi colocado sobre a chama de um fogão a gás, para dessa forma alimentar o sistema com uma fonte de calor e ver se entraria em um regime de funcionamento. Esse primeiro teste é mostrado a seguir na Figura 19. Após algumas tentativas de colocar o sistema em funcionamento, percebeu-se que o mesmo estava na eminência do funcionamento, porém o ângulo de defasagem do virabrequim não estava permitindo o seu funcionamento. A literatura consultada relata um ângulo de 90° de defasagem, para tentar melhorar o funcionamento haja vista que o motor trancava após um giro de aproximadamente 320° .

Figura 19: Primeiro teste da maquete.



Fonte: O autor.

Para simular novamente mudou-se o ângulo do virabrequim para $\pm 60^\circ$. Após esse ajuste no mecanismo, o mesmo foi lubrificado com grafite em pó para reduzir o atrito de todo o sistema. A partir daí, refez-se os testes do funcionamento, buscando o ajuste do virabrequim da melhor maneira possível. Esse ponto de ajuste foi alcançado aproximadamente quando o virabrequim estava com um ângulo de 45° . Também foi retirada a boca do fogão a gás para permitir uma chama localizada ao redor do cilindro de expansão aquecendo a uma temperatura maior o cilindro. Nessa configuração foi posto novamente em teste e mediu-se a rotação do sistema. Para a medição foi marcado um tempo de 10 segundos, e durante esse tempo contado o número de voltas do volante. De posse dos dados calculou-se a rotação, sendo encontrados 210 RPM. A Figura 20 mostra o motor Stirling sendo testado, e em funcionamento.

Figura 20: Segundo teste da maquete.



Fonte: O autor.

2.2 SÍNTESE DOS ENSAIOS REALIZADOS

A construção de motores Stirling data de 1816, porém muitos estudos estão sendo movidos em prol do funcionamento do sistema e melhorias. Algumas conclusões podem ser tiradas dos ensaios realizados. Cada motor Stirling deve ser projetado para uma dada temperatura de funcionamento. Esse motor apresenta algumas particularidades bem específicas, dentre elas é notável a variação volumétrica do sistema, essa variação irá propiciar um aumento de pressão o qual impulsionará o pistão à frente, porém se não for feita uma análise da expansão volumétrica, a qual foi realizada e demonstrada anteriormente na seção 2.1.1, não se pode saber o curso que o pistão irá desenvolver, pois o curso está diretamente ligado a expansão do gás na câmara de expansão, e da temperatura da mesma. A expansão do gás de trabalho está diretamente relacionada a temperatura a que a câmara de expansão será submetida.

Outra dificuldade encontrada para fazer com que o sistema entre num regime estável de funcionamento é quanto ao ângulo de defasagem do virabrequim. O ângulo de defasagem está diretamente ligado com a rapidez da troca calorífica do sistema, porém, muitas são as variáveis ligadas a este sistema. O ângulo do virabrequim construído para a maquete teve o papel de efetuar a regulagem desse ângulo, ele permitiu que fosse variado o ângulo para serem realizados os testes e por em funcionamento.

Para aprimorar a análise fez-se a aplicação da teoria de Schmidt, descrita na seção 1.4.2, e baseada na seção 1.4.1 as quais tratam dos motores Stirling tipo Alfa. Para tanto se aplicou as equações ao motor construído para, a partir da teoria, poder se comparar com as conclusões práticas. Os dados dessa análise são apresentados a seguir pela tabela 2.

Tabela 2- Variáveis aplicadas ao protótipo; Fonte: Autor.

Ângulo de giro	α	°	0
Pressão do motor	P	Pa	137200
Volume percorrido pelo pistão de expansão.	V_{SE}	m ³	0,0000919
Volume percorrido pelo pistão de compressão.	V_{SC}	m ³	0,0000220
Volume morto do espaço de expansão	V_{DE}	m ³	0,0000414
Volume do regenerador	V_R	m ³	0,0000000
Volume morto do espaço de compressão	V_{DC}	m ³	0,0000414
Volume momentâneo do espaço de expansão	V_E	m ³	0,0000414
Volume momentâneo do espaço de compressão	V_C	m ³	0,0000524
Volume total momentâneo	V	m ³	0,0000937

