

Relatório Final de F609

Motor de Stirling do tipo Beta



Aluno: Gabriel Martins, RA: 168028

giga_martins@hotmail.com

Professor Orientador: Fernando Iikawa

06/2018

SUMÁRIO

1 - RESUMO.....	3
2 - INTRODUÇÃO.....	4
3 - FUNCIONAMENTO.....	5
4 - PROJETO.....	8
4.1 - MATERIAIS.....	8
4.2 - CONFECCÃO.....	8
4.2.1 - LATAS.....	8
4.2.2 - PISTÃO.....	10
4.2.3 - VIRABREQUIM.....	11
4.3 - MONTAGEM.....	12
4.4 - IGNIÇÃO.....	12
5 - RESULTADOS.....	13
6 - AGRADECIMENTO.....	14
7 - REFERÊNCIAS.....	14
8 - COMENTÁRIOS DO PROFESSOR ORIENTADOR.....	15

1) RESUMO:

O objetivo deste projeto é construir um Motor de Stirling do tipo Beta de maneira simplificada, utilizando apenas materiais de fácil obtenção (ou seja, de baixo custo e alta disponibilidade), podendo ser facilmente replicável em um trabalho escolar à nível médio, técnico ou ainda final do fundamental, o que poderia despertar o interesse dos alunos pela física ou engenharia. O motor construído pode ser visto na Figura 1 logo abaixo e em vídeo funcionando, cujo link está na seção Referências.

Já foi desenvolvido um Motor de Stirling na disciplina F 609, embora tenham sido utilizados outros materiais para sua confecção (por exemplo, os pistões são diferentes). Tal projeto também pode ser encontrado na seção Referências.



Figura 1. Motor de Stirling aqui construído em operação.

2) INTRODUÇÃO

Em meio à Revolução Industrial, motivado pelos constantes acidentes relacionados às máquinas à vapor recém-criadas, o pastor escocês Rev. Dr. Robert Stirling patenteou, em 1816, uma nova máquina térmica criada por ele e seu irmão engenheiro James Stirling que era capaz de oferecer maior rendimento e segurança em seu manuseio do que as máquinas anteriores, a qual mais tarde ficou conhecida como Beta Stirling's Engine (Motor de Stirling Beta). Seu desenho original, feito à mão e presente em sua patente, pode ser conferido na Figura 2. O motor que iremos desenvolver é ligeiramente adaptado, porém segue exatamente os mesmos princípios do original.

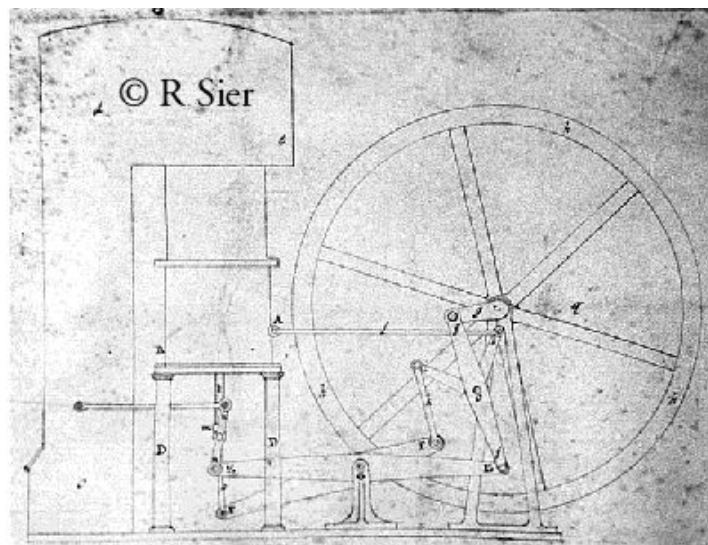


Figura 2. Desenho original feito à mão do “Heat Economizer” em sua patente, o qual viria a ser conhecido como “Beta Stirling’s Engine”. 1816.

