



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Física Gleb Wataghin

Maria Lucia Defendi, RA 086387

e-mail: maria.lucia.defendixgmail.com

Orientador: Prof. Dr. Alex Antonelli

<http://portal.ifi.unicamp.br/en/pessoas/corpo-docente/18-341>

Motor de Stirling



F609 – Tópicos de Ensino de Física I

Professor José J. Lunazzi

Campinas, 2013

Novembro de 2013

Índice

1. Resumo	[3]
2. Introdução	[3]
3. Descrição esquemática e teórica do trabalho	[4]
4. Resultados Atingidos	[9]
5. Registros	[9]
6. Dificuldades Encontradas	[13]
7. Pesquisa e Referências	[13]
8. Declaração do orientador	[15]
9. Anexos	[16]

1. Resumo

Este experimento consiste na reprodução de um motor de Stirling, que é construído a partir de conhecimentos básicos de termodinâmica no Ensino Médio, podendo ser usado para estudar ciclos termodinâmicos.

É de suma importância que os alunos visualizem o que lhes parece abstrato, dessa forma, podem aumentar sua compreensão em relação ao conteúdo trabalhado.

Logo, é relevante que eles possam observar experimentalmente o que lhes é proposto na teoria.

2. Introdução

Com a atual mecanização dos alunos em relação à resolução de exercícios, para que obtenham resultados positivos no vestibular, fazemos com que eles se apeguem a matemática e memorização de equações e deixem de lado o conceito físico envolvido de fato.

Coloquemos em destaque um dos conceitos trabalhados no Ensino Médio, a termodinâmica.

Muitos alunos ao estudarem tal conceito não estão interessados no que aquele um determinado processo representa, suas consequências e implicações, eles estão interessados em memorizar as equações que serão úteis e como aplicá-las.

Uma das formas, que acredito, ser válida para que o aluno de fato entenda o processo e não apenas decore algumas equações é a utilização de experiências.

Na termodinâmica, geralmente, não há muitas propostas de experiências, mas este projeto tem como intuito mostrar um modelo de motor de Stirling.

No Ensino Médio os alunos têm aulas sobre o ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas.

Apesar da diferença entre o ciclo de Carnot e o de Stirling, o experimento aqui proposto é uma forma de fazer o aluno entender o funcionamento de um ciclo termodinâmico, tornando mais fácil o entendimento do ciclo que ele verá em sala de aula.

O motor de Stirling foi desenvolvido em 1816 por Robert Stirling, opera silenciosamente com baixa emissão de poluentes e os modelos construídos para aplicações como

propulsão de veículos e geração de energia elétrica são semelhantes à queima de óleo Diesel.

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.

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.

3. Descrição esquemática e teórica do Trabalho

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

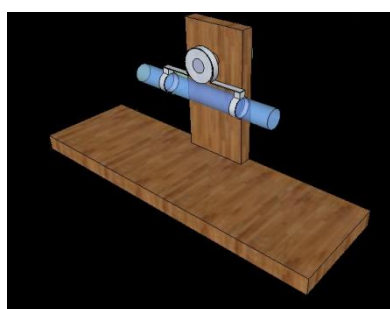
Por ser um motor de combustão externa, é uma máquina de ciclo fechado, cujo ciclo termodinâmico é composto de 4 fases: Compressão Isotérmica (Temperatura constante), Aquecimento Isométrico (Volume constante), Expansão Isotérmica e Resfriamento isométrico.

Com a finalidade de observar e visualizar, na medida do possível, estas fases mostramos o motor de Stirling seguindo algumas etapas.

Primeiramente fizemos um suporte de madeira que apresenta uma roldana usada para apoiar o suporte de metal onde será preso o tubo de ensaio



(a)



(b)

Figura 1.(a) Suporte de madeira (b) Suporte metálico juntamente com o tubo de ensaio

Para completar o motor, devemos acrescentar bolinhas de gude que irão deslizar durante o processo, uma rolha com um orifício por onde o ar passará de dentro do tubo de ensaio

para a seringa. A ligação entre a rolha e a seringa é feita por um elástico de uso médico (“tripa de mico”).

Neste ponto, observamos claramente que o fluido (ar), não sai em momento algum de dentro do motor, ou seja, ele circula entre o tubo de ensaio e a seringa.

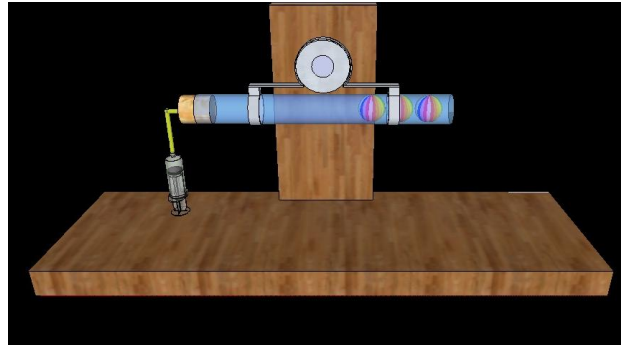


Figura 2. Motor de Stirling sem fonte de calor

Para finalizar o motor, basta que coloquemos uma fonte de calor. Nesse experimento usaremos uma latinha de metal abastecida com álcool e com um barbante, que quando aceso nos fornece calor para fazer funcionar o motor.

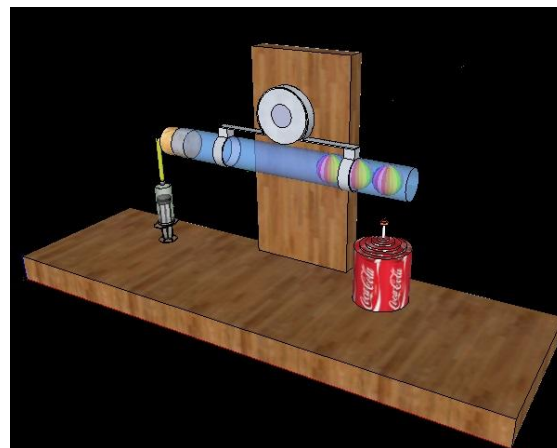


Figura 3. Modelo esquemático do motor de Stirling

Agora que definimos como é o modelo do motor de Stirling, podemos entender seu funcionamento, relacionando-o com as 4 fases do ciclo.

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

- a) 1-2: Aquecimento a volume constante para completar o ciclo

- b) 2-3: Expansão isotérmica a uma temperatura T_c
- c) 3-4: Resfriamento a volume constante
- d) 4-1: Compressão isotérmica a uma temperatura T_H

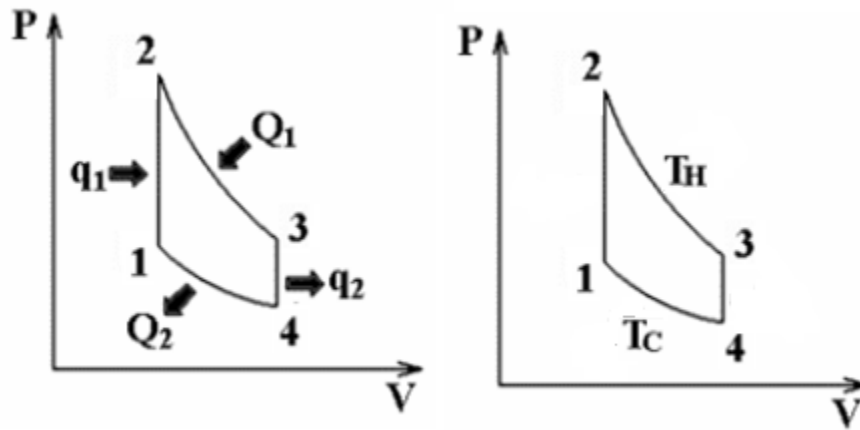


Figura 4. Ciclo de Stirling

1-2 Aquecimento isocórico

Inicialmente o tubo de ensaio com as bolinhas de gude estão deslocados para perto da fonte de calor. Temos, portanto, um aquecimento isocórico, ou seja, 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 polo frio (vamos considerar o polo frio como sendo o ambiente externo) para o polo quente (fonte de calor). 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:

$$W = 0$$

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

2-3 Expansão isotérmica

Finalizado o processo de aquecimento isocórico, começamos o processo de expansão isotérmica a temperatura T_H .

Neste estágio o tubo de ensaio e as bolinhas de gude se afastam da fonte de calor abaixando o embolo da seringa.

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:

$$\begin{aligned}dE_{in} &= 0 \\ Q &= W\end{aligned}\quad (1)$$

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

O trabalho pode ser escrito como

$$W = \int dw = \int_{V_i}^{V_f} P dV \quad (2)$$

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

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

Substituindo a Eq.3 na Eq.2 temos que

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

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

Sendo assim

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

3-4 Resfriamento isocórico

Como o tubo de ensaio está afastado da fonte de calor há transferência do gás que se encontra no polo quente para o polo 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:

$$W = 0$$

$$q_2 = n C_v (T_c - T_H)$$

4-1 Compressão 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:

$$dE_{in} = 0$$

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

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 $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$

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

4. Resultados atingidos

O motor funcionou como esperado.

Apesar de não ser um motor ideal, podemos considerar que o modelo teórico e o prático se aproximam muito, portanto, a teoria utilizada para descrevê-lo pode ser aplicada.

Portanto, como proposto anteriormente, podemos utilizar este modelo com os alunos do Ensino Médio.

O resultado pode ser verificado no vídeo disponível em:

<http://www.youtube.com/watch?v=OBufdY3u4gl>

5. Registros

O decorrer da montagem do experimento foi registrada por meio de fotografias, que serão mostradas a seguir.



Figura 5. Material Utilizado

As Figuras de 6 a 12 referem-se à Parte 1 da montagem do experimento, que é envernizar a madeira, para finalizar o suporte, como proposto na Figura 1.