Massa total do gás de trabalho	M	kg	0,0001120
Constante de gás	R	J/kgK	286,9
Temperatura do gás no espaço de expansão	T_E	K	573
Temperatura do gás no espaço de compressão	T_C	K	323
Temperatura do gás no Regenerador	T_R	K	448
Ângulo de fase	D_X	°	90
Temperatura relativa	$t=T_C/T_E$	-	0,563
Volume percorrido relativo	$v=V_{SC}/V_{SE}$	-	0,239
Volume morto relativo.	$X=V_{DE}/V_{SE}$	-	0,450
Rotação do motor	N	Hz	3,500
Energia indicada de expansão	E_E	J	1,695
Energia indicada de compressão	E_C	J	-1,012
Energia indicada	E_I	J	0,739
Potência indicada de expansão	P_E	W	5,934
Potência indicada de compressão	P_C	W	-3,545
Potência indicada	P_I	W	2,589
Eficiência indicada	H		0,436
Variável S	S		2,211
Variável B	B		0,612
Variável a	a		23,018
Variável c	c		0,276
Pressão mínima	P_{min}	Pa	80055,278
Pressão média	P_{med}	Pa	106388,772

Como vários dados dessa tabela são incógnitas, Sulzbach 2010 trata de valores práticos de temperatura e pressão que são encontrados em motores desse tipo, esses dados são descritos pela Tabela 3, de onde foram retirados os dados de P, R, T_E , T_C .

Tabela 3- Dados de entrada utilizados na Teoria de Schmidt; Fonte: Sulzbach, 2010.

NOME	SIMBOLO	VALOR	UNIDADE
Pressão do motor	P	0,137	MPA
Constante do gás	R	286,9	J/kg.K
Temperatura do gás no espaço de expansão	T_E	573	K
Temperatura do gás no espaço de compressão	T_C	323	K
Ângulo de fase	D_X	90	°
Rotação do motor	N	30	Hz

Após a montagem das tabelas acima relacionadas foi mudado o ângulo do virabrequim na tabela de cálculo e observou-se que o rendimento do sistema não mudou, porém a potência indicada varia de acordo com o ângulo do virabrequim, e atinge valor máximo quando o ângulo se aproxima de 90° . Com esse dado partiu-se novamente aos ensaios práticos, aumentando gradativamente o ângulo do virabrequim até 90° novamente, e o protótipo parou de funcionar, no entanto notou-se um aumento no torque quando se aproximou do ângulo de 90° , porém o movimento não mantinha mais rotação constante, até que cessou o funcionamento.

Outro ponto que foi atacado é quanto aos volumes mortos. Quando reduz o volume morto do espaço de compressão a potência aumenta na ordem de 30%, quando zerado o V_{DC} (Volume morto de compressão).

Analisando os dados da tabela, pode ser notado que a potência indicada P_1 para o motor, calculada a partir dos dados da tabela, foi muito reduzida ficando 2,589 W, o que confirma os ditos encontrados em várias bibliografias de que a potência desses motores é bastante reduzida, mas que sua eficiência era superior a dos ciclos diesel.

3 PROJETO DE UM MOTOR STIRLING MODELO DIDÁTICO

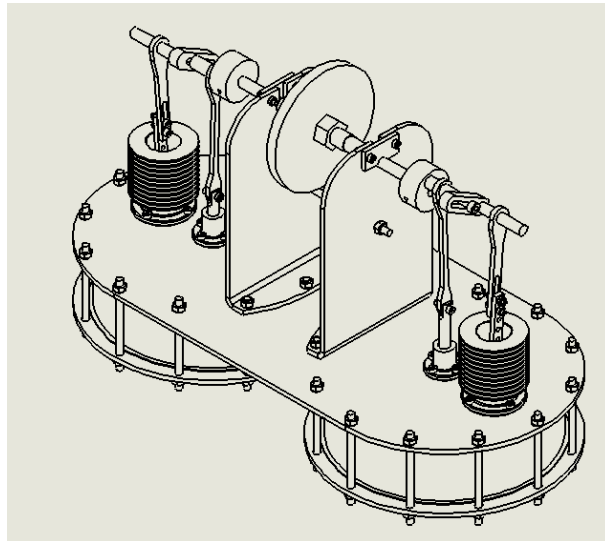
O principal desafio desse trabalho foi construir uma maquete que servisse de protótipo, e de fonte de inspiração para um novo projeto. A primeira fase de confecção do protótipo e entendimento do ciclo já foi apresentada anteriormente. Este capítulo apresenta o projeto de um motor Stirling modelo Alfa.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Para essa nova fase de trabalho optou-se por um motor Stirling modelo Alfa, o mesmo modelo que foi construída a maquete. Para melhorar o funcionamento desse motor, levou-se em conta as conclusões tiradas na secção 2.2. Assim buscou-se o projeto de um motor com reduzido volume morto no espaço de compressão, pois isso reduz significativamente a potência final do motor. Outro ponto considerado é quanto a aplicabilidade desse motor, sendo que o mesmo deverá trabalhar com energia solar. Trata-se de um motor Stirling de baixas temperaturas, esse motor se caracteriza por ter um espaço de expansão várias vezes maior que o espaço de compressão, isso se da devido a relação $PV=mRT$.

