



PRODUTO EDUCACIONAL

UTILIZAÇÃO DE UM MOTOR *STIRLING* CASEIRO COMO ORGANIZADOR PRÉVIO PARA O ESTUDO DE TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO

Por

Henrique Alexandre do Nascimento

Produto Educacional apresentado em Dissertação de Mestrado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) no curso de Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Edemerson Solano Batista de Moraes, Dsc

Natal/RN

2019

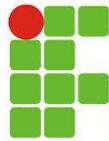
O material apresentado neste documento pode ser reproduzido livremente desde que citada a sua fonte. As imagens apresentadas são de propriedade dos respectivos autores ou produção própria e utilizadas para fins didáticos. Caso sinta que houve violação de seus direitos autorais, por favor, contate os autores para solução imediata do problema. Este documento é veiculado gratuitamente, sem nenhum tipo de retorno comercial a nenhum dos autores, e visa apenas a divulgação do conhecimento científico.

Henrique Alexandre do Nascimento
Edemerson Solano Batista de Moraes, Dsc

**UTILIZAÇÃO DE UM MOTOR *STIRLING* CASEIRO COMO ORGANIZADOR
PRÉVIO PARA O ESTUDO DE TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO**

Natal/RN
2019

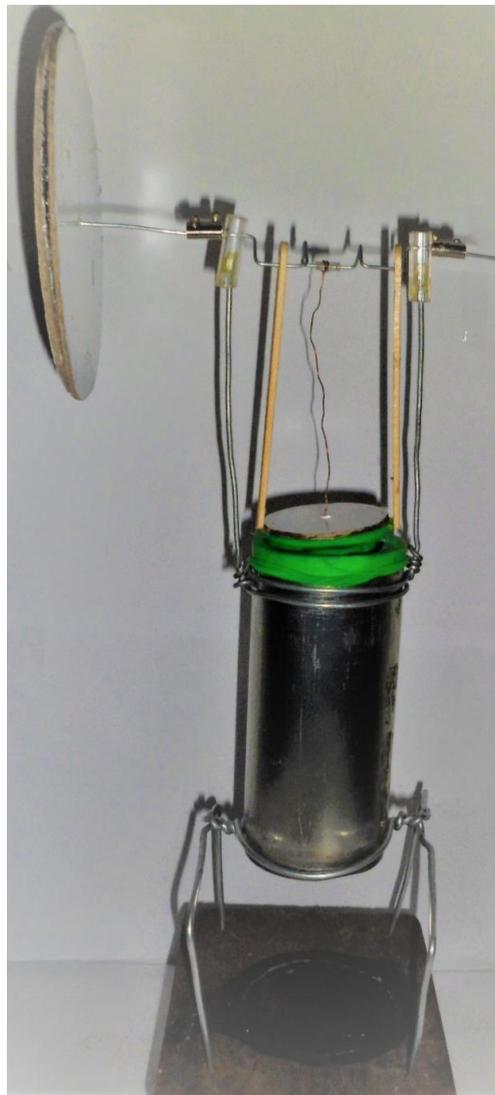
MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

 INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
RIO GRANDE DO NORTE
Campus Natal - Central

 **SBF**
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

CADERNO DO PROFESSOR DE FÍSICA

UTILIZAÇÃO DE UM MOTOR *STIRLING* CASEIRO COMO ORGANIZADOR PRÉVIO PARA O ESTUDO DE TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO



Sumário

1 APRESENTAÇÃO	5
1.1 OBJETIVO	7
1.2 CONTEÚDOS DE APRENDIZAGEM	8
1.3 O PAPEL DO PROFESSOR	9
2 ORGANIZAÇÃO DO MATERIAL	10
2.1 ESTRUTURA DAS AULAS	10
2.2 INSTRUÇÕES PARA MONTAGEM DO MOTOR STIRLING CASEIRO	14
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
4 APÊNDICE (APOSTILA ESTUDOS SOBRE TERMODINÂMICA)	25

1 APRESENTAÇÃO

Nos dias atuais o papel do professor de física, principalmente no ensino médio, não está mais fechado ao conteúdo dos livros didáticos, como já foi tratado há algum tempo. A nível de Brasil, os documentos oficiais, quando se referem ao ensino de física, enfatizam que este deve ter uma visão voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, de modo que os jovens, ao terminarem o ensino médio, mesmo não tendo mais contato escolar com o conhecimento em física, tenham adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem. (BRASIL, 2002).