Figura 6



Figura 7



Figura 8



Figura 9



Figura 10



Figura 11



Figura 12

As Figuras de 13 a 15 referem-se à Parte 2 da montagem do experimento, prender o suporte de metal ao tubo de ensaio, como proposto na Figura 2



Figura 13

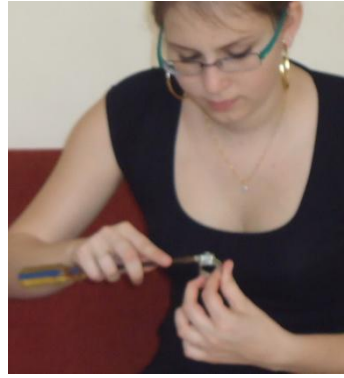


Figura 14



Figura 15

As Figuras de 16 a 18 referem-se à Parte 3 da montagem do experimento, vedar o tubo de ensaio.

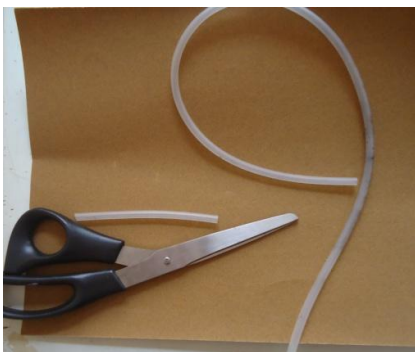


Figura 16



Figura 17

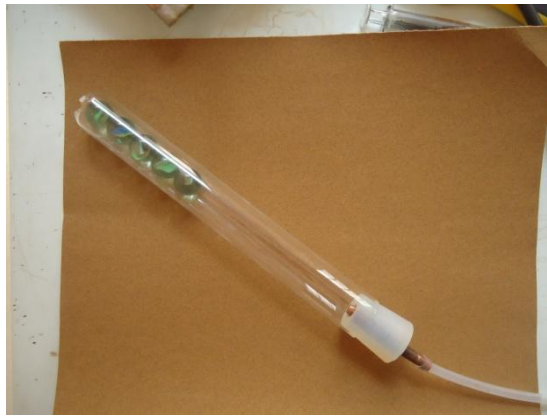


Figura 18

As Figuras de 19 a 21 referem-se à Parte 4 da montagem do experimento, que é colocar o tubo de ensaio no suporte e colocar a seringa de vidro (vide Figura 3).



Figura 19

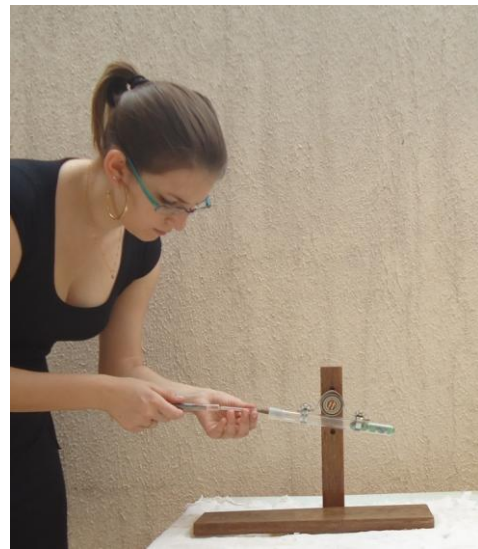


Figura 20



Figura 21. Motor de Stirling sem a fonte de calor

6. Dificuldades encontradas

O modelo apresentou algumas dificuldades que serão destacadas abaixo.

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

Resolvido o problema do tamanho do tubo, tive que encontrar o numero 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.

A posição da seringa foi outro problema, pois quando a trocava de posição, o motor parava de funcionar.

7. Pesquisa e Referências

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: Tratamento quantitativo do modelo

Tratamento matemático do motor

<http://eccehomo.me/mleft/2ano/fex3/FEX3_TL2-Stirling.pdf/anexo2>

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>/anexo3>

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.susa.org/>> anexo 4>

Referências

Wikipédia (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> - 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> 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> 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> - 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

8. Declaração do orientador

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

“O Relatório Parcial referente ao Projeto da aluna Maria Lucia Defendi para a disciplina F 609 mostra que os objetivos iniciais propostos estão sendo plenamente atingidos. O Relatório Parcial indica que uma primeira realização experimental do motor de Stirling foi obtida com sucesso. Em seguida, a aluna Maria Lucia Defendi irá melhorar outra possível realização desse motor, a qual já foi tentada anteriormente, mas que não obteve sucesso. O Relatório Parcial também mostra um desenvolvimento teórico da Termodinâmica envolvida no experimento, utilizando a hipótese que o gás utilizado no experimento possa ser aproximado por um gás ideal. No meu entender este Relatório Parcial demonstra que o Projeto está sendo bem executado e que atingirá seus objetivos”.

9. Anexos

Anexo 1	[17]
Anexo 2	[19]
Anexo 3	[44]
Anexo 4	[46]

Vacanca - Ferienhäuser

www.vacanca.com

Über 1000 Feriendomizile weltweit direkt zu vermieten oder verkaufen.

howstuffworks
comotudofunciona

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar

com Google

TUDO SOBRE

Ambiente

Carros

Ciência

- Aplicações militares
- Arqueologia e paleontologia
- Ciências da Terra
- Ciências da vida
- Ciências naturais
- Engenharia
- Espaço

Crianças

Eletrônicos

Empresas e Finanças pessoais

Entretenimento

Esporte

Informática

Saúde

Sociedade e Cultura

Sua casa

Viagem

shoppinghsw

As melhores ofertas

GUIA DE COMPRAS

Dicas sobre produtos

VÍDEO

Artigos e reportagens

QUIZ

O que você sabe?

BLOG

A no Polar

Eurocopa

Gadgets

Verão abaixo de zero

BOLETIM POR E-MAIL

Digite seu e-mail

OK

Principal > Ciência > Engenharia

imprimir enviar por e-mail

Como funcionam os motores Stirling

por [Karim Nice](#) - traduzido por HowStuffWorks Brasil

Neste artigo

1. Introdução
2. **O ciclo Stirling**
3. Motor Stirling tipo deslocador
4. Motor Stirling de dois pistões
5. Por que os motores Stirling não são mais comuns?
6. Mais informações
7. Veja todos os artigos sobre Engenharia

O ciclo Stirling

O princípio fundamental de um motor Stirling é que **uma quantidade fixa de gás é encerrada no interior do motor**. O ciclo Stirling envolve uma série de eventos que alteram a pressão do gás no interior do motor, fazendo com que ele funcione.

Há diversas propriedades dos gases que são essenciais para o funcionamento dos motores Stirling:

- se você tiver uma quantidade fixa de gás em um volume fixo de espaço e a temperatura desse gás aumentar, a pressão também irá aumentar;
- se você tiver uma quantidade fixa de gás e comprimi-lo (diminuir o volume de seu espaço), a temperatura desse gás irá aumentar.

Vamos analisar cada parte do ciclo Stirling enquanto conhecemos um motor Stirling simplificado. O motor simplificado usa dois cilindros. Um cilindro é aquecido por uma fonte de calor externa (como uma fogueira) e o outro é resfriado por uma fonte externa de resfriamento (como gelo). As câmaras de gás dos dois cilindros são conectadas e os pistões são conectados um ao outro mecanicamente por uma articulação que determina como eles se movimentarão entre si.

ASSUNTOS RELACIONADOS

- [Buscar imagens de ciclo Stirling](#)
- [Como funcionam os motores rotativos](#)
- [Como funcionam os motores 2-tempos](#)
- [Como funcionam os motores de carros](#)

Publicidade

bikini.com

Faça as compras para os últimos estilos de biquíni em bikini.com!

Das GastgeberNet

www.gastgeber.net

Über 20.000 Ferienwohnungen auf 7.000 Seiten.



Há quatro partes no ciclo Stirling. Os dois pistões na animação acima passam por todas as partes do ciclo:

1. calor é adicionado ao gás no interior do cilindro aquecido (à esquerda), causando a elevação da pressão. Isso força o pistão a se mover para baixo. Essa é a parte do ciclo Stirling que realiza trabalho;
2. o pistão esquerdo se move para cima enquanto o pistão direito se move para baixo. Isso empurra o gás aquecido para o cilindro resfriado, o que resfria rapidamente o gás para a temperatura igual a da fonte de resfriamento, baixando também sua pressão. Isso facilita comprimir o gás na próxima parte do ciclo;
3. o pistão no cilindro resfriado (direito) começa a comprimir o gás. O calor gerado por essa compressão é removido pela fonte de resfriamento;
4. o pistão direito se move para cima enquanto o pistão esquerdo se move para baixo. Isso força o gás para o interior do cilindro aquecido, onde se aquece rapidamente, aumentando a pressão, ponto no qual o ciclo se repete.

O motor Stirling somente gera **potência** durante a primeira parte do ciclo. Há duas maneiras principais de aumentar a geração de potência.



- **Aumentar a geração de potência no estágio 1** - na parte 1 do ciclo, a pressão do gás aquecido empurrando o pistão realiza trabalho. Aumentar a temperatura durante essa parte do ciclo aumentará a geração de potência do motor. Uma maneira de aumentar a pressão é por meio do aumento da temperatura do gás. Quando dermos uma olhada em um motor Stirling mais adiante, veremos como um dispositivo chamado **regenerador** pode melhorar a geração de potência do motor ao armazenar calor temporariamente.
- **Diminuir o consumo de potência no estágio 3** - na parte 3 do ciclo, os pistões realizam trabalho sobre o gás, consumindo uma parte da potência produzida na parte 1. Baixar a pressão durante esta parte do ciclo pode diminuir a potência consumida durante esse estágio do ciclo, aumentando efetivamente a geração de potência do motor. Um modo de diminuir a pressão é resfriar o gás para uma temperatura mais baixa.

Esta seção descreveu o motor Stirling ideal. Os motores reais trabalham variando o ciclo levemente por causa das limitações de seu projeto. Nas próximas seções, vamos conhecer alguns tipos diferentes de motores Stirling. O motor tipo deslocador é provavelmente o mais fácil de se entender, assim, começaremos com ele.