O projeto do novo motor é idealizado sob o ponto de vista da geração de energia, a partir da energia proveniente do sol, porém essa situação torna, como citado no parágrafo anterior, numa baixa variação de temperatura. Para tanto, pensou-se em uma câmara de expansão de tamanho relativamente maior que os projetos geralmente desenvolvidos com fins pedagógicos. Assim, aplicando a relação $T_C/v_1 = T_E/v_2$, isolando $T_C/T_E = v_1/v_2$ consegue-se estimar uma relação de volumes antes e depois do aquecimento, e fazendo a diferença desses dois volumes pode-se estimar o volume da câmara de compressão, ou seja o pistão de trabalho. Para isto se partiu do princípio de que o motor deveria trabalhar com uma diferença de temperatura entre T_E e T_C de 10° . Dessa forma foi estimado o diâmetro e curso do pistão de trabalho. O motor projetado pode ser visto de forma geral pela Figura 21, e fornece a ideia geral da forma construtiva do motor. O mesmo foi pensado de forma a ter uma fácil fabricação e com materiais de fácil aquisição. O fato de se aproveitar melhor o movimento de subida e de descida dos pistões levou a se criar um motor com dois cilindros de expansão e dois de compressão, sendo que os dois ficam com seu movimento defasado em 180° , melhorando assim o ciclo do motor.

Figura 21: Projeto de motor Stirling.

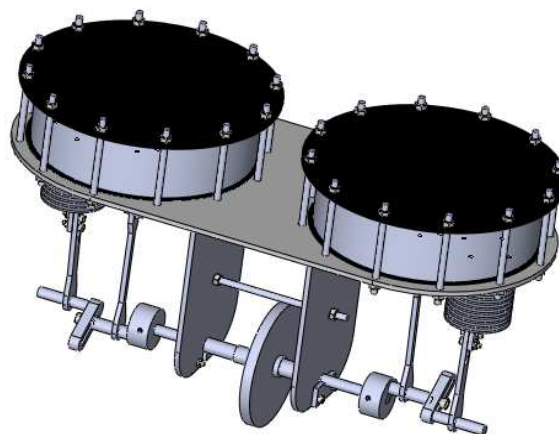


Fonte: O autor.

Com essa forma construtiva aplicando os dados de projeto à metodologia de cálculo apresentada na seção 1.4.1 e 1.4.2, esse motor deve apresentar uma potência de aproximadamente 20 W com uma diferença de temperatura de 10°.

Esse motor deverá trabalhar em posição invertida para ter dessa forma a base inferior que é de cor negra voltada para cima, de forma a captar que os raios solares incidam sobre a superfície escura aquecendo assim a câmara. Essa montagem é mostrada pela figura 22 a seguir, podendo ainda o mesmo receber um concentrador parabólico o qual aumentaria a potência final desse motor, uma vez que a diferença de temperatura irá aumentar. Também pode-se criar um dispositivo que tenha o movimento direcionando a superfície sempre perpendicular ao raio solar aumentando o aquecimento.

Figura 22: Posicionamento do motor Stirling.