Independentemente do nível de ensino em que atuem, os professores de ciências, e em especial os professores de física, ao exercerem seu ofício, agem como formadores de pessoas que irão desempenhar seu papel de cidadão em uma sociedade que está permanentemente em evolução. Esta evolução, em todas as áreas, mas principalmente nas áreas da ciência e tecnologia, faz com que o que é ensinado e como é ensinado tenha que se adequar à tal evolução.

É devido à essa evolução que a qualidade do ensino de física ao qual nossos alunos têm acesso, sempre foi motivo de debates e estudos ao longo de décadas, tendo culminado com várias reformas nas diretrizes da educação e nos currículos escolares.

O presente produto educacional contempla à exigência do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF). Este produto consiste de uma sequência (unidade) didática que acompanha a dissertação.

Segundo Zabala (1998) uma sequência didática é definida como “um conjunto de atividades ordenadas, estruturadas e articuladas para a realização de certos objetivos educacionais, que têm um princípio e um fim conhecidos, tanto por professores como pelos alunos.” (ZABALA, 1998, p.18)

A construção dessa unidade didática tem por objetivo servir de ferramenta para que, os professores que dela se apropriem, possam ter uma proposta de material que leve seus alunos a evoluírem, no que se refere à conceitos, habilidades e atitudes, dando-lhes diretrizes para que possam gerir as etapas do processo de ensino-aprendizagem de modo que seus alunos atinjam os objetivos propostos.

Os documentos oficiais também servem de base no que se refere à elaboração desse produto, pois os mesmos fornecem importantes orientações para qualquer material que se destine a ser uma ferramenta útil para o bom desenvolvimento do ensino aprendizagem.

Segundo os PCN+, o conhecimento de física na escola média ganhou um novo rumo a partir das diretrizes apresentadas nos PCNEM. Esse novo rumo está focado em uma visão da física que esteja voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, capaz de compreender, intervir e participar da sociedade na qual está inserido. A formação à qual o jovem deve estar submetido, ainda segundo os PCN+, deve ser capaz de fazer com que os jovens, ao concluir o ensino médio, mesmo que não venham a ter mais nenhum contato com o

conhecimento escolar em física, tenham adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem. (BRASIL, 2002)

Segundo o referido documento a física apresenta-se “como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos.” (BRASIL, 2002, p.59)

O mesmo documento preconiza que a física deve vir reconhecida como um processo cuja construção ocorre ao longo da história da humanidade, e como tal, um processo impregnado de contribuições culturais, econômicas e sociais que tem como resultado o desenvolvimento de diferentes tecnologias, sendo produtor e porque não dizer produto também dessas tecnologias.

Tomando os documentos oficiais como um suporte para este produto, buscou-se tornar o mesmo uma ferramenta de fácil compreensão para que o professor que a utilizar possa ter um material cuja aplicação seja prazerosa e proveitosa tanto para o professor quanto para o aluno.

Neste produto buscou-se incorporar o princípio investigativo à prática pedagógica, de modo que o papel do professor seja o de mediador na construção dos conceitos por parte dos alunos, colocando-se como um facilitador da transposição entre o que é ensinado e o que é aprendido. Daí se destaca o papel de protagonista do professor nos processos de mediação da construção dos conhecimentos e no desenvolvimento cognitivo dos alunos.

Este material prevê oito aulas de 50 minutos, com a sugestão que todas as atividades desenvolvidas sejam em grupos.