[< ANTERIOR](#)

[INTRODUÇÃO](#)

[PRÓXIMA >](#)

Neste artigo

1. Introdução
2. **O ciclo Stirling**
3. Motor Stirling tipo deslocador
4. Motor Stirling de dois pistões
5. Por que os motores Stirling não são mais comuns?
6. Mais informações
7. Veja todos os artigos sobre **Engenharia**

FERRAMENTAS

[IMPRIMIR](#) | [ENVIAR POR E-MAIL](#) | [COMO CITAR ESTE ARTIGO](#)
[AVALIE ESTE ARTIGO](#)

FAVORITOS

[▲ Faça do HowStuffWorks a sua página inicial](#) | [digg it! \(?\)](#) | [del.icio.us](#)

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar com

Adicione aos favoritos

ComoTudoFunciona em sua página inicial

Boletim por e-mail |

Widgets:

Relatório de Física Experimental III
2004/2005

Engenharia Física Tecnológica

MOTOR DE STIRLING

Estudo de um motor térmico

Trabalho realizado por:
Ricardo Figueira, nº53755;
André Cunha, nº53757
Tiago Marques, nº53775

Grupo 1; 3ªfeira 16-20h

Lisboa, 19 de Abril de 2005

O trabalho descrito neste relatório destina-se a analisar o comportamento termodinâmico do chamado **motor de Stirling**. Inventado por Robert Stirling no início do século XIX, este tipo de motor é caracterizado pela sua capacidade de gerar movimento através do aproveitamento do comportamento termodinâmico de um gás submetido a uma oscilação térmica periódica.

O funcionamento do **motor de Stirling** pode ser descrito por um ciclo com o mesmo nome que consiste em quatro fases: **contração**, **aquecimento**, **expansão** e **arrefecimento** (obviamente, estes termos são relativos ao gás em uso no motor). Graficamente, podemos representar este ciclo da seguinte forma:

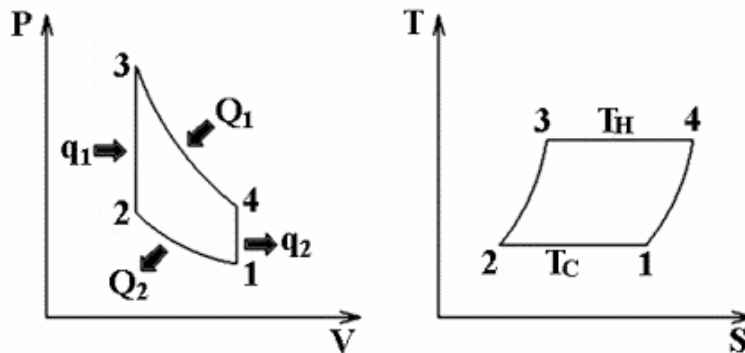


Figura 1: Diagrama PV e TS de um ciclo de Stirling

Teoricamente, para as mesmas temperaturas, o **ciclo de Stirling** em condições ideais possui o mesmo grau de eficiência que o **ciclo de Carnot**, ou seja:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}.$$

Antes de descrever em detalhe as diferentes fases do **ciclo de Stirling**, é importante descrever o aparato usado. Naturalmente, dada a simplicidade do conceito base, existem várias abordagens para criar um motor que se enquadre nesta classe. Desta forma, os engenheiros classificaram-nos em três configurações distintas: alfa, beta e gamma.

Neste procedimento experimental usou-se um **motor de Stirling do tipo beta**. Esta configuração consiste num cilindro cujas extremidades são pólos térmicos (num temos uma fonte de calor e no outro, um sistema de arrefecimento). O gás usado, o ar, é transferido entre os dois pólos térmicos através de um êmbolo deslocador (que contém um regenerador que aumenta a eficiência térmica do motor,) cujo movimento não altera o volume do gás mas se limita a transferi-lo entre os dois pólos. O pistão e o êmbolo deslocador movem-se de acordo com o mesmo eixo e estão ambos ligados a uma roda giratória que sincroniza a sua acção.

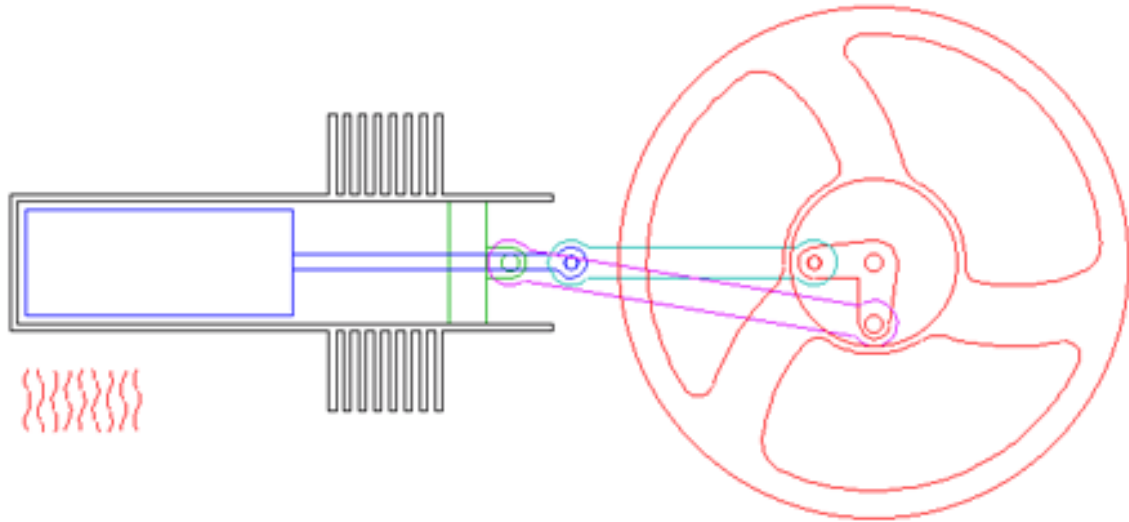
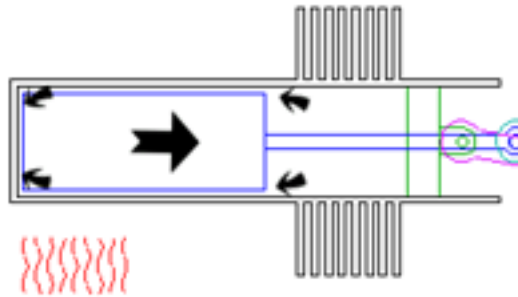


Figura 2: Esquema de um motor de Stirling do tipo beta

Ciclo de Stirling:

- Aquecimento Isocórico (fase 2 – 3):

(Um aquecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura de T_C para T_H .)

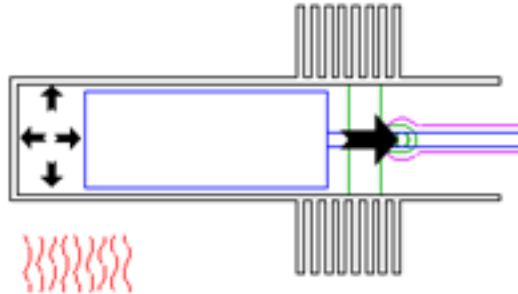


O êmbolo deslocador transfere o gás que se encontra no pólo frio para o pólo quente. Sendo o gás aquecido pela fonte de calor, a pressão deste aumenta, sem que haja no entanto, variação no volume durante o aumento de pressão, ou seja:

$$W = 0 \quad q_1 = n \cdot C_V \cdot (T_H - T_C).$$

- Expansão Isotérmica (fase 3 – 4):

(Uma expansão a temperatura constante T_H , aumentando assim o volume de V_m para V_M , durante a qual o gás realiza trabalho.)

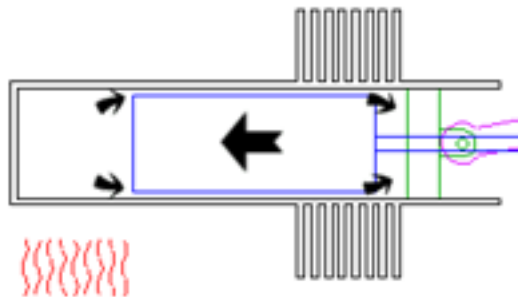


Devido à pressão acrescida no gás, este vai empurrar o pistão realizando assim, trabalho para o exterior enquanto absorve calor da fonte quente, ou seja:

$$dU = 0 \quad Q_1 = n \cdot R \cdot T_H \cdot \ln\left(\frac{V_M}{V_m}\right).$$

- Arrefecimento Isocórico (fase 4 – 1):

(Um arrefecimento do gás a volume constante, aumentando assim a temperatura de T_H para T_C .)

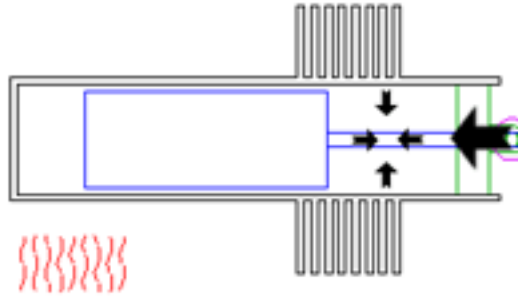


O êmbolo deslocador transfere agora o gás que se encontra no pólo quente para o pólo frio. Visto que o gás é agora arrefecido pelo sistema de arrefecimento, a pressão diminui sem que se verifique no entanto, variação no volume durante a diminuição da pressão, ou seja:

$$W = 0 \quad q_2 = n \cdot C_V \cdot (T_C - T_H).$$

- Contração Isotérmica, (fase 1 – 2):

(Uma contração a temperatura constante T_C , diminuindo assim o volume de V_M para V_m , durante a qual o exterior realiza trabalho sob o gás.)