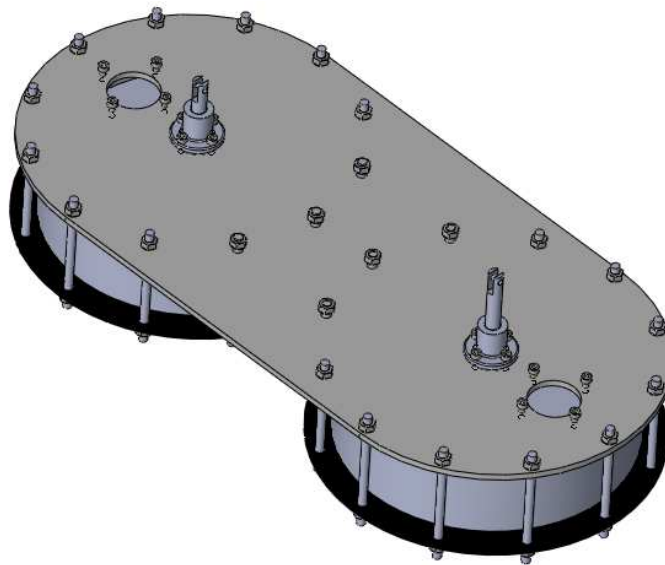


Fonte: O autor.

3.2 CÂMARA E PISTÃO DE EXPANSÃO

Para câmara de expansão foi adotado um tamanho considerado bom para essa tarefa, estimado em 200 mm de diâmetro, para em seguida realizar a otimização das demais peças que fariam parte do motor. A câmara de expansão foi desenvolvida de forma a ser confeccionado com materiais que podem ser encontrados em metalúrgicas de forma geral, a configuração da câmara é mostrada a seguir pela Figura 23.

Figura 23: Câmara de expansão do motor Stirling.

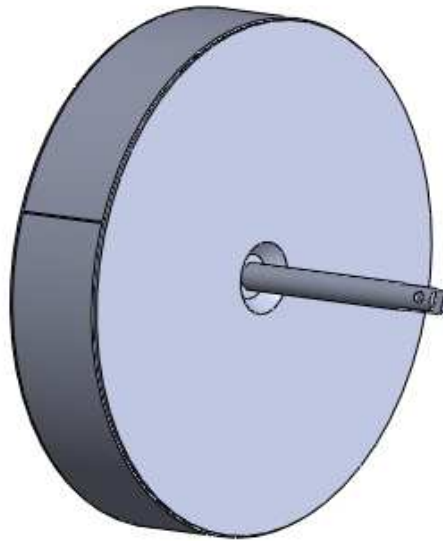


Fonte: O autor.

A base do motor foi pensada de forma a fazer um melhor aproveitamento dos raios solares, ela deve ser fabricada em alumínio, e após isso revestida apenas do lado externo por um acabamento negro. Para essa função pode ser usado tinta preta com acabamento fosco a qual pode ser adquirida em qualquer loja de tintas e é fornecida até mesmo em spray. O lado interno da placa da base deve ser polido, tornando-a uma superfície reflexiva, melhorando assim a transferência de calor ao ar.

Na Figura 23 pode ser visto a haste do cilindro de expansão, o qual deve ser fabricado em alumínio, pois dessa forma é reduzida a massa do mesmo, esse subconjunto é apresentado na Figura 24. A haste do cilindro de expansão ou deslocador é fixada por meio de uma porca, isso proporciona ao conjunto ser montado sem o uso de solda, porém a maior dificuldade de produção será as duas tampas devido ao rebaixe para acomodar a porca sem que fique o ressalto da mesma, se não for observado esse fato, haverá um volume morto de expansão não considerado no projeto, e dessa forma deve ser revisto os cálculos de potencia.

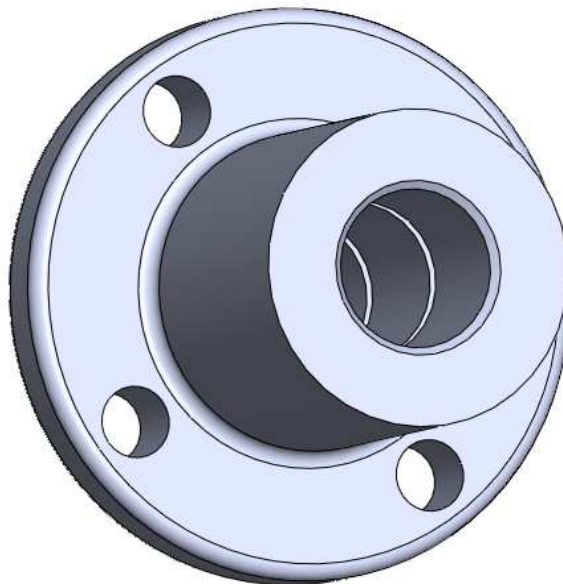
Figura 24: Cilindro de expansão.