A construção desse produto educacional foi idealizada de modo a promover a interação entre os estudantes, o professor (como agente mediador) e os materiais usados para que o conhecimento seja alcançado de modo coletivo.

É desejo nosso que esse material seja uma ferramenta capaz de ajudar o professor que desejar ter um material de apoio para desenvolver os conceitos de transformações gasosas, leis da termodinâmica e máquinas térmicas por meio da confecção de um motor *Stirling* caseiro.

1.1 OBJETIVO

Desenvolver uma Unidade Didática prática e teórica, a partir da confecção de um motor *Stirling* caseiro, utilizando este como um organizador prévio e instrumento motivacional para uma aprendizagem significativa sobre estudos de Termodinâmica.

1.2 Conteúdos de aprendizagem

CONCEITUAIS:

- Temperatura;
- Pressão;
- Volume;
- Gases ideais;
- Transformações gasosas;
- Lei Geral dos Gases Perfeitos
- Equação de *Clapeyron*;
- Calor;
- Trabalho;
- Energia interna
- Princípio de conservação da energia
- Primeira Lei da Termodinâmica;
- Segunda Lei da Termodinâmica;
- Máquinas térmicas.

PROCEDIMENTAIS:

- Estimular os alunos a participarem das atividades propostas;
- Ensinar procedimentos;
- Construir o motor *Stirling* caseiro;
- Atuar de maneira proativa na construção do motor *Stirling*;
- Acompanhar e orientar na realização das atividades;
- Auxiliar na construção dos conceitos;
- Mediar a interação e cooperação dos alunos durante a realização das atividades propostas;
- Intervir de modo a favorecer a construção de autonomia dos alunos;
- Atuar de modo a favorecer a investigação dos fenômenos estudados.

ATITUDINAIS:

- Motivar os alunos para a realização das atividades;
- Estimular os procedimentos de investigação;

- Valorizar a participação dos alunos;
- Estimular a colaboração, empenho e organização durante a realização das atividades propostas.

1.3 O PAPEL DO PROFESSOR

O professor deverá atuar como agente mediador do processo de ensino/aprendizagem, de modo a criar um ambiente favorável a tal papel. Esse ambiente deverá ser de tal modo que aluno se sinta confiante ao ponto de desenvolver ao máximo as suas potencialidades, para desenvolver satisfatoriamente as atividades propostas, não só a experimental como as atividades didáticas propostas.

Para isso o professor deverá orientar a construção do motor *Stirling*, buscando sempre auxiliar de modo a sanar as possíveis dificuldades que surjam; deverá também conduzir as aulas teóricas, onde os motores montados serão usados como tema gerador dos conteúdos abordados, dialogando, propondo questionamentos, de modo a sistematizar o conteúdo e introduzir conceitos. Deve também incentivar os alunos, para que, durante a construção do motor, se atentem na observação dos fenômenos, na discussão entre os pares, na elaboração de questionamentos e observações para que a atividade experimental proposta venha a ter os resultados esperados no tocante ao que se propôs.

2 ORGANIZAÇÃO DO MATERIAL

Este material está dividido da seguinte forma:

- Estrutura das aulas;
- Instruções para a montagem de um motor *Stirling* caseiro
- Apostila Estudos sobre Termodinâmica (apêndice)

PERSPECTIVA ADOTADA

Aprendizagem Significativa de David Ausubel

Trabalho em grupo – construção do motor *Stirling* caseiro

DETALHAMENTO AULA A AULA (usando o motor *Stirling* caseiro como organizador prévio e instrumento motivacional)

Aula I e II – as transformações gasosas a partir da análise do motor *Stirling*

Aula III – introdução ao estudo da termodinâmica a partir do motor *Stirling*

Aula IV – a primeira lei da termodinâmica e o motor *Stirling*

Aula V – utilizando o motor *Stirling* para exemplificar transformações cíclicas

Aula VI – utilizando o motor *Stirling* para estudar máquinas térmicas

Aula VII e VIII – verificação de aprendizagem

2.1 ESTRUTURA DAS AULAS

O detalhamento das aulas a seguir foi pensada para serem seguidas após a construção, por partes dos alunos, do motor *Stirling* caseiro. O funcionamento do motor servirá para identificar os organizadores prévios que os alunos possuem acerca de cada tema a ser trabalhado nas aulas propostas.