3) **FUNCIONAMENTO:**

A máquina é uma câmara com diferentes temperaturas em suas extremidades, com gás e dois êmbolos confinados em seu interior, de forma a aquecer e resfriar o gás, provocando ciclos de expansão e contração do mesmo que movimentam os êmbolos. Ou seja, é capaz de converter energia térmica em energia mecânica.

Ao contrário dos motores à combustão interna, o gás, que é o fluido de trabalho, fica confinado dentro de uma câmara, não deixando o interior do motor. Portanto, trabalha em um ciclo fechado similar ao de Carnot, com quatro fases executadas em dois tempos do seu pistão. Como é semelhante ao ciclo ideal, seu rendimento está entre os mais altos de todas as máquinas térmicas - porém, possui baixa eficiência energética, no sentido de que precisa ser extremamente grande para gerar a mesma quantidade de energia que um motor muito menor à combustão interna geraria, inviabilizando sua aplicação nas mais diversas áreas. Os ciclos podem ser conferidos na Figura 3.

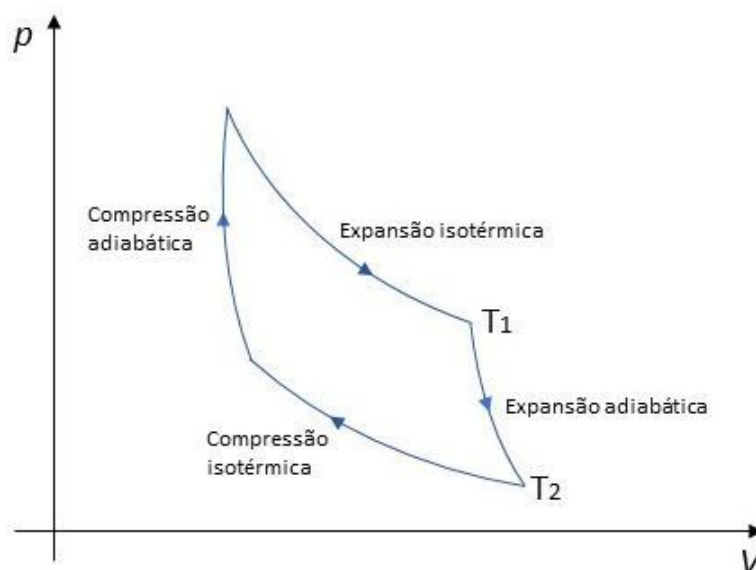


Figura 3a. Diagrama PV (Pressão-Volume) de um Ciclo Ideal de Carnot.

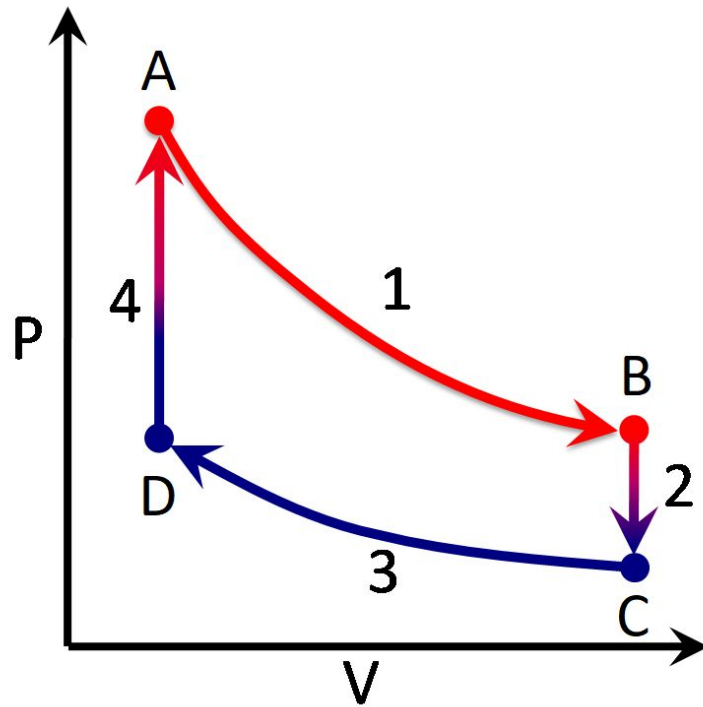


Figura 3b. Diagrama PV de um Ciclo Ideal de Stirling.