Fonte: O autor.

O guia do pistão de deslocamento é apresentado pela Figura 25. Durante seu processo de fabricação deve-se observar que a folga entre o guia e a haste deve ser inferior a 0,02, o que torna o processo cuidadoso, se houver folga excessiva, durante o funcionamento, perdas de ar irão ocorrer, reduzindo assim a eficiência do motor. Outro ponto que minimiza os vazamentos e que nele incluídos, as ranhuras internas, porém é um dos pontos de dificuldade do processo devido ao tamanho reduzido das peças, haja vista que o diâmetro interno é de 10 mm.

Figura 25: Guia do deslocador.

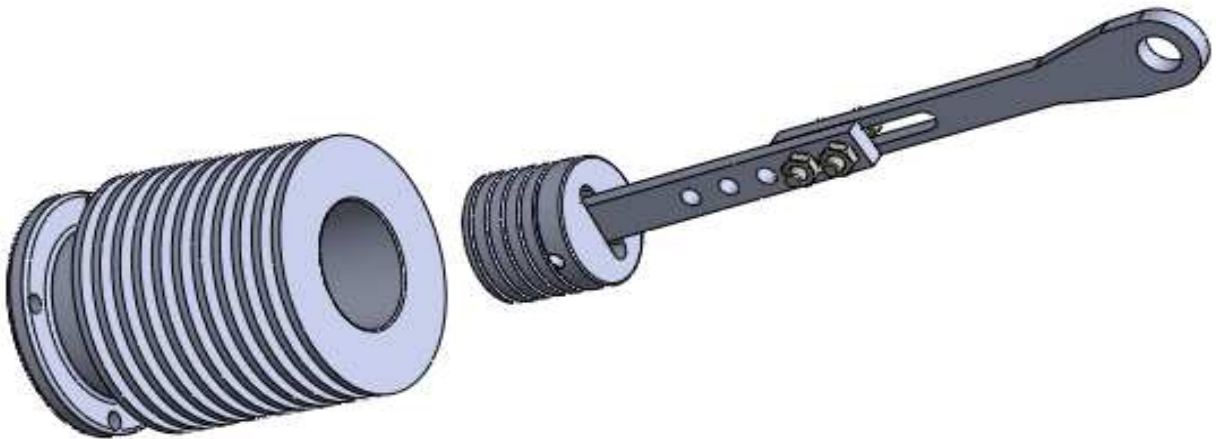


Fonte: O autor.

3.3 ESPAÇO E PISTÃO DE COMPRESSÃO

O pistão de trabalho foi desenvolvido com um diâmetro interno de 30 mm e com comprimento de 70 mm o que confere ao motor um curso máximo de 45 mm, garantindo assim o correto alinhamento do pistão de trabalho. Essa configuração atende ao proposto na secção anterior e com essas dimensões o mesmo deve fornecer a potência aproximada de 20 W quando regulado um curso de 25 mm, observando ainda que o comprimento da biela deve ser regulado para a redução do volume morto de compressão (V_c). A Figura 26 mostra uma vista da montagem do conjunto camisa, pistão e biela.

Figura 26: Conjunto câmara pistão e biela.



Fonte: O autor.