Aulas I e II: ESTUDO DAS TRANSFORMAÇÕES GASOSAS A PARTIR DA CONFECÇÃO DE UM MOTOR STIRLING CASEIRO

Conhecimentos prévios a serem observados pelo professor com os alunos:

- Temperatura
- Temperatura na escala Kelvin
- Pressão
- Volume

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

A partir da confecção de um motor *Stirling* caseiro:

- Identificar as variáveis de estado de um gás
- Identificar as transformações gasosas (isotérmicas, isobáricas e isovolumétricas)

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Variáveis de estado de um gás
- Transformações gasosas

METODOLOGIA

- Divisão da turma em grupos
- Análise das etapas de funcionamento do motor *Stirling* para identificar as possíveis transformações gasosas

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro montado pelos grupos
- Quadro branco, pincel para quadro, apagador;
- Caderno para anotações

Aula III: INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA TERMODINÂMICA

Conhecimentos prévios a serem observados pelo professor com os alunos:

- Energia
- Energia térmica
- Calor
- Transmissão de calor
- Trabalho mecânico

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar os conceitos de calor, trabalho termodinâmico, energia interna e variação de energia interna

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Introdução aos conceitos da termodinâmica
- Calor
- Trabalho
- Energia interna
- Variação da energia interna

METODOLOGIA

- Cada grupo, com o seu respectivo motor, busca identificar os conceitos trabalhados em termodinâmica

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro
- Quadro branco, pincel para quadro, apagador;
- Caderno para anotações

Aula IV: A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Conhecimentos prévios a serem observados pelo professor com os alunos:

- Trabalho
- Variação de energia interna
- Calor

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar as grandezas relacionadas à primeira lei da termodinâmica
- Verificar como se relacionam as grandezas relacionadas com a primeira lei da termodinâmica

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Primeira lei da termodinâmica

METODOLOGIA

- Cada grupo, com seu respectivo motor, vai identificar como as grandezas calor, trabalho e variação de energia interna se relacionam no que diz respeito à primeira lei da termodinâmica

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro
- Quadro branco, pincel para quadro, apagador;
- Caderno para anotações

Aula V: Transformações cíclicas

Conhecimentos prévios a serem observados pelo professor com os alunos:

- Transformações gasosas
- Primeira lei da termodinâmica

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar a importância de se conhecer uma transformação cíclica, bem como suas etapas
- Relacionar os diferentes tipos de transformações cíclicas
- Identificar nas transformações cíclicas a primeira lei da termodinâmica

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Transformações cíclicas
- A primeira lei da termodinâmica e as transformações cíclicas

METODOLOGIA

- Cada grupo, com seu respectivo motor, vai identificar as várias etapas das transformações cíclicas no funcionamento do motor
- Procurar relacionar primeira lei termodinâmica e as transformações cíclicas

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro
- Quadro branco, pincel para quadro, apagador;
- Caderno para anotações

Aula VI: A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E AS MÁQUINAS TÉRMICAS

Conhecimentos prévios a serem observados pelo professor com os alunos:

- Primeira lei da termodinâmica
- Transformações cíclicas
- Máquinas a vapor
- Motores à explosão

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Identificar as grandezas relacionadas à segunda lei da termodinâmica
- Verificar como se relacionam as grandezas relacionadas com a segunda lei da termodinâmica
- Identificar as etapas de funcionamento de uma máquina térmica, no que se ao estudo das máquinas térmicas
- Comparar o funcionamento do motor *Stirling* com o funcionamento de outras máquinas térmicas

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Máquinas térmicas
- Segunda lei da termodinâmica
- Entropia
- Ciclos termodinâmicos