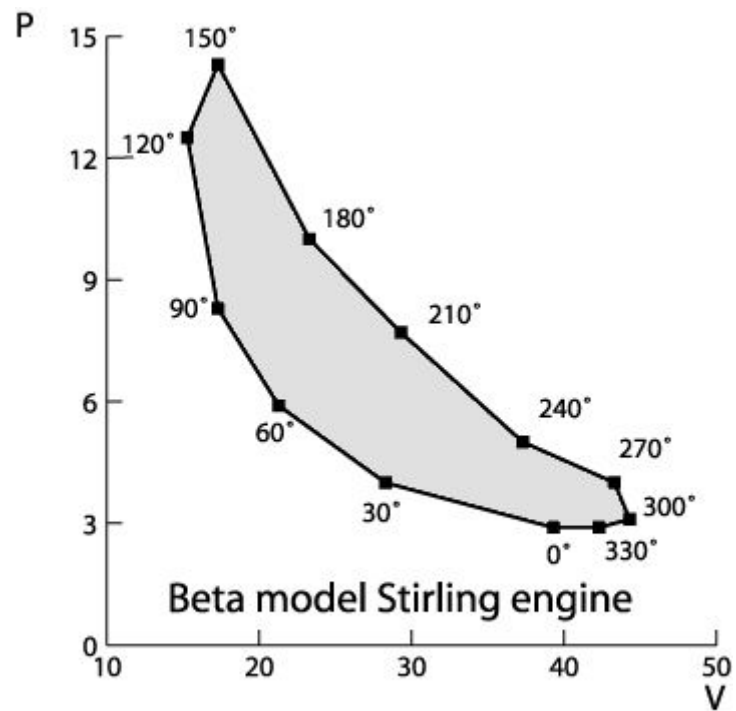


Figura 3c. Diagrama PV experimental de um Motor de Stirling do tipo Beta.

Com base na figura 3b, temos que os processos envolvidos são:

Processo 1: Expansão Isotérmica à temperatura T_q ; O gás entra em contato com a fonte quente e absorve energia na forma de calor, expandindo seu volume sem alterar sua temperatura, realizando trabalho para empurrar o pistão.

Processo 2: Resfriamento à volume constante; O gás confinado no motor entra em contato com a fonte fria. Transfere calor para ela, mantendo seu volume constante e diminuindo sua temperatura.

Processo 3: Compressão Isotérmica; O pistão move-se de forma a diminuir a área dentro do cilindro, realizando trabalho sob o gás que é comprimido.

Processo 4: Aquecimento Isovolumétrico; O gás absorve energia em forma de calor da fonte quente e aumenta sua temperatura, sem que haja movimento do pistão.

Logo, é necessário que haja uma fonte quente e uma fonte fria para o funcionamento do motor. Utiliza-se água para a fonte fria, porém qualquer fonte capaz de produzir calor pode ser utilizada como fonte quente. Sendo assim, não se restringe à combustíveis fósseis como a maioria dos motores à combustão interna, podendo ser utilizado energia solar, elétrica ou até mesmo nuclear. Por exemplo, submarinos da frota escocesa utilizam motores de stirling, onde sua fonte quente é proveniente de energia nuclear e a fria a água na qual estão mergulhados. No aqui construído, foi utilizado água gelada como fonte fria e uma vela como fonte quente.

O gás utilizado é importante para seu rendimento. Nos modelos mais simples, incluindo o deste projeto, utiliza-se ar atmosférico, porém em versões de alta potência costuma-se utilizar hélio ou hidrogênio pressurizados a até 15 MPa por serem bons condutores de calor, transportando-o mais rapidamente e tendo menor resistência ao escoamento.

4) **PROJETO:**

4.1) **Materiais**

Os itens utilizados para sua elaboração podem ser conferidos na tabela a seguir.

Tabela 1. Materiais necessários para a construção do motor de Stirling.