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:

$$dU = 0 \quad Q_2 = n \cdot R \cdot T_C \cdot \ln\left(\frac{V_m}{V_M}\right).$$

Modelo teórico adaptado

No entanto, na realidade o modelo ideal atrás descrito está longe de ser uma interpretação fiel do motor usado dada as inúmeras insuficiências existentes no motor real. No motor usado, ao contrário do que acontece no motor ideal, não podemos garantir a reversibilidade das transformações atrás descritas. Como tal, para tentar descrever matematicamente o diagrama PV do motor real e tendo:

$$V = V_m + (V_M - V_m) \cdot \frac{\cos(\omega \cdot t)}{2} \quad \text{e} \quad V_1 = \frac{(V_M \cdot V_m)}{V_M + V_m} \cdot (1 - \sin(\omega \cdot t)).$$

aplicando a Lei dos Gases Perfeitos a ambos os casos temos ainda:

$$P \cdot V_1 = n_1 \cdot R \cdot T_H \quad \text{e} \quad P \cdot (V - V_1) = (n - n_1) \cdot R \cdot T_C$$

então chegamos a:

$$P(t) = n \cdot R \cdot \frac{1}{\frac{V(t) - V'(t)}{T_c} + \frac{V'(t)}{T_q}}$$

A partir desta abordagem vai ser possível calcular um rendimento mais próximo do real.

Introdução Experimental

Neste trabalho destacam-se dois objectivos complementares:

- O estudo do motor de Stirling como **máquina térmica**, ou seja, utilizá-lo para converter energia térmica da fonte quente em energia mecânica.
- O estudo do motor de Stirling como **bomba de calor**, ou seja, a capacidade do aparato de, através do fornecimento de energia mecânica, conseguir transferir energia térmica de uma fonte para outra a maior temperatura.

No primeiro caso, vai-se calcular as várias potências ao longo do ciclo, de forma a obter o valor do rendimento do motor. Também vai ser possível estimar as potência das perdas totais e das perdas devido a atritos inerentes ao próprio aparato experimental.

Comparando os valores experimentais com os teóricos pretende-se estudar o comportamento deste motor de Stirling como máquina térmica.

Finalmente, iremos testar quais dos dois modelos teóricos descritos se adapta melhor ao motor utilizado.

Na segunda parte, vai ser possível obter uma estimativa da eficiência do motor, com base numa extrapolação da potência mecânica do motor exterior. Nesta extrapolação iremos entrar em consideração com os valores das perdas devido a atritos internos, obtidas na actividade anterior.

Procedimento Experimental

Antes de se começar a trabalhar com o motor propriamente dito, foi necessário efectuar uma calibração do aparelho que media o valor da força do travão Prony. Para tal colocaram-se pequenos pesos de diferentes massas e observou-se era o valor que o multímetro indicava para o peso dos corpos (Tabela 1). Assim, foi possível determinar qual a relação entre o valor indicado pelo multímetro e a força exercida pela barra (**F**). Posteriormente, mediu-se o valor do comprimento do braço do travão (**b**).

Seguidamente verificou-se o correcto funcionamento da bomba de água que garantirá ao longo do procedimento a existência de uma fonte fria, uma vez que esta é indispensável para o funcionamento do motor de Stirling. De seguida, forneceu-se uma tensão de alimentação, aproximadamente 12 V, à resistência de aquecimento e, à medida que a mesma ia entrando em incandescência, procederam-se a várias tentativas para colocar o motor em funcionamento.

Uma vez em funcionamento, aguardou-se que a temperatura da fonte quente (resistência de aquecimento) estabilizasse, o que indicava o funcionamento regular do motor, caracterizado por uma velocidade de rotação constante.

Procedeu-se, então, à aplicação do sistema de travagem que permitirá determinar o trabalho que é possível extrair do motor naquelas condições de funcionamento. O sistema de travagem foi cuidadosamente regulado, apertando/desapertando os parafusos que fazem variar a força imposta, garantido sempre a horizontalidade das barras do travão, de modo a extrair a máxima força possível sem comprometer o funcionamento regular da máquina.

Uma vez tudo preparado, deu-se início às medições. Recorrendo a dois multímetros registou-se a tensão de alimentação (**V**) da resistência de aquecimento assim como a respectiva intensidade de corrente (**I**). Mediu-se ainda noutro pequeno voltímetro um valor (**V'**) proporcional à força (**F**) que o travão exerce sobre o motor. Recorrendo ao computador e ao programa de aquisição de dados Cassy a funcionar no modo multímetro, mediu-se a temperatura da fonte quente (**T_{FQ}**), a temperatura à entrada da fonte fria (**T_{FF}**) e a diferença de temperaturas entre a água à entrada e à saída do sistema de arrefecimento (**ΔT**). Registou-se ainda com um cronómetro o tempo necessário (**t_{caudal}**) à passagem de 100 ml de água pelo sistema de arrefecimento, para se determinar o caudal. De novo no computador, mediu-se o período (**T_{ciclo}**) de um ciclo completo do motor no modo osciloscópio e calculou-se área (**A**) do diagrama PV correspondente a um ciclo no modo X-Y.

De seguida, incrementou-se o valor de tensão de alimentação à resistência de aquecimento, aumentando a potência térmica desta, e realizou-se o mesmo procedimento que o descrito anteriormente, medindo as mesmas grandezas.

Realizadas todas as medições, preencheu-se a Tabela 2, soltou-se o travão do motor e desligou-se a fonte de alimentação da resistência o que levou à paragem gradual do motor.

Análise de Resultados

Com base nos dados da Tabela 1, traçou-se o Gráfico 1 no programa *Origin*, determinando-se assim a relação entre o valor lido no multímetro e a força exercida.

De seguida calculou-se a potência térmica (P_T) fornecida ao motor, na resistência de aquecimento, sabendo a tensão de alimentação e a sua corrente, bem como o seu erro (Tabela 4):

$$P_T = V \cdot I ;$$
$$\varepsilon_{P_T} = |I| \cdot \varepsilon_V + |V| \cdot \varepsilon_I .$$

Para o cálculo da potência mecânica (P_{MEC}) exercida sobre a barra (Tabela 5), calculou-se primeiro a frequência de funcionamento do motor:

$$f = \frac{1}{T_{ciclo}} ;$$
$$\varepsilon_f = \left| \frac{1}{T_{ciclo}} \right| \cdot \varepsilon_{T_{ciclo}} .$$

Posteriormente, usando os dados retirados do Gráfico 1, foi possível determinar a força exercida pela barra no travão de Prony em função do valor lido no multímetro:

$$F = \frac{V'-B}{A} ;$$
$$\varepsilon_F = \left| \frac{1}{A} \right| \cdot \varepsilon_{V'} + \left| \frac{1}{A} \right| \cdot \varepsilon_B + \left| \frac{V'-B}{A^2} \right| \cdot \varepsilon_A .$$

Consegue-se, assim, calcular a força exercida pela barra, permitindo-nos calcular a potência mecânica extraída através da relação:

$$P_{Mec} = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial (F \cdot x)}{\partial t} = F \frac{\partial x}{\partial t} = F \cdot v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot b \cdot F ;$$
$$\varepsilon_{P_{Mec}} = 2 \cdot \pi \cdot \left(|b \cdot F| \cdot \varepsilon_f + |b \cdot f| \cdot \varepsilon_F + |f \cdot F| \cdot \varepsilon_b \right) .$$

Para se obter o calor absorvido por unidade de tempo pela fonte fria e a potência dissipada para a mesma (P_D), (Tabela 6), calculou-se, inicialmente, o caudal (C) que atravessa o sistema de arrefecimento por:

$$C = \frac{mH_2O}{t_{caudal}};$$

$$\varepsilon_C = \left| \frac{1}{t_{caudal}} \right| \cdot \varepsilon_{mH_2O} + \left| \frac{mH_2O}{t_{caudal}^2} \right| \varepsilon_{tcaudal}.$$

É importante referir que não se mediu a massa da água como indicada na fórmula e na tabela, mas sim o volume desta em ml. No entanto, como a massa volúmica da água é de aproximadamente 1 g.cm^{-3} , é fácil determinar a sua massa. De seguida usou-se a seguinte relação:

$$P_D = \frac{dQ}{dt} = C \cdot c \cdot \Delta T;$$

$$\varepsilon_{P_D} = |\Delta T \cdot c| \cdot \varepsilon_C + |C \cdot c| \cdot \varepsilon_{\Delta T}.$$

Onde c é a capacidade calorífica da água (1 cal/g°).

Finalmente, para se obter a potência mecânica fornecida pelo fluído (P_F) ao êmbolo (Tabela 7), calculou-se o trabalho (W) que este realiza sobre o êmbolo a partir da área do diagrama PV. Importante referir que neste diagrama, o volume não vem em m^3 , mas sim em m pois mede o deslocamento do pistão. Este valor é, no entanto, representativo de um volume uma vez que a área do pistão é constante.

$$W = \int p \cdot dV = \int p \cdot d(\pi \cdot r^2 \cdot s) = \pi \cdot r^2 \cdot \int p \cdot ds = \pi \cdot r^2 \cdot A;$$

E por fim:

$$P_F = W \cdot f;$$

$$\varepsilon_{P_F} = W \cdot \varepsilon_f.$$

Uma vez que a frequência de funcionamento do motor nos dá o número de ciclos por unidade de tempo, o seu produto pelo trabalho vai-nos dar o trabalho por unidade de tempo, ou seja, a potência.