METODOLOGIA

- Cada grupo vai identificar as partes que constituem uma máquina térmica, bem como as etapas de funcionamento das mesmas;
- Analisar, a partir das definições dadas para a segunda lei da termodinâmica, sua relação com o funcionamento das máquinas térmica e em especial ao ciclo *Stirling*;
- Comparar o ciclo *Stirling* com os demais ciclos (trabalhados nos livros didáticos)

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro
- Quadro branco, pincel para quadro, apagador;
- Caderno para anotações

Aulas VII e VIII: VERIFICAÇÃO DE APRENDIZAGEM

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Avaliar o nível de retenção por parte dos alunos dos conhecimentos abordados

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

- Todos os conteúdos abordados nessa unidade

METODOLOGIA

- Por meio de atividades em grupo, com participação oral, e também por meio de atividades escritas, buscar avaliar o nível de retenção, por parte dos alunos, dos conteúdos trabalhados

RECURSOS DIDÁTICOS

- Motor *Stirling* caseiro montado pelos grupos
- Lista de atividades impressas
- Atividades avaliativas em grupo

2.2 INSTRUÇÕES PARA MONTAGEM DO MOTOR STIRLING CASEIRO

Antes das aulas previstas, recomenda-se a construção dos motores *Stirling* por parte dos alunos. Para tanto, a sugestão é que em uma aula previamente agendada, ou no contra turno, caso seja possível, dividir os alunos em grupos para construírem os seus respectivos motores.

Foi mostrado aos alunos além de um vídeo com a apresentação do modelo do motor a ser feito, os alunos receberam um desenho esquemático com as principais partes do motor, apresentado na figura que se segue:

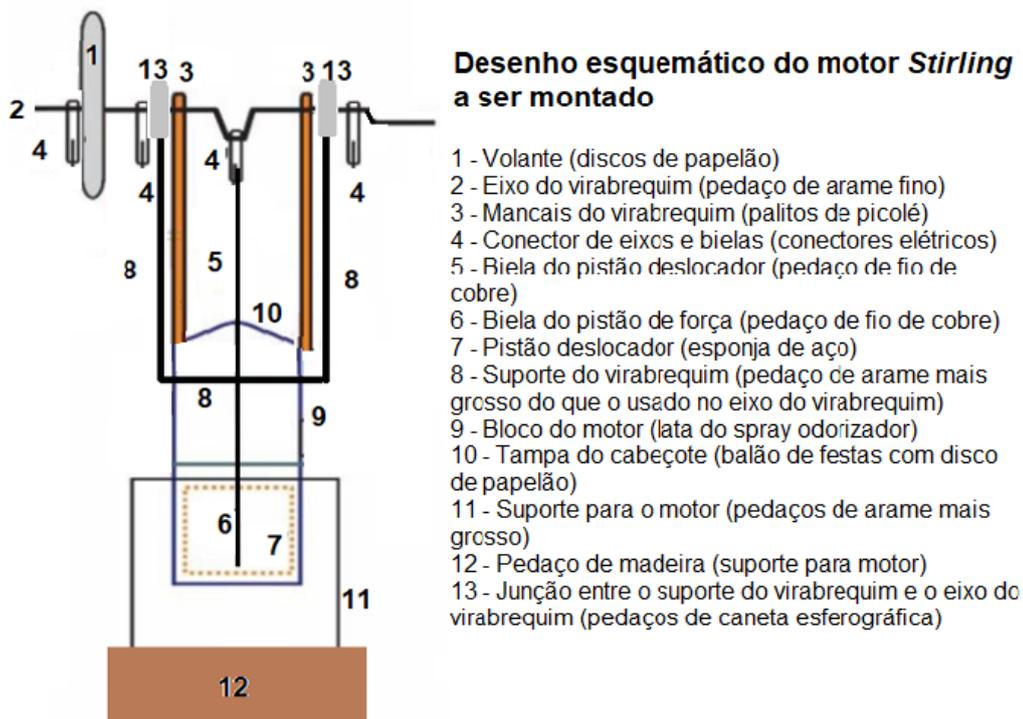


Figura 1: Desenho esquemático do motor *Stirling* a ser montado

Fonte: Autoria própria adaptada de <https://motoresstirling.files.wordpress.com/2016/04/slide21.jpg>