1 lata de atum (redonda)	bexiga de festa nº 9	furadeira
2 latas de refrigerante	gargalo de garrafa PET	cola branca
2 elásticos	chaves philips/fenda	lixas e lima de ferro
3 clips grandes	2 DVD's usados	tesoura
1 vela	cola de alta temperatura	fita isolante
conectores de chuveiro	1 lata de leite ninho	estilete
palha de aço	2 arruelas	alicate

4.2) **Confecção**

A confecção pode ser dividida em 3 grandes partes: latinhas, pistão e virabrequim. As latinhas e o virabrequim podem ser feitos ao mesmo tempo, ao passo que o pistão precisa das latinhas já prontas. Algumas partes precisam de colagem e dias para secar corretamente, logo foram realizadas primeiro.

4.2.1) **Latas**

A lata de atum será a fonte fria (sendo um reservatório de água gelada), uma das latas será a câmara com o gás e êmbolo e a outra será suporte para o virabrequim.

Além das latas, é necessário cola de alta temperatura, cola branca, lixas, lima de ferro, tesoura, furadeira com broca 2mm e ferramentas (sugerimos abridor de lata, alicates e chaves philips/fenda grandes) para esta parte.

Primeiro, retira-se a parte superior de ambas as latinhas de alumínio, podendo utilizar um abridor de latas ou ainda alicate. Utiliza-se a lima de ferro para “lixar” a borda superior da lata, de forma que toda a borda com “rebarbas” de metal da lata sai de uma vez, deixando a extremidade lisa.

Quanto a lata de atum, retira-se a parte do fundo de forma a conseguir encaixar uma das latas de refrigerante em seu interior. Para tal, “martela-se” uma chave de fenda na sua marcação mais externa na parte de baixo, percorrendo toda sua extensão. Depois, abre-se mais um buraco no centro da lata e, com um alicate, pega-se na lata (dentro do buraco) e puxa-se para fora, em sentido à marcação feita com furos, até retirar toda a parte entre os furos. Rebarbas afiadas mostram-se presentes: são retiradas com uma lima de ferro e alicate, gerando uma abertura lisa e grande o suficiente para a passagem da lata de refrigerante.

Com a lata de refrigerante “dentro” da de atum, é necessário colar uma na outra. Alinha-se a parte superior da lata de atum com a “dobra” da lata de refrigerante e passa-se cola de alta temperatura entre a parte inferior da lata de atum e a lata de refrigerante. Vale ressaltar que é necessário vedar a parte inferior da lata de atum, pois será colocado água nela; sendo assim, passa-se cola quente por toda a sua extensão inferior e, quando já seca, passa-se cola branca em grande quantidade de forma a cobrir toda sua parte inferior. É preciso aguardar de um a dois dias para que a cola seque corretamente.

A outra parte que necessita de colagens é a com DVDs. Cola-se ambos com a parte espelhada para fora usando cola quente. Depois cola-se (também com cola quente) uma

arruela na abertura dos DVDs, e no seu interior um conector de chuveiro, de forma a deixar uma de suas pontas (com parafuso) para fora.

A lata restante é usada para ser o suporte do virabrequim. Faz-se duas marcações com caneta: uma em um ponto cerca de 2cm abaixo da linha de cima da lata - a mesma linha utilizada como referência para colar a de atum - e outra à mesma altura porém do outro “lado” da lata, como se fosse atravessá-la com uma agulha. Fura-se a lata em ambas as marcas com chave philips, onde o furo é grande o suficiente para permitir a passagem do clipe que será utilizado para fazer o virabrequim.

Ainda com a mesma lata, retira-se o fundo da mesma com uma tesoura. Depois, faz-se uma nova marcação no meio caminho entre os furos (eixo horizontal), outra 3cm abaixo (verticalmente) e abre-se um “buraco” circular com raio de 3cm também utilizando a tesoura.

Para a construção do suporte do motor (que irá segurá-lo acima da fonte quente), utiliza-se uma lata de leite ninho, que deve ser furada para permitir a entrada de ar e ter uma abertura lateral grande o suficiente para inserir uma vela em seu interior.

4.2.2) Pistão

Pega-se a palha de aço e a espalha até ficar rala. Cortam-se tiras de cerca de 5cm e as enrola em volta do canudo, deixando-a com um volume que possa quase preencher horizontalmente a parte interna de uma lata de refrigerante, porém ainda assim conseguir se mover livremente na direção vertical (ou seja, enrola-se a palha até formar um cilindro com raio ligeiramente menor que o da lata porém com altura de 5cm).

Depois, é necessário deixar um dos cliques retos e inseri-lo no lugar do canudo. Enrola-se uma de suas pontas, fazendo um “gancho”, enquanto que na outra faz-se uma

espiral que sustenta o pistão. Amarra-se a linha de pesca no gancho e coloca-se o pistão dentro da lata de refrigerante que está colada com a de atum.

Corta-se o gargalo da garrafa PET e faz 3 furos na tampa: um no centro e outros dois próximos à lateral da tampa, como se fossem o “diâmetro” dela. Pega-se mais um clipe, que deve estar reto, e o dobramos em formato de “U”, inserindo-o nos dois furos laterais. Para que não atrapalhe o furo do meio, a parte inferior da dobra do “U” deve ser ligeiramente curva. Cola-se o clipe na tampa com cola quente, e insere-se a linha de pesca (que está amarrada no pistão) no furo do meio.

Agora, é preciso cortar a bexiga logo após seu “pescoço” (gargalo) terminar, e encaixá-la na tampa e na latinha, com a parte mais estreita na tampa. Depois basta adicionar elásticos sobre a bexiga e a lata, de forma a vedar bem. Esta parte deve ser realizada com cuidado para não permitir que o ar dentro da lata escape, caso contrário o motor não funciona.

4.2.3) Virabrequim

Pega-se 3 conectores de chuveiro, retiram-se seus parafusos e fura-se (com a furadeira e broca de 2mm) em 90° em relação a um de seus furos, atravessando o conector, de forma a permitir a passagem de um clipe reto.

Pega-se o último clipe e deixa-se o mais reto possível. Insere-se os conectores com furos e realiza-se uma série de dobraduras nele, até ficar no formato necessário. Tais dobraduras podem ser consideradas uma das partes mais trabalhosas e desafiadoras deste projeto. Por fins didáticos, é mais fácil compreender o processo vendo alguém executando-o; por isso, as dobraduras e como realizá-las podem ser conferidas no vídeo intitulado “Construa um motor movido a vela (motor stirling)”, cujo link está na seção de Referências.

4.3) Montagem

Primeiramente, encaixa-se a lata suporte ao virabrequim na lata com o pistão (onde a com o pistão fica em baixo) e utiliza-se fita isolante para fixar uma na outra. Logo após, coloca-se o virabrequim na lata suporte, e encaixa-se a linha de pesca no conector que está no centro do virabrequim e as “arestas” do clipe em “U” nos dois conectores ao lado no virabrequim, utilizando os parafusos dos conectores para prender a linha e os cliques.

Logo após, coloca-se os DVDs colados na ponta à direita do virabrequim (olhando de frente para a abertura da lata com o virabrequim) que está para fora da lata, utilizando novamente o parafuso do conector (que, neste caso, está colado no meio dos DVDs). Na outra ponta do virabrequim que também está para fora da lata, coloca-se outro conector de chuveiro, para evitar que o virabrequim deslize enquanto gira.

4.4) Ignição

Uma vez montado, para que o motor funcione é necessário que haja uma fonte quente e uma fonte fria. Utiliza-se água gelada, depositada na lata de atum, como fonte fria, e uma vela como fonte quente posicionada embaixo do motor, entre ele e o fundo da lata de leite ninho. Com as fontes devidamente posicionadas, aguarda-se cerca de 1 minuto (a fim de esperar a parte de baixo do motor atingir temperatura suficientemente alta) e dá-se a “partida”: gira-se o disco formado com DVDs, que por sua vez gira o virabrequim, que (por conta de sua geometria) puxa o pistão de palha de aço para cima e inicia o ciclo descrito na seção Funcionamento.

5) RESULTADOS:

O motor aqui construído funcionou, embora que com certas dificuldades: o movimento de rotação do DVD ofereceu resistência acima da esperada, “abaixando” o rendimento do motor. Foi feito um vídeo dele funcionando, cujo link está em Referências.

Este motor também foi utilizado em outra disciplina como exemplo base, onde construímos, em conjunto com alunos de um cursinho popular, mais um motor, sendo desmontado algumas vezes a fim de facilitar a reprodução de suas peças, sem que seus componentes fossem prejudicados.

Após ser remontado, no entanto, o mesmo parou de funcionar, sendo incapaz de iniciar o ciclo quando dada a “partida”. Refiz todas as partes (com exceção da latinha de alumínio com a lata de atum colada) e as substituí, uma a uma, na tentativa de identificar qual poderia ser a peça danificada. Não fui capaz de identificar qual a peça danificada, e mesmo com todas as peças novas, o motor não voltou a operar. Inclusive, vários alunos do IFGW, de vários cursos e anos, tentaram me ajudar, seja com ajuda manual na confecção ou trazendo peças, ou ainda intelectual, tentando debater o que poderia ter ocasionado tal falha.

Como essa máquina térmica funcionava antes, não consegui entender o motivo de seu súbito mal funcionamento. Mesmo com as exatas mesmas peças utilizadas anteriormente e montagem, não foi capaz de iniciar o ciclo. Com as novas peças e montagem, também não foi. A única parte “original” que não foi reproduzida é a lata de alumínio colada “dentro” da lata de atum, a qual não é necessariamente capaz de evitar o sucesso do experimento à menos que a lata de atum não estivesse vedada o suficiente, permitindo água escapar - o que não ocorreu.

Utilizei o motor construído pelo aluno do IFGW André de Oliveira, que possui funcionamento excelente (pode ser conferido em operação na seção Referências), como base

para modificar o construído aqui e tentar compreender seu mal funcionamento, mas tudo parecia estar semelhante, sem diferenças significativas que pudessem inviabilizar o operar da máquina térmica.

Sendo assim, concluo que o experimento foi bem sucedido por permitir que o motor funcionasse (o que pode ser conferido em vídeo), mesmo que, depois de remontado, infelizmente não tenha sido capaz de operar.

6) AGRADECIMENTO:

Gostaria de agradecer ao André Rebac de Paula, técnico do DFMC, que me auxiliou na confecção do virabrequim e dos conectores, aos outros técnicos do DFMC que ofereceram velas e fósforos, ao Dênis, aluno do IFGW que cedeu parafusos a fim de me ajudar a remontá-lo, ao André de Oliveira, que emprestou seu motor de Stirling, e aos diversos alunos de vários anos e cursos do IFGW que tentaram me auxiliar à reconstruí-lo.

7) REFERÊNCIAS:

<https://www.ohio.edu/mechanical/stirling/engines/beta.html>

<http://www.stirlingengines.org.uk/pioneers/pion2.html>

http://www.robertstirlingengine.com/beta_uk.php

<https://motorstirling.wordpress.com/fundamentacao-teorica-2/>

<http://www.manualdomundo.com.br/2016/01/aprenda-como-fazer-um-motor-stirling/>

http://www.wikiwand.com/pt/Ciclo_Stirling

Video base para o tutorial, que contém detalhes a respeito do virabrequim:

<https://www.youtube.com/watch?v=egNrHP6pMUo>

Projeto já realizado sobre um Motor de Stirling na disciplina F609:

https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/RenatoP-Llagostera_RF2.pdf

Vídeo do motor aqui construído e do emprestado pelo André de Oliveira em funcionamento:

<https://youtu.be/ut-kPmh0GAE>

8) COMENTÁRIOS DO PROFESSOR ORIENTADOR:

" O aluno concluiu com sucesso o trabalho proposto para F609. O projeto tem um teor educativo, onde mostra com detalhes a montagem de uma máquina térmica baseada em ciclo de Stirling utilizando materiais simples e fáceis de serem adquiridos. A máquina funcionou com perfeição, porém a sua vida-média não é longa por utilizar materiais frágeis e, por isso, teve problemas no dia da apresentação. Eu avalio o trabalho como ótimo".