Para o cálculo dos rendimentos, considerou-se o rendimento máximo ($\eta_{\text{reversível}}$) que seria obtido caso todas as transformações fossem reversíveis e não existissem perdas de energia ao longo do ciclo:

$$\eta_{\text{reversível}} = \frac{W}{Q_T} = \frac{n \cdot R \cdot T_{FQ} \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right) - n \cdot R \cdot T_{FF} \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)}{n \cdot R \cdot T_{FF} \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FQ}};$$

$$\varepsilon_{\eta\text{-reversível}} = \left| \frac{1}{T_{FQ}} \right| \cdot \varepsilon_{TFF} + \left| \frac{T_{FF}}{T_{FQ}^2} \right| \cdot \varepsilon_{TFQ}.$$

Contudo, se em vez de considerarmos o ciclo reversível, optarmos pelo modelo teórico, descrito na introdução, mais aproximado ao nosso motor de Stirling, o rendimento (η_{aprox}) é obtido por:

$$\eta_{\text{aprox}} = \frac{P_{\text{Teórica}}}{P_T};$$

$$\varepsilon_{\eta\text{-aprox}} = \left| \frac{1}{P_T} \right| \cdot \varepsilon_{P_{\text{Teórica}}} + \left| \frac{P_{\text{Teórica}}}{P_T^2} \right| \cdot \varepsilon_{PT}.$$

A potência teórica é calculada sabendo a frequência de funcionamento do motor e o $W_{\text{teórico}}$ (Tabela 8). O $W_{\text{teórico}}$ é obtido através da integração do diagrama PV do modelo teórico no programa *Mathematica* (Apêndice 1). Esses mesmos diagramas podem ser vistos nos Gráficos 1 e 2.

$$P_{\text{Teórica}} = W_{\text{teórico}} \cdot f;$$

$$\varepsilon_{P_{\text{teórica}}} = W_{\text{teórico}} \cdot \varepsilon_f.$$

O rendimento real (η_{real}) é dado pela razão entre a potência mecânica e a potência térmica fornecida à resistência de aquecimento:

$$\eta_{\text{real}} = \frac{P_{\text{Mec}}}{P_T};$$

$$\varepsilon_{\eta\text{-real}} = \left| \frac{1}{P_T} \right| \cdot \varepsilon_{P_{\text{Mec}}} + \left| \frac{P_{\text{Mec}}}{P_T^2} \right| \cdot \varepsilon_{PT}.$$

Consegue-se obter um rendimento superior ($\eta_{\text{melhorado}}$), se em vez de considerarmos o trabalho realizado pela barra (que se traduz na potência mecânica previamente calculada), tomarmos em conta o valor do trabalho realizado pelo fluido (potência do fluido). Desta forma, segue que:

$$\eta_{\text{melhorado}} = \frac{P_F}{P_T} ;$$

$$\varepsilon_{\eta\text{-melhorado}} = \left| \frac{1}{P_T} \right| \cdot \varepsilon_{PF} + \left| \frac{P_F}{P_T^2} \right| \cdot \varepsilon_{PT} .$$

Os rendimentos podem ser comparados na Tabela 9.

É também importante calcular as perdas energéticas por unidade de tempo referentes ao motor utilizado (Tabela 10). Para tal, considerámos a diferença entre a potência realizada pelo fluido e a potência mecânica da barra, como perdas devidas ao atrito intrínseco ao aparato experimental (P'_{FA}):

$$P'_{FA} = P_F - P_{Mec} ;$$

$$\varepsilon_{P'_{FA}} = \varepsilon_{PF} + \varepsilon_{PMec} .$$

Para se obter as perdas totais considerou-se:

$$P'_{Total} = P_T - P_{Mec} - P_D ;$$

$$\varepsilon_{P'_{Total}} = \varepsilon_{PT} + \varepsilon_{PMec} + \varepsilon_{PD} .$$

Actividade 2

Procedimento Experimental

Nesta parte do trabalho, o motor irá funcionar como bomba de calor, sendo actuado por um motor eléctrico exterior através de uma correia de transmissão.

Começou-se por colocar a correia na posição correcta, ligando-se de seguida o motor eléctrico por forma ao motor de Stirling rodar na mesma sentido do caso anterior.

Deixou-se o sistema a funcionar até a temperatura junto da resistência de aquecimento chegar a uma temperatura inferior à ambiente em 10°C (o que correspondeu a aproximadamente 12°C). De seguida, aplicou-se uma tensão de 2V (com uma fonte que permitia um ajuste mais preciso que a usada na actividade anterior) e foi-se regulando de modo a que a temperatura junto da fonte quente atingisse um valor aproximado da temperatura ambiente (22°C).

De novo, aguardou-se que o valor de temperatura estabilizasse, o que corresponde a uma situação de equilíbrio. Procedeu-se ao registo do valor da tensão de alimentação (V) da resistência e da sua corrente (I), bem como da temperatura junto a esta (T_{FQ}) e da diferença de temperaturas entre a água à entrada e à saída do sistema de arrefecimento (ΔT). Voltou-se a repetir o procedimento para a determinação do caudal da água que passava pelo sistema de arrefecimento, uma vez que este pode ter variado durante a experiência. De novo com a ajuda do programa Cassy, observou-se o diagrama PV e calculou-se a sua área (A) e do gráfico da variação temporal da posição do pistão determinou-se o período do ciclo (T_{ciclo}).

Preencheu-se a Tabela 3 com todas estas medições.

Análise dos Resultados

A potência de refrigeração (P_T) (Tabela 11) é calculada exactamente da mesma forma que a potência térmica fornecida ao motor da alínea anterior. Tal acontece pois, a tensão aplicada aos terminais da resistência vai permitir que a fonte quente permaneça a uma temperatura constante (próxima da ambiente), compensando o efeito de refrigeração. Se a resistência estivesse desligada a temperatura junto a ela iria descer atingindo temperaturas negativas.

A potência fornecida à fonte fria (P_D) (Tabela 12) e a potência realizada pelo fluido (P_F) (Tabela 13) também são calculadas de modo idêntico às da actividade anterior.

É, no entanto, bastante complicado determinar experimentalmente a potência realizada pelo motor exterior (P_{Motor}). Para uma estimativa aproximada considerou-se que esta seria a potência realizada pelo fluido no êmbolo juntamente com as perdas por unidade de tempo no motor, devido a atrito interno:

$$P_{Motor} = P_F + P'_{FA};$$

$$\mathcal{E}_{PMotor} = \mathcal{E}_{PF} + \mathcal{E}_{P'FA}.$$

Esta estimativa é razoável, uma vez que se não houvessem estas tais perdas, toda a potência realizada pelo motor exterior iria ser convertida em potência do fluido.

A eficiência da bomba de calor será, então, dada por:

$$eff = \frac{P_D}{P_{Motor}};$$

$$\cdot \mathcal{E}_{eff} = \left| \frac{1}{P_{Motor}} \right| \cdot \mathcal{E}_{PD} + \left| \frac{P_D}{P_{Motor}^2} \right| \cdot \mathcal{E}_{PMotor}.$$

A potência do motor e a eficiência encontram-se calculadas na Tabela 14.

Na primeira actividade do trabalho, onde se estudou o comportamento de um motor de Stirling a funcionar como máquina térmica, procedeu-se ao estudo aprofundado de dois ensaios distintos nos quais se variou a potência fornecida à fonte quente.

No primeiro ensaio, obteve-se para potência térmica o valor de $124,34 \pm 0,607$ W (erro de 0,49%) tendo-se estimado apenas $1,67 \pm 0,0289$ W (erro de 1,73%) para a potência mecânica extraída do motor. Estes valores resultam num rendimento real muito baixo, cerca de 1,34%. Se em vez de considerarmos a potência mecânica fornecida, levarmos em conta a potência exercida pelo fluido no êmbolo ($6,15 \pm 0,040$ W), obtemos um rendimento melhorado, cerca de 4,95%. Esta melhoria no resultado, deve-se ao facto de tomarmos em consideração as perdas de energia geradas por atrito interno.

Para os rendimentos teóricos, obtemos, se considerarmos todas as transformações no ciclo reversíveis, o rendimento exagerado de 50,3% e se considerarmos o modelo teórico aproximado descrito anteriormente, 34,88%.

No segundo ensaio, obteve-se um rendimento real ligeiramente superior (1,87%) mas muito aquém dos calculados teoricamente (54,6% para o ciclo reversível e 36,26% para o modelo aproximado). Para o rendimento melhorado obteve-se o valor de 5,73%.

Comparando os resultados em ambos os ensaios, observou-se que os rendimentos experimentais subiram ligeiramente o que está de acordo com os resultados teóricos que também previam esta melhoria. Tal deveu-se a um aumento significativo da temperatura da fonte quente aumentando apenas ligeiramente a temperatura da fonte fria, o que resulta num melhor rendimento da máquina térmica.

No que toca a perdas, estimaram-se para perdas devido ao atrito interno 4,48 W e 6,58W (para o ensaio 1 e 2 respectivamente) e 80,36W e 118,4W para as perdas totais, que englobam as perdas de calor no êmbolo e na fonte quente, bem como, as perdas devido à deficiente estanquicidade do êmbolo, para além, das já referidas, perdas provocadas pelas forças de atrito internas. Observou-se, assim, um aumento das perdas com o aumento da frequência de funcionamento do motor, o que seria de esperar.

Em relação ao funcionamento do motor de Stirling como bomba de calor (segunda actividade do trabalho), obteve-se um valor de $4,563 \pm 0,07541$ W para a potência de refrigeração, $12,3 \pm 1,39$ W para a potência rejeitada para a fonte fria e $3,91 \pm 0,017$ para a potência realizada pelo fluido no êmbolo. Seria de esperar que o valor da potência dissipada para a fonte fria fosse, aproximadamente a soma das outras duas potências referidas, o que não aconteceu (diferença de 3,827 W, 31% de P_D). Esta diferença de valores aponta, mais uma vez, para a existência de perdas de energia ao longo do ciclo.

Em relação à estimativa do valor da potência do motor exterior obteve-se 9,44 W. Esta estimativa foi feita com base na média das potências dissipadas por atrito interno da actividade anterior e na potência exercida pelo fluido no êmbolo.

Sabendo a potência do motor, foi possível obter a eficiência da bomba de calor, cujo resultado foi de 1,31. Este valor indica que se consegue dissipar para a fonte fria 1,3 J de calor por cada Joule de trabalho realizado sobre o motor de Stirling. Este resultado vem confirmar um dado que já era sabido de que o motor de Stirling funciona melhor como bomba de calor do que como máquina térmica.

Finalmente, através da observação dos diagramas PV, constatou-se que estes em nada se assemelhavam aos do ciclo reversível do motor de Stirling, constituídos por duas isocóricas e duas isotérmicas. Na realidade, as transformações isocóricas pareciam ocorrer instantaneamente, não se observando nenhuma recta vertical como seria de esperar. Infelizmente, não foi possível obter nenhuma imagem dos diagramas obtidos, embora seja possível recorrer aos Gráficos 1 e 2 que são uma boa aproximação dos resultados observados. Desta forma, nota-se uma maior proximidade entre o model teórico adaptado e o motor real.