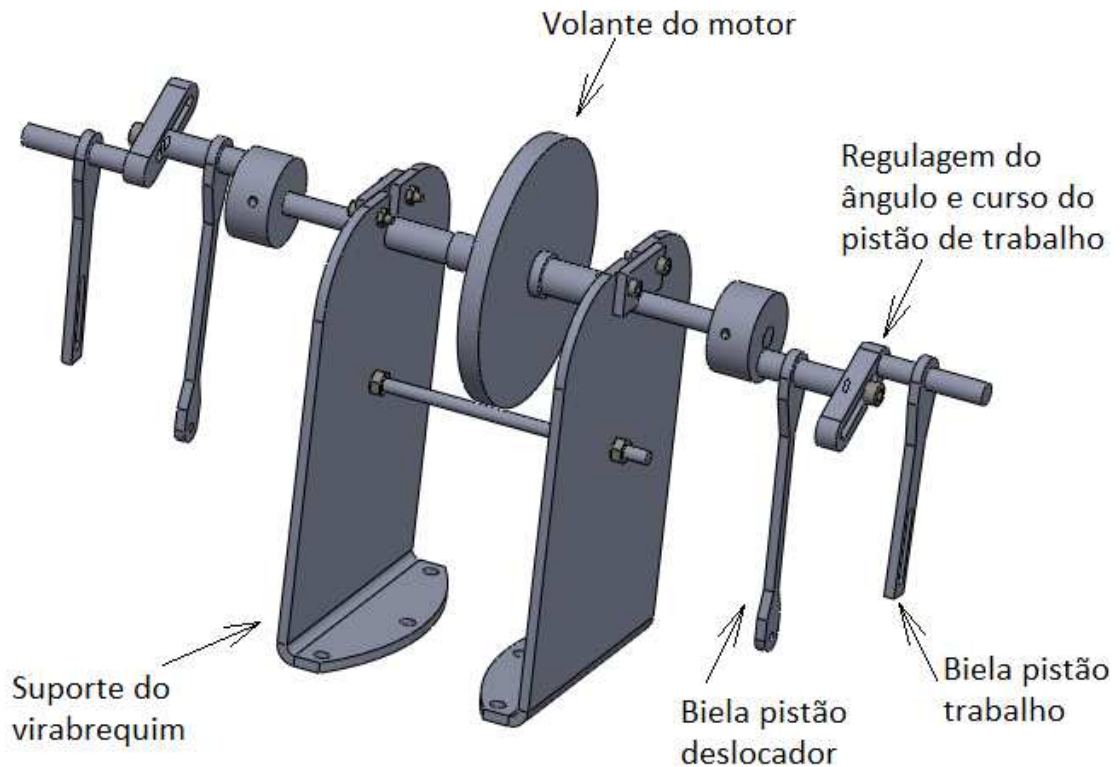
É notável que na figura acima, a biela apresenta uma regulagem em sua parte intermediária, essa regulagem tem a função de depois de regulado o curso do motor, ajustar o volume morto da área de compressão, pois quando aumentado o curso do pistão, pode ocorrer do mesmo sair de dentro da camisa, ou ainda bater internamente no pistão deslocador. Outro ponto que deve ser observado são quanto às ranhuras do pistão, elas servem para reduzir o vazamento de ar entre o pistão e a camisa, devido ao decréscimo de pressão gerado devido a variação da seção.

3.4 VIRABREQUIM E VOLANTE

Devido a complexidade do processo de fabricação de um virabrequim, o mesmo foi desenvolvido em várias peças para facilitar a confecção, tornando assim peças com geometria

simplificada, e além do mais possibilitando o ajuste do mesmo durante a montagem. O ponto crucial do mesmo é favorecer a regulagem do ângulo de defasagem entre os pistões, o que permite testes com vários ângulos, também permite regular o curso do pistão de trabalho de forma simples. A Figura 27 mostra uma vista geral do virabrequim montado ao volante sobre o suporte de sustentação do conjunto.

Figura 27: Conjunto virabrequim e volante.



Fonte: O autor.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto do motor Stirling, descrito anteriormente, trás uma concepção simples e de fácil fabricação, não necessita de máquinas com tecnologia avançada haja vista a simplicidade das peças, porém a simplificação tornou o projeto minucioso, com muitas peças que devem ser ajustadas durante a montagem, isso pode acarretar em erros de posicionamento das peças devido a erros de fabricação, contudo não deve prejudicar o funcionamento. Um dos aspectos que merece atenção é a usinagem das peças, devido a tolerâncias apertadas, fato esse já mostrado por Hirata (1995), o qual lembra que a vedação é fundamental para o bom funcionamento.

CONCLUSÃO

A sociedade a nível mundial vive uma verdadeira escassez de energia, mas por outro lado as fontes energia estão disponíveis, porém deixam de ser utilizadas devido a falta de tecnologia, ou devido aos enormes custos das mesmas. O principal esforço do desenvolvimento de novas tecnologias na área da geração de energia vem sendo feito por universidades. Porém por mais que esse trabalho seja feito, pode ser visto ao redor que pouco ainda é realizado, haja vista que poucos são os incentivos a área, se considerada a importância para os países.