Para se construir os motores, solicitar aos alunos trazerem com antecedência o frasco do spray odorizador de ar para que possam ser serrados e passados em esmeril para se retirar as rebarbas;

Pedir para os alunos trazerem, para na aula prevista para a montagem do motor, os seguintes materiais (figura 2) e ferramentas:

- Balões de festas (balões de aniversário) tamanho 10 (um para cada motor);
- Frasco de spray odorizador de ambiente para o corpo do motor (ou spray de cabelos) (um para cada motor);
- Placas de papelão, uma para cada motor (tipo bandejas descartáveis);
- 4 conectores de fios de 6 mm;
- Esponja de aço (de limpeza doméstica);
- Palitos de picolé (dois para cada motor);
- Corpo de uma caneta esferográfica (para ser cortado);
- Canudinho de carga de uma caneta esferográfica (para ser cortado, por isso de preferência vazio);
- Pedacinhos de fio de cobre;

- Pedacos de arame, de preferência arame galvanizado n. 14 (2,10mm), encontrado em lojas de material de construção;
- Palitos de fósforo;
- Um pedaço de madeira (para suporte do motor);
- Vela;



Figura 2 - materiais utilizados (autoria própria)

Ferramentas que serão utilizadas:

- Chave de fendas; Chave Philips;
- Alicates;
- Tesoura;
- Pistola de cola quente e bastão de cola quente;
- Furadeira;

Todas as fotos a seguir são de autoria própria, que serviram para montar o “protótipo” a ser apresentado aos alunos para que os mesmos possam construir seus próprios motores.

O modelo escolhido foi baseado em um vídeo do *youtube*, cujo endereço é: <https://www.youtube.com/watch?v=8d53jgDf3Kg>

Este modelo foi escolhido, em detrimento a outros modelos, alguns dos quais estão listados na sequência, por considerá-lo um modelo mais “rústico” e não precisar usar água para a fonte fria (o que, em alguns modelos é um “complicador” para sua construção e manuseio por parte dos alunos).

ETAPAS DA MONTAGEM DO MOTOR STIRLING CASEIRO

➤ Montagem do cilindro, deslocador, virabrequim e volante

- Serrar o vasilhame do spray odorizador de ar, deixando com cerca de 13 cm (essa etapa deve ser feita pelo professor com antecedência; antes da aula pra montagem do motor), recomenda-se que o professor lixe e retire as “rebarbas” para evitar acidentes. O vasilhame serrado será o “cilindro” do motor (Figura 3);



Figura 3 - vasilhame usado para o cilindro (A) e cilindro pronto (B)

- Cortar a “cabeça” de um palito de fósforos, com 3,5 cm aproximadamente, e enrolar um pedaço de fio de cobre de 25 cm, na parte central do mesmo (Figura 4);

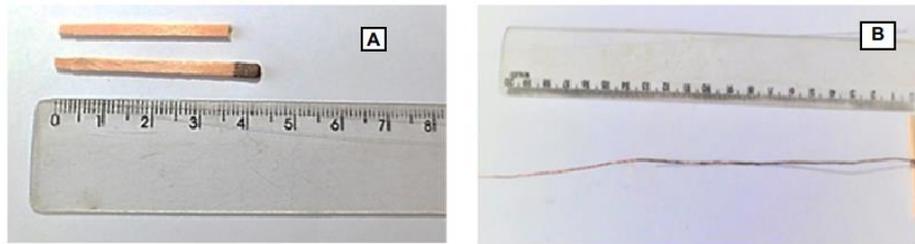


Figura 4 - palito de fósforo inteiro e cortado (A); palito de fósforo com fio de cobre enrolado (B)

- Pegar uma esponja de aço tipo e