Este trabalho tinha como objectivos, o estudo de um motor de Stirling tipo Beta como máquina térmica e como bomba de calor.

De uma maneira geral, pode dizer-se que os resultados obtidos estão dentro do esperado, não tendo ocorrido nenhum problema durante as medições.

Em relação ao funcionamento do motor como máquina térmica observou-se que este apresenta rendimentos muito baixos. Mesmo os rendimentos teóricos mais optimistas, ciclo reversível, apresentam valores pouco superiores aos 50%.

No entanto, os resultados obtidos foram muito inferiores aos valores teóricos (entre 1% e 2%) o que mostrou a necessidade da adopção de um modelo mais aproximado ao motor utilizado.

Quando se calculou os rendimentos deste novo modelo, obtiveram-se valores mais baixos (cerca de 35%) e próximos dos obtidos experimentalmente. Apesar da melhor aproximação, estes valores continuam muito optimistas em relação aos obtidos concretamente.

Ao tomarmos em consideração as perdas devido ao atrito interno entre o eixo de rotação do motor e a barra e calcularmos o rendimento usando a potência do fluido no êmbolo obtivemos valores mais elevados (cerca de 5%) e portanto mais próximos dos teóricos.

Nesta melhor aproximação, considerando o modelo teórico adaptado e o rendimento melhorado, continuámos a ter uma diferença de rendimentos na ordem dos 30%, o que suscita a necessidade de admitir outras fontes de erro. Estes erros podem dever-se à propagação de incertezas nas grandezas medidas experimentalmente:

- Flutuações nas medidas dadas pelos multímetros, o que aumentou a imprecisão na determinação do valor das temperaturas, tensões e intensidades de corrente;
- Erros nas leituras das escalas como foi o caso da medição do braço da barra, do valor do volume de água na proveta e do período do ciclo no osciloscópio;
- Tempo de reacção no cálculo do tempo para a determinação do caudal.

A própria experiência foi realizada em condições que admitiam sempre a presença de erros, uma vez que o tempo de espera necessário para garantir a estabilidade do funcionamento do ciclo era superior ao dado. Desta forma, não houve a garantia que as condições de funcionamento se mantiveram constantes durante todas as medições.

Além disso, o próprio aparato experimental pode ter contribuído para o aumento da imprecisão dos resultados uma vez que não há maneiras de garantir que durante toda a experiência não se deram trocas de gás com o exterior nem que houve trocas de calor pelas paredes laterais do cilindro (observou-se que a fonte

quente não se encontrava de forma alguma isolada com exterior, pelo que grande parte do seu calor foi perdido para o ambiente o que contribui para uma diminuição significativa do rendimento obtido).

No entanto, houve uma série de resultados importantes a destacar que foram verificados apesar de todas as incertezas inerentes às medições:

- O modelo teórico ajustado revelou-se bastante mais próximo do motor real do que o ciclo reversível, quer pela observação dos diagramas PV, quer pela comparação dos rendimentos obtidos;
- A potência exercida pelo fluido no êmbolo foi sempre superior à exercida pela barra no travão, o que revela a existência de perdas devido ao atrito ao longo da engrenagem;
- O rendimento subiu do primeiro ensaio para o segundo, quer nas previsões teóricas, quer nos resultados experimentais, devido a um aumento significativo da temperatura da fonte quente face a um ligeiro aumento da temperatura da fonte fria.

Na segunda actividade, constatou-se que o motor de Stirling funciona como uma boa bomba de calor obtendo-se uma eficiência de 1,31. Esta actividade foi realizada na presença das mesmas fontes de erro que a actividade anterior sendo portanto importante fazer uma análise crítica dos resultados obtidos. Como consequência não foi possível observar a relação entre a potência de refrigeração, a potência dissipada para a fonte fria e a potência do fluido no êmbolo descrita na discussão de resultados.

Novamente, voltou-se a observar que o modelo teórico ajustado revelou-se uma melhor aproximação do que o ciclo reversível através da observação do diagrama PV.

Bibliografia

- Aulas teóricas e protocolo do Professor Figueirinhas;
- *Termodinâmica e Mecânica Estatística*, Apontamentos da disciplina de Termodinâmica e Estrutura da Matéria do Professor Orfeu Bertolami;
- *Termodinâmica*, Enrico Fermi;
- www.wikipedia.org (Imagens da introdução)

Cálculo da potência teórica exercida pelo fluido segundo um modelo mais aproximado do Motor de Stirling utilizado:

Usando o *Mathematica*:

$$V_{\min}:=170*10^{(-6)}$$

$$V_{\max}:=310*10^{(-6)}$$

$$P_{\text{atm}}:=1*10^5$$

Ensaio 1:

$$T_{q1}:=597.15$$

$$T_{f1}:=297.05$$

$$V1[s_]:=V_{\min}+(V_{\max}-V_{\min})*(\text{Cos}[s]+1)/2$$

$$V11[s_]:=V_{\max}*V_{\min}*(1-\text{Sin}[s])/(V_{\min}+V_{\max})$$

$$P1[s_]:= (P_{\text{atm}}*V_{\max}/T_{f1}) T_{f1} T_{q1} / ((V1[s]-V11[s])T_{q1}+V11[s]T_{f1})$$

$$\text{Abs} \left[\int_{-\pi}^{\pi} P1[s] * \text{Sin}[s] * (V_{\max} - V_{\min}) / 2 \, ds \right]$$

$$\rightarrow W_{\text{teórico}} = 13,400 \text{ J}$$

Ensaio 2:

$$T_{q2}:=658.15$$

$$T_{f2}:=298.85$$

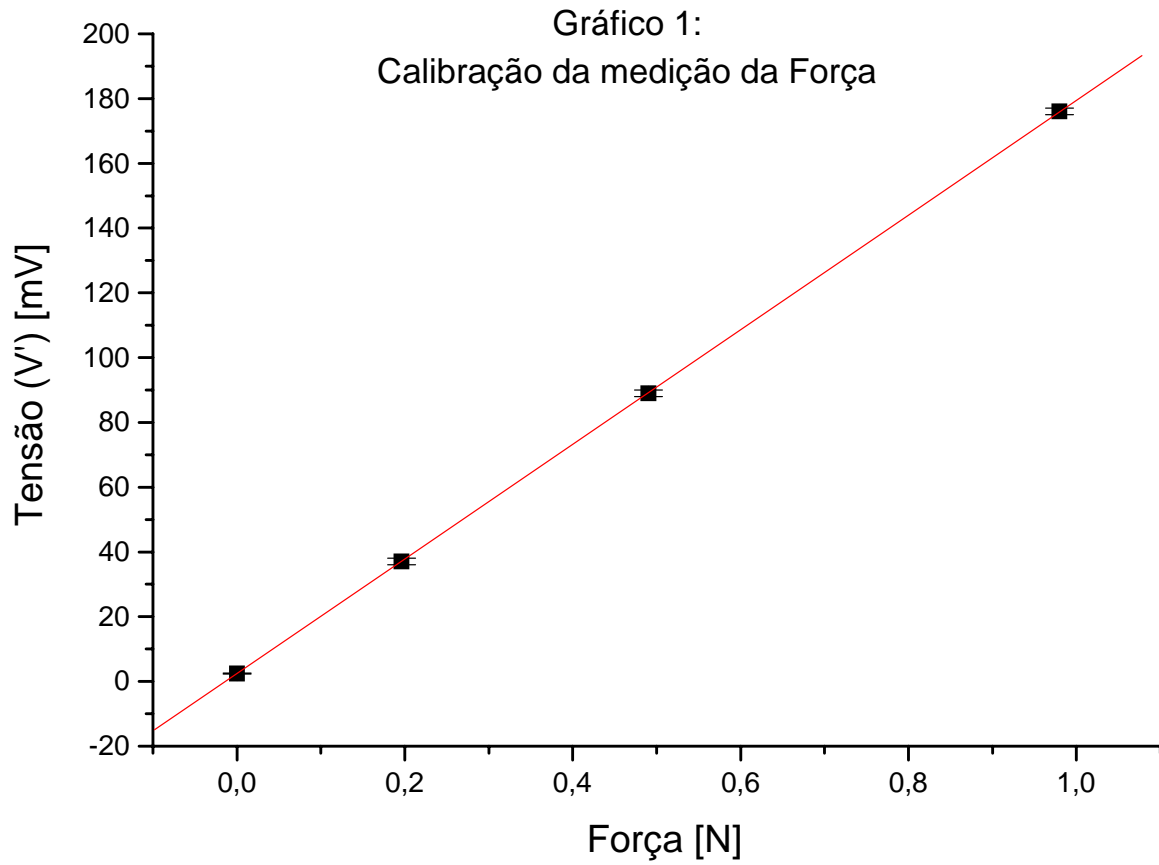
$$V2[s_]:=V_{\min}+(V_{\max}-V_{\min})*(\text{Cos}[s]+1)/2$$

$$V12[s_]:=V_{\max}*V_{\min}*(1-\text{Sin}[s])/(V_{\min}+V_{\max})$$

$$P2[s_]:= (P_{\text{atm}}*V_{\max}/T_{f2}) T_{f2} T_{q2} / ((V2[s]-V12[s])T_{q2}+V12[s]T_{f2})$$

$$\text{Abs} \left[\int_{-\pi}^{\pi} P2[s] * \text{Sin}[s] * (V_{\max} - V_{\min}) / 2 \, ds \right]$$

$$\rightarrow W_{\text{teórico}} = 15,781 \text{ J}$$



Regressão Linear para o Gráfico 1:

$$Y = B + A * X$$

Parâmetro	Valor	Erro
B	2,39845	0,01448
A	177,04686	0,132

Gráfico 2 – Diagrama P-V (Ensaio 1)