Os objetivos que levaram a busca pelas informações, contidas nos capítulos anteriores, foram em sua grande maioria alcançados. O entendimento do ciclo e o funcionamento da maquete, fez com que o interesse fosse sendo despertado cada vez mais, extraindo assim o máximo que a literatura disponibiliza. Pode-se perceber que o fato que ainda retrai as pesquisas na área, pois são poucos são os materiais com conteúdos relevantes e explicativos. Por outro lado, em uma breve busca na internet, é possível verificar que o esforço do entendimento desse tipo de motores é de muitos, devido à grande importância dessa tecnologia para a geração de energia, tanto é que motores Stirling já estão sendo usados timidamente em alguns países.

Durante as análises e testes feitos com a maquete, foi notável o que todas as literaturas tratam sobre o difícil acerto para o perfeito funcionamento desses motores, o que se percebeu na prática vivida, mas o fato de um breve funcionamento da maquete pode elucidar melhor e dar novo animo durante a pesquisa. Como muito se deteve em pesquisa e construção em uma maquete que funcionasse, servindo ao entendimento e esclarecimento das particularidades, fica lançado aqui o desafio a outros estudantes, interessados no assunto, de construir o projeto proposto no Capítulo 3 e testarem na prática, fazendo as melhorias necessárias, e quem sabe ainda conseguindo gerar energia com motores Stirling movidos a partir da energia solar.

Com certeza esse tema é longo e muito tem a ser estudado na área, para que um dia possamos ter uma energia limpa de verdade, pois é isso que será a energia proveniente do uso de motores Stirling, principalmente se não for utilizado nenhum gás tóxico como fluido de trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *A produção de energia elétrica a partir da biomassa*. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em 17 fev. 2013.

AGUIAR, Wilson Mansur de. *O uso de fontes alternativas de energia como fator de Desenvolvimento social para segmentos marginalizados da sociedade*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/wmaguiar.pdf>>. Acesso em 19 fev. 2013.

BARROS, Robledo Wakin. *Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis*. Itajubá: UNIFEI, 2005. Disponível em: <http://juno.unifei.edu.br/bim/0030363.pdf>. Acesso em 05 março. 2013.

BRONZATTI, Fabrício Luiz. *Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030*. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep_2008_TN_STO_077_541_11890.pdf>. Acesso em 17 fev. 2013.

COSTA, D. F. *Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização*. (Monografia). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CRUZ, Vinicius Guimarães da. *Desenvolvimento experimental de um motor Stirling tipo gama*. Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa, 2012.

FIGUEIREDO Natalie Jimenez Vérdi de. *Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás: estudo de caso*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007.

GIANSANTI, Roberto. *Série sobre energia: energia no mundo*. Disponível em: <<http://revistaescola.abril.com.br/geografia/pratica-pedagogica/questao-energia-brasil-mundo-507241.shtml>>. Acesso em 17 fev. 2013.

HIRATA, K. Schmidt theory for Stirling Engines. Stirling Engine home page. Disponível em: <<http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/>>. Acesso em 17 fev. 2013.

KONGTRAGOOL, B.; WONGWISES, S. *A review of solar powered Stirling engines low temperature differential Stirling engines*. Renewable and Sustainable Energy Review 7, p 131- 154, 2003. Disponível em: <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/refs/solar/Stirling.pdf>

MARTINI, W. R. Stirling engine design-manual second edition. Honolulu: University Press of the Pacific, 1983; Disponível em http://mac6.ma.psu.edu/stirling/reports/NasaStirlingEngineDesign_manual_1983.pdf

MELLO, M. G. Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: LabMídia/FAFICH, 2001;

SANTOS, Alison Alves dos et all. *PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA*. Santos: Universidade Santa Cecília, 2006.

SILVA, L. L., et al. *Princípios de termoelétricas em pequenas propriedades rurais*. In: 2º International workshop advances in cleaner production. São Paulo, maio 2009.

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

TAVAKOPOUR, A. R.; ZOMORODIAN, A.; GOLNESHAN, A. A., *Simulation, Construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered a flat-plate solar collector without regenerator*: renewale energy. v 33, p 77-87, 2008

VELÁZQUEZ, S.G. *A cogeração de energia no segmento de papel e celulose*: contribuição à matriz energética no Brasil. (Dissertação de Mestrado) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade São Paulo: São Paulo, 2000.

ZEMANSKY, M. W. *Heat and Thermodynamics* : An Intermediate Textbook. Mc Graw: Hill, Kogakusha, 1968