



# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Física Gleb Wataghin

Maria Lucia Defendi, RA 086387

**e-mail:** maria.lucia.defendi@gmail.com

**Orientador:** Prof. Dr. Alex Antonelli

**e-mail:** aantone@ifi.unicamp.br

## Relatório Parcial Motor de Stirling

F609 – Tópicos de Ensino de Física I

Professor José J. Lunazzi

Campinas, 2013

# 1. Cópia do projeto

## 1.1. Descrição:

Neste projeto será feita reprodução de um motor de Stirling usando dois modelos, um modelo que ainda não foi feito na disciplina e um modelo que será refeito, pois o mesmo apresentou problemas em seu funcionamento, logo, tentarei fazer melhorias para que possa funcionar.

Os modelos serão feitos a partir de conhecimentos básicos de termodinâmica no Ensino Médio, podendo ser usado para estudar ciclos termodinâmicos.

## 1.2. Importância:

Sendo o segundo ano do Ensino Médio, o público – alvo, é importante que eles tentem visualizar o que lhes parece abstrato, dessa forma, podem aumentar sua compreensão em relação ao conteúdo trabalhado.

Logo, é de extrema importância que eles possam observar experimentalmente o que lhes é proposto na teoria.

## 1.3. Originalidade

Este motor pode ser visto na internet, porém, podemos observar várias formas de confeccioná-lo.

Um modelo deste motor já foi proposto por um aluno do IFGW, tal modelo necessita de alguns reparos, por este motivo, além de fazer um novo motor, minha proposta é fazer os reparos necessários no protótipo já construído.

A montagem dos dois motores difere em muitos aspectos, principalmente no que se refere ao material que será utilizado.

## 1.4. Lista de Materiais:

### **Motor A**

- Tubo de ensaio

- Bolinhas de gude
- Rolha
- Seringa de vidro
- Suporte de madeira
- Fonte de calor, como por exemplo, uma vela
- Elástico de uso médico (“Tripa de mico”)
- Lixa
- Verniz para madeira
- Pincel

### **Motor B (a ser reparado)**

- Latas de alumínio (refrigerante)
- Cola do tipo resina Epóxi
- Cola de silicone para altas temperaturas
- Arames ou fios de cobre
- Tubos de PVC
- Bexiga
- Porcas, parafusos e arruelas.
- Suporte de metal
- Disco de CD ou DVD antigo
- Madeira para a base

### 1.5.Referências:

- Wikipedia ( motor de stirling) – acesso em ago/2013
- < <http://www.youtube.com/watch?v=r6Ra-3IS9IY>> - acesso em ago/2013
- <[http://www.cce.ufes.br/jair/termo/Aula06\\_2aLei.pdf](http://www.cce.ufes.br/jair/termo/Aula06_2aLei.pdf)> - acesso em ago/2013
- SAUERWEIN,R.A., SAUERWEIN,I.P.S.,*Objeto de aprendizagem: Máquinas Térmicas*. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 29, n. Especial 2: p. 812-830, jun. 2012  
< <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/view/1891>> - acesso em ago/2013
- SILVA,R.P.,*Projeto motor de stirling*.Relatório Final-Disciplina F 609

- [http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2008/RenatoP-Llagostera\\_RF2.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/RenatoP-Llagostera_RF2.pdf)> acesso em ago/2013
- SILVA,D.E.,*Modelo Cinético de um Gás Ideal numa Transformação Isotérmica*. Relatório Final-Disciplina F 609.  
[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2002/992769\\_DavidE\\_MaJose\\_F809\\_RF](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2002/992769_DavidE_MaJose_F809_RF)> acesso em out/2013
  - STRANGUETO,K.M., A *Termodinâmica da compressão e expansão dos gases*. Relatório Final-Disciplina F 609  
[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem2\\_2007/KarinaM-Ennio\\_RF2.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2007/KarinaM-Ennio_RF2.pdf)> - acesso em out/2013
  - ALVES,V.C.,STACHAK,M.,A *Importância de Aulas Experimentais no Processo Ensino Aprendizagem*. XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física,2005
  - FEIX,E.C, SARAIVA,S.B., KIPPER,L.M.,A *Importancia da física experimental no processo ensino-aprendizagem*. Anais do III Salão de Ensino e de Extensão,UNISC

Meu orientador, o Prof. Dr Alex Antonelli concorda com os termos aqui estabelecidos para o projeto e declara que poderá dispor de todos os elementos necessários a menos de exceções indicadas embaixo.

Exceções: "NÃO HA".

Sigilo: NÃO SOLICITA.

## **2. Resultados atingidos e o que falta ser feito**

No estágio atual do projeto, falta refazer o motor de stirling que foi apresentado anteriormente na disciplina.

Em relação ao modelo que será inédito, já obtive resultados positivos, faltando apenas fazer uma fonte de calor que substitua a vela, que esta sendo atualmente usada,

encontrar uma posição fixa para a seringa de vidro, pois quando movo a seringa o experimento não funciona.

### 3. Fotos da experiência no estágio em que se encontra



*Figura 1. Material Utilizado*

As Figuras de 2 a 8 referem-se à Parte 1 da montagem do experimento, que é envernizar a madeira.



*Figura 2*



*Figura 3*



*Figura 4*



*Figura 5*



*Figura 6*

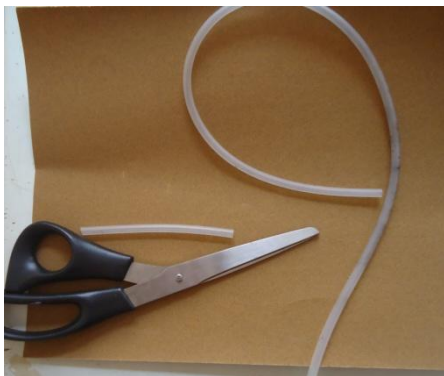


*Figura 7*



*Figura 8*

As Figuras de 9 a 11 referem-se à Parte 2 da montagem do experimento, vedar o tubo de ensaio.



*Figura 9*



*Figura 10*

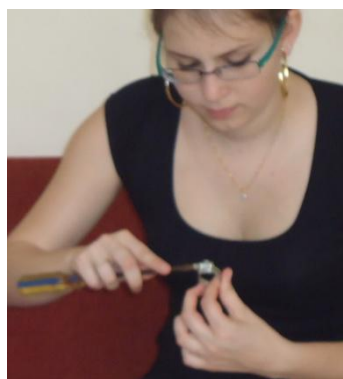


*Figura 11*

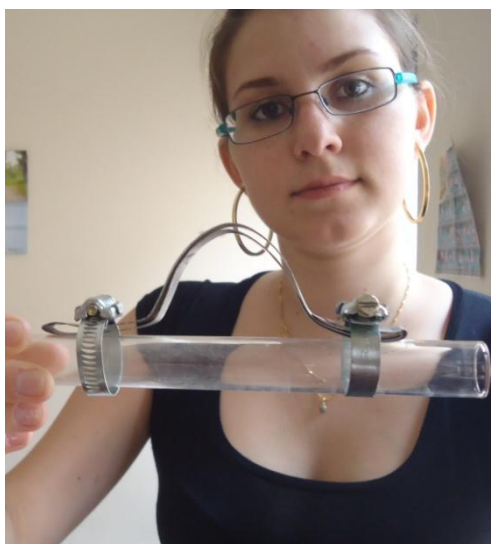
As Figuras de 12 a 14 referem-se à Parte 3 da montagem do experimento, prender o apoio no tubo de ensaio.



*Figura 12*



*Figura 13*



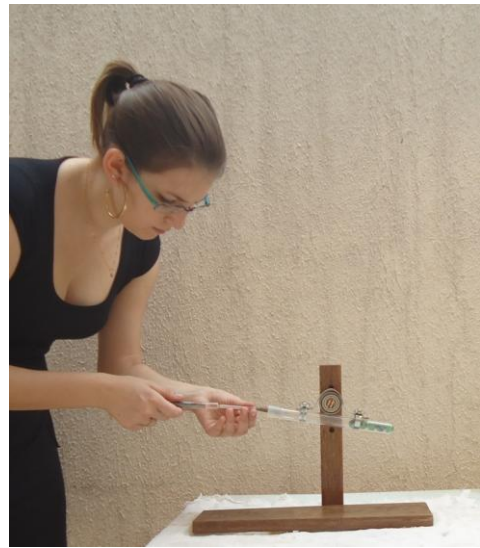
*Figura 14*

As Figuras de 15 a 16 referem-se à Parte 4 da montagem do experimento, que é colocar o tubo de ensaio no suporte e colocar a seringa de vidro.





*Figura 15*



*Figura 16*



*Figura 17. Motor de Stirling*

#### **4. Dificuldades encontradas**

Bem o modelo que estou chamando de “inédito”, apresentou algumas dificuldades que serão destacadas abaixo.

O primeiro problemas foi encontrar o tamanho do tubo de saio que se se adéqua melhor ao tamanho das bolinhas de gude que seriam utilizadas.



Resolvido o problema do tamanho do tubo, tive que encontrar o número de bolinhas de gude que seriam utilizadas, e isso deu certo trabalho, por que para que o motor funcione o número de bolinhas de gude tem que estar correto, e a posição da seringa também (o problema do posicionamento da seringa ainda persiste, pois se modifico sua posição, o experimento para de funcionar).

## 5. Pesquisa

**Palavra-chave:** Ciclo de stirling

É de suma importância saber o ciclo de stirling para entender o funcionamento do motor, e assim confeccionar o motor.

<<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motores-stirling1.htm> / anexo 1>

**Palavra-chave:** Funcionamento do motor

Para complementar o conhecimento sobre o ciclo do motor, precisamos saber como ele funciona.

<<http://www.hsw.uol.com.br/framed.htm?parent=motoresstirling.htm&url=http://www.sesusa.org/> anexo 2>

**Palavra-chave:** Tratamento quantitativo do modelo

Tratamento matemático do motor

<[http://eccehomo.me/mleft/2ano/fex3/FEX3\\_TL2-Stirling.pdf](http://eccehomo.me/mleft/2ano/fex3/FEX3_TL2-Stirling.pdf)/anexo3>

**Palavra-chave:** Viabilidade do motor de Stirling e seu uso

Não basta que saibamos a parte teórica da experiência, é fato que precisamos ter conhecimento de possíveis aplicações do mesmo.

<<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motores-stirling4.htm>/anexo4>

## **6. Descrição em três níveis**

### *6.1 Básico*

Existem alguns tipos de motores, como os motores a diesel, mas existe um tipo de motor que é ainda mais eficiente, é o chamado motor de Stirling. Além da sua eficiência, esse tipo de motor é menos poluente e muito silencioso.

Porém apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, o fato de não ser muito viável para modelos automotivos como carros e caminhões, pois é difícil de variar a velocidade e de dar a partida.

Esse motor é chamado de motor de combustão externa, ou seja, o gás utilizado nesse motor, nunca deixa seu interior e seu funcionamento é bem simples, basta gerar uma diferença de temperatura entre a câmara quente e a câmara fria para produzir trabalho (quanto maior a diferença de temperatura, maior é a eficiência do processo e mais compacto o motor).

### *6.2 Ensino Médio*

Existem alguns tipos de motores, como os motores a diesel, mas existe um tipo de motor que é ainda mais eficiente, é o chamado motor de Stirling.

O motor Stirling é muito simples, sendo constituído de duas câmaras em diferentes temperaturas que aquecem e resfriam um gás de forma alternada, provocando expansão e contração cíclicas, o que faz movimentar dois êmbolos ligados a um eixo comum.

Por ser um motor de combustão externa, ou seja, como o fluido de trabalho nunca deixa o interior do motor, trata-se de uma máquina de ciclo fechado, podemos verificar que este tipo de motor funciona com um ciclo termodinâmico composto de 4 fases: Compressão Isotérmica (Temperatura constante), Aquecimento Isométrico (Volume constante), Expansão Isotérmica e Resfriamento isométrico. Encontra-se muito próximo do chamado Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas.

### 6.3 Graduações em Física

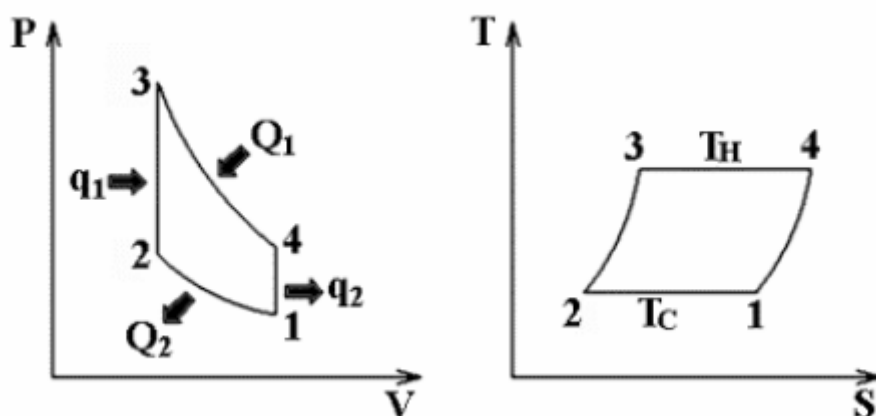
Robert Stirling desenvolveu o motor original em 1816. Muitos desses motores foram construídos e demonstrados obtendo-se um bom desempenho com uma pequena quantidade de energia de saída. Outros tipos de motores substituíram o motor de Stirling, que apresenta algumas dificuldades, que envolvem, por exemplo, sua vedação. Entretanto, o uso limitado do motor continuou em alguns lugares do mundo, primariamente para bombear água. Recentemente, o interesse pelo motor de Stirling ressurgiu, e o trabalho de desenvolvimento, conduzido principalmente na Europa é direcionado para a eliminação das dificuldades de operação que restringem o uso extensivo do motor.

O motor de Stirling opera silenciosamente com baixa emissão de poluentes, os modelos construídos para aplicações como propulsão de veículos e geração de energia elétrica são semelhantes a queima de óleo Diesel.

Este motor é chamado motor de combustão externa, pois o fluido de trabalho nunca deixa o interior do motor; trata-se portanto de uma máquina de ciclo fechado.

Sua operação provém do ciclo de Stirling, que consiste de quatro processos internamente reversíveis em série:

- 1-2: Compressão isotérmica a uma temperatura  $T_c$
- 2-3: Aquecimento a volume constante
- 3-4: Expansão isotérmica a uma temperatura  $T_H$
- 4-1: Resfriamento a volume constante para completar o ciclo



Vamos analisar o que ocorre em cada etapa deste ciclo

## 1-2 Compressão isotérmica

Lembrando a Primeira Lei da Termodinâmica temos que

$$dE_{in} = dQ - dW$$

Estando o gás agora, a uma pressão inferior, o pistão vai ser empurrado pelo ar exterior sofrendo por isso trabalho, enquanto dissipa calor para exterior, ou seja:

$$\begin{aligned}dE_{in} &= 0 \\ Q &= W\end{aligned}\tag{1}$$

Assim o trabalho líquido realizado durante todo o processo deve ser exatamente igual a quantidade de energia transferida em forma de calor; a energia interna do sistema deve permanecer a mesma.

O trabalho pode ser escrito como

$$W = \int dw = \int_{V_i}^{V_f} PdV\tag{2}$$

É um motor térmico que trabalha a partir da energia proveniente da expansão e contração de um gás. De acordo com a lei dos gases ideais,

$$PV = nRT$$

A temperatura constante temos que

$$P = nRT \cdot \frac{1}{V} = (\text{constante}) \cdot \frac{1}{V}\tag{3}$$

Substituindo a Eq.3 na Eq.2 temos que

$$W = \int_{V_i}^{V_f} PdV = \int_{V_i}^{V_f} nRT \cdot \frac{1}{V} dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} dV = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)\tag{4}$$

Sendo assim

$$Q_2 = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

## 2-3 Aquecimento isocórico

Temos aqui um aquecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura de  $T_C$  para  $T_H$

Ocorre a transferência do gás que se encontra no pólo frio para o polo quente. Sendo o gás aquecido pela fonte de calor, a pressão deste aumenta, sem que haja no entanto, variação no volume durante o aumento de pressão, ou seja:

$$W = 0$$
$$q_1 = n C_v (T_H - T_C)$$

### 3-4 Expansão isotérmica

Devido à pressão acrescida no gás, este vai empurrar o pistão realizando assim, trabalho para o exterior enquanto absorve calor da fonte quente, ou seja:

$$dE_{in} = 0$$
$$Q_1 = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$$

### 4-1 Resfriamento isocórico

Há transferência do gás que se encontra no pólo quente para o pólo frio. Visto que o gás é agora arrefecido pelo sistema de arrefecimento, a pressão diminui sem que se verifique no entanto, variação no volume durante a diminuição da pressão, ou seja:

$$W = 0$$
$$q_2 = n C_v (T_C - T_H)$$

### Eficiência do motor

A eficiência do motor é dada por

$$\varepsilon = \frac{Q_s - Q_r}{Q_s}$$

Como

$$Q = W = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_s - Q_r}{Q_s} = \frac{nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - nRT_3 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = \frac{T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - T_3 \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Como  $V_2 = V_3$  e  $V_1 = V_4$  temos que  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (4)$$

## 7. Declaração do orientador

## 8. Horário da apresentação do painel

Dia 13/11 (Quarta-feira) no segundo horário, 17-19hs