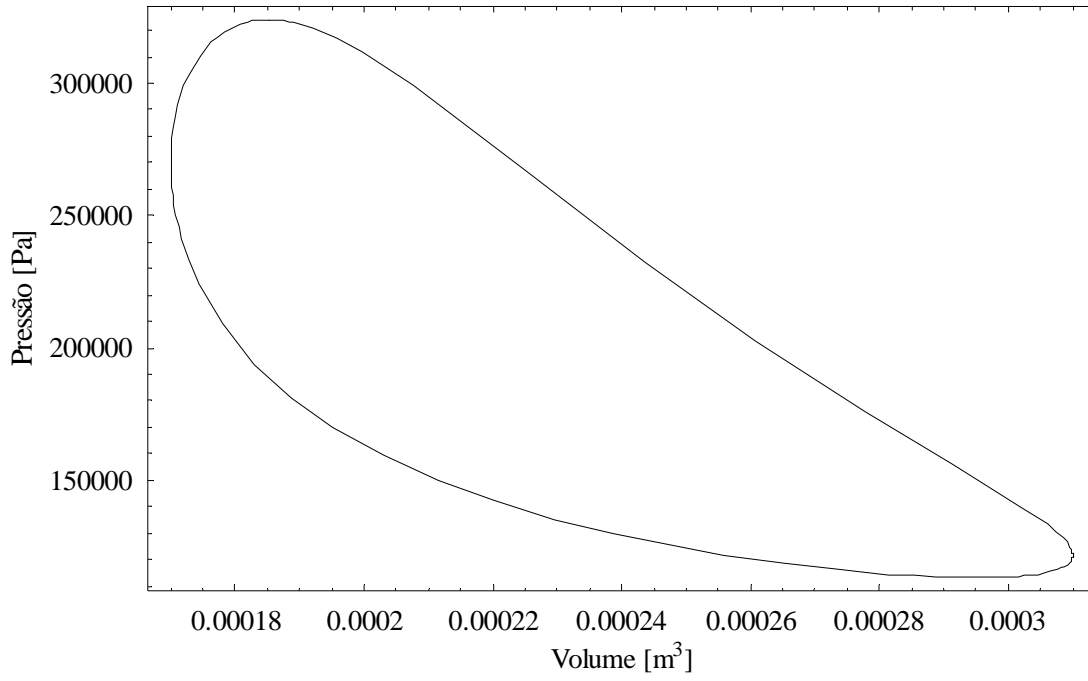
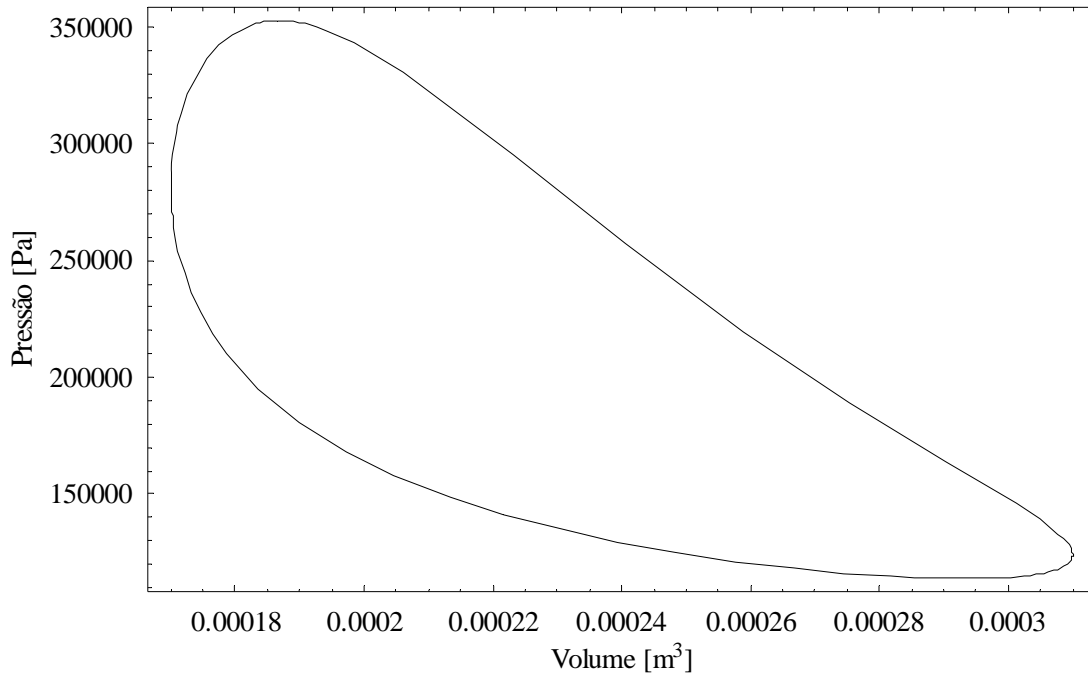


Gráfico 3 – Diagrama P-V (Ensaio 2)



massa (g)	F (N)	V' (mV)	$\epsilon_{V'}$ (V)
0	0	2,4	0,1
20	0,196	37	1
50	0,49	89	1
100	0,98	175	1

Tabela 1 - Calibração do sistema de conversão força-tensão

Ensaio	V (V)	$\epsilon_{V(V)}$	I (A)	$\epsilon_{I(A)}$	V' (mV)	$\epsilon_{V'(mV)}$	T _{FQ} (C)	$\epsilon_{T_{FQ}(C)}$	T _{FF} (C)	$\epsilon_{T_{FF}(C)}$	ΔT (C)	$\epsilon_{\Delta T(C)}$	t _{caudal} (s)	$\epsilon_{t_{caudal}(s)}$	T _{ciclo} (s)	$\epsilon_{T_{ciclo}(s)}$	A(hPa.cm)
1	11,631	0,035	10,69	0,02	61,0	2,0	324	2	23,9	0,2	5,0	0,1	49,6	0,5	0,309	0,002	672
													49,2				
2	13,504	0,029	12,64	0,04	95	1	385	1	25,7	0,2	5,8	0,1	49,3	0,5	0,255	0,002	882
													49,5				

Tabela 2 - Registo das medições da primeira actividade do procedimento para os dois ensaios

Ensaio	V (V)	$\epsilon_{V(V)}$	I (A)	$\epsilon_{I(A)}$	T _{FQ} (C)	$\epsilon_{T_{FQ}(C)}$	ΔT (C)	$\epsilon_{\Delta T(C)}$	t _{caudal} (s)	$\epsilon_{t_{caudal}(s)}$	T _{ciclo} (s)	$\epsilon_{T_{ciclo}(s)}$	A(hPa.cm)
1	2,248	0,015	2,03	0,02	22	1	1,4	0,1	47,3	1	0,45	0,002	622
									47,5				

Tabela 3 -Registo das medições da segunda actividade

Ensaio	V (V)	ϵ_V (V)	I (A)	ϵ_I (A)	P_T (W)	ϵ_{PT} (W)
1	11,631	0,035	10,69	0,02	124,34	0,607
2	13,504	0,029	12,64	0,04	170,69	0,907

Tabela 4 - Cálculo da potência térmica

Ensaio	V' (mV)	ϵ_V (mV)	F (N)	ϵ_F (N)	T _{ciclo} (s)	ϵ_{Tciclo} (s)	f _{ciclo} (Hz)	ϵ_{fciclo} (Hz)	b (m)	ϵ_b (m)	P _{Mec} (W)	ϵ_{PMec} (W)
1	61,0	2,0	0,331	0,00225	0,309	0,002	3,24	0,021	0,248	0,001	1,67	0,0289
2	95,0	1,0	0,523	0,00790	0,255	0,002	3,92	0,031			3,20	0,0862

Tabela 5 - Cálculo da potência mecânica

Ensaio	m _{H2O} (g)	ϵm_{H2O} (g)	t _{caudal} (s)	t _{caudal médio} (s)	ϵt_{caudal} (s)	C (g/s)	ϵC (g/s)	ΔT (C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (C)	P _D (cal/s)	ϵ_{PD} (cal/s)	P _D (W)	ϵ_{PD} (W)
1	100	2,0	49,6	49,4	1,0	2,02	0,0815	5,0	0,10	10,1	0,610	42,3	2,55
			49,2										
2			49,3			2,02	0,0815	5,8	0,10	11,7	0,675	49,1	2,82
			49,5										

Tabela 6 - Cálculo da potência dissipada na fonte fria

Ensaio	A (hPa.cm)	r (m)	W _{fluido} (J)	f _{ciclo} (Hz)	ϵ_{fciclo} (Hz)	P _F (W)	ϵ_{PF} (W)
1	672	0,03	1,90	3,24	0,021	6,15	0,040
2	882		2,49	3,92	0,031	9,78	0,077

Tabela 7 - Cálculo da potência do fluido do êmbolo

Ensaio	$W_{teórico}$ (J)	f_{ciclo} (Hz)	ϵ_{fciclo} (Hz)	$P_{teórica}$ (W)	$\epsilon_{Pteórica}$ (W)
1	13,400	3,24	0,02	43,366	0,281
2	15,781	3,92	0,03	61,886	0,485

Tabela 8 - Cálculo da potência do modelo teórico aproximado

Ensaio	$\eta_{reversível}$ (%)	$\epsilon_{\eta_{reversível}}$ (%)	η_{aprox} (%)	$\epsilon_{\eta_{aprox}}$ (%)	η_{real} (%)	$\epsilon_{\eta_{real}}$ (%)	$\eta_{melhorado}$ (%)	$\epsilon_{\eta_{melhorado}}$ (%)
1	50,3	0,200	34,878	0,396	1,34	0,02	4,95	0,034
2	54,6	0,099	36,256	0,477	1,87	0,05	5,73	0,048

Tabela 9 - Cálculo dos rendimentos da actividade 1

Ensaio	P'_{FA} (W)	$\epsilon_{P'_{FA}}$ (W)	P'_{TOTAL} (W)	$\epsilon_{P'TOTAL}$ (W)
1	4,48	0,069	80,36	3,184
2	6,58	0,163	118,4	3,814

Tabela 10 - Cálculo das perdas da actividade 1

Ensaio	V (V)	ϵ_V (V)	I (A)	ϵ_I (A)	P_T (W)	ϵ_{PT} (W)
1	2,248	0,015	2,03	0,02	4,563	0,07541

Tabela 11 - Cálculo da potência de refrigeração

Ensaio	m_{H_2O} (g)	ϵm_{H_2O} (g)	t_{caudal} (s)	$t_{caudal\ médio}$ (s)	ϵt_{caudal} (s)	C (g/s)	ϵC (g/s)	ΔT (C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (C)	P_D (cal/s)	ϵ_{PD} (cal/s)	P_D (W)	ϵ_{PD} (W)
1	100	2,0	47,3	47,4	1,0	2,11	0,087	1,4	0,1	2,95	0,332	12,3	1,39
			47,5										

Tabela 12 - Cálculo da potência dissipada na fonte fria

Ensaio	A (hPa.cm)	r (m)	W_{fluido} (J)	T_{ciclo} (s)	ϵ_{Tciclo} (s)	f_{ciclo} (Hz)	ϵ_{fciclo} (Hz)	P_F (W)	ϵ_{PF} (W)
1	622	0,03	1,76	0,45	0,002	2,22	0,010	3,91	0,017

Tabela 13 - Cálculo da potência do fluido do êmbolo

Ensaio	P_{MOTOR} (W)	ϵ_{PMOTOR} (W)	eff	ϵ_{eff}
1	9,44	0,13	1,31	0,166

Tabela 14 - Cálculo da eficiência da bomba de calor

howstuffworks comotudofunciona

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar

com Google

TUDO SOBRE
[Ambiente](#)
[Carros](#)
[Ciência](#)

- Aplicações militares
- Arqueologia e paleontologia
- Ciências da Terra
- Ciências da vida
- Ciências naturais
- **Engenharia**
- Espaço

[Crianças](#)
[Eletrônicos](#)
[Empresas e Finanças pessoais](#)
[Entretenimento](#)
[Esporte](#)
[Informática](#)
[Saúde](#)
[Sociedade e Cultura](#)
[Sua casa](#)
[Viagem](#)
As melhores ofertas
GUIA DE COMPRAS
[Dicas sobre produtos](#)
VÍDEO
[Artigos e reportagens](#)
QUIZ
[O que você sabe?](#)
BLOG
[A no Polar](#)
[Eurocopa](#)
[Gadgets](#)
[Verão abaixo de zero](#)
BOLETIM POR E-MAIL

 Digite seu e-mail

Publicidade

 Principal > [Ciência](#) > [Engenharia](#)

imprimir enviar por e-mail

Como funcionam os motores Stirling

 por [Karim Nice](#) - traduzido por HowStuffWorks Brasil

Neste artigo

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Introdução 2. O ciclo Stirling 3. Motor Stirling tipo deslocador 4. Motor Stirling de dois pistões | <ol style="list-style-type: none"> 5. Por que os motores Stirling não são mais comuns? 6. Mais informações 7. Veja todos os artigos sobre Engenharia |
|--|--|

Por que os motores Stirling não são mais comuns?

Há algumas características fundamentais que tornam os motores Stirling pouco práticos para uso em diversas aplicações, incluindo a maioria dos carros e caminhões.

A **fonte de calor é externa**, fazendo com que o motor demore um pouco a responder a mudanças na quantidade de calor que é aplicado ao cilindro: o calor demora para ser conduzido através das paredes do cilindro e para o interior do motor. Isso significa que:

- o motor requer algum tempo para se aquecer antes que possa produzir potência útil
- o motor não pode mudar sua geração de potência rapidamente.

Esses empecilhos praticamente asseguram que ele não substituirá os motores de combustão interna dos carros. No entanto, um [carro híbrido](#) movido a motor Stirling poderia ser viável.

Para mais informações sobre motores Stirling e assuntos relacionados, verifique os links na próxima página.

[< ANTERIOR](#)
[INTRODUÇÃO](#)
[PRÓXIMA >](#)
Neste artigo

- | | |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Introdução 2. O ciclo Stirling 3. Motor Stirling tipo deslocador 4. Motor Stirling de dois pistões | <ol style="list-style-type: none"> 5. Por que os motores Stirling não são mais comuns? 6. Mais informações 7. Veja todos os artigos sobre Engenharia |
|--|--|

FERRAMENTAS
[IMPRIMIR](#) | [ENVIAR POR E-MAIL](#) | [COMO CITAR ESTE ARTIGO](#)
[AVALIE ESTE ARTIGO](#)
FAVORITOS
[Faça do HowStuffWorks a sua página inicial](#) | [digg it! \(?\)](#) | [del.icio.us](#)
ASSUNTOS RELACIONADOS

- [Buscar imagens de fonte de calor](#)
- [Como funcionam os motores rotativos](#)
- [Como funcionam os motores 2-tempos](#)
- [Como funcionam os motores de carros](#)

Publicidade

Faça as compras para os últimos estilos de biquíni em bikini.com!



- ★ Adicione aos favoritos
- 🏠 ComoTudoFunciona em sua página inicial
- ✉ Boletim por e-mail | [RSS](#)
- ⚙ Widgets: [Google](#) [msn](#) [YAHOO!](#)

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar com [Google](#)

Vacances Luberon bis -90%

www.Ab-in-den-Urlaub-Deals.de

Vacances Luberon Schnäppchen Deals Jeden Tag Hotel Rabatte bis zu-90%!



Google Reklamaları

howstuffworks comotudofunciona

TUDO SOBRE

- Ambiente
- Carros
- Ciência
 - Aplicações militares
 - Arqueologia e paleontologia
 - Ciências da Terra
 - Ciências da vida
 - Ciências naturais
 - Engenharia
 - Espaço
- Crianças
- Eletrônicos
- Empresas e Finanças pessoais
- Entretenimento
- Esporte
- Informática
- Saúde
- Sociedade e Cultura
- Sua casa
- Viagem

As melhores ofertas

GUIA DE COMPRAS

Dicas sobre produtos

VÍDEO

Artigos e reportagens

QUIZ

O que você sabe?

BLOG

- Ano Polar
- Eurocopa
- Gadgets
- Verão abaixo de zero

BOLETIM POR E-MAIL

Digite seu e-mail

Publicidade

Principal > Ciência > Engenharia

Imprimir enviar por e-mail

Como funcionam os motores Stirling

por [Karim Nice](#) - traduzido por HowStuffWorks Brasil

Neste artigo

1. [Introdução](#)
2. [O ciclo Stirling](#)
3. [Motor Stirling tipo deslizador](#)
4. [Motor Stirling de dois pistões](#)
5. [Por que os motores Stirling não são mais comuns?](#)
6. [Mais informações](#)
7. [Veja todos os artigos sobre Engenharia](#)

Introdução

O motor Stirling é um motor térmico muito diferente do [motor de combustão interna](#) do seu carro. Inventado por Robert Stirling em 1816, o motor Stirling é mais eficiente do que um [motor diesel](#) ou a gasolina. Mas hoje, os motores Stirling são usados somente em alguns casos específicos, como em [submarinos](#) ou geradores de energia auxiliares para iates, onde o funcionamento silencioso é importante. Apesar do motor Stirling não ter tido grande sucesso comercial, alguns inventores de grande talento estão trabalhando nele.

Agradecimentos especiais a Brent Van Arsdell da [American Stirling Company](#) (em inglês) por sua ajuda para este artigo.

Um motor Stirling usa o **ciclo Stirling**, diferente dos ciclos usados nos motores de combustão interna.

- Os gases usados no interior de um motor Stirling nunca saem do motor. Não existem válvulas de escape que liberem gases a alta pressão, como em um motor a gasolina ou diesel e não ocorrem explosões em seu interior. Devido a isso, os motores Stirling são muito silenciosos.
- O ciclo Stirling usa uma fonte de calor, que pode ser gasolina, energia solar ou até o calor produzido por [plantas em decomposição](#). Não ocorre nenhuma combustão no interior dos cilindros do motor.

Há muitas maneiras de se construir um motor Stirling. Neste artigo, vamos aprender sobre o ciclo Stirling e ver como funcionam duas configurações diferentes deste motor.

PRÓXIMA >

Neste artigo

1. [Introdução](#)
2. [O ciclo Stirling](#)
5. [Por que os motores Stirling não são mais comuns?](#)

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar

com Google

ASSUNTOS RELACIONADOS

- [Buscar imagens de motor stirling](#)
- [Como funcionam os motores rotativos](#)
- [Como funcionam os motores 2-tempos](#)
- [Como funcionam os motores de carros](#)

Publicidade

Mais quente de biquíni

faça as compras para os últimos estilos de biquíni em [bikini.com!](#)

bikini.com



Start
vandaag
met
energie
besparen

ga naar:
wattcher.nl

2. O ciclo Stirling mais comuns?
3. Motor Stirling tipo deslocador 6. Mais informações
4. Motor Stirling de dois pistões 7. Veja todos os artigos sobre Engenharia

FERRAMENTAS

[IMPRIMIR](#) | [ENVIAR POR E-MAIL](#) | [COMO CITAR ESTE ARTIGO](#)
[AVALIE ESTE ARTIGO](#)

FAVORITOS

[Faça do HowStuffWorks a sua página inicial](#) | [digg.it!](#) (?) | [del.icio.us](#)

NEN Training

Zelf CE-markeren toepassen!

- ✓ Van prestatie-eis naar praktijk
- ✓ Onderdeel van leergang 'Machineveiligheid en CE-markeren'
- ✓ Met waardering Hobéon SKO-VK

NEN

[Meer informatie](#)

- ★ Adicione aos favoritos
- 🏠 ComoTudoFunciona em sua página inicial
- ✉ Boletim por e-mail | [RSS](#)
- ⚙ Widgets: [Google](#) [msn](#) [YAHOO!](#)

Buscar no ComoTudoFunciona e na Web

Buscar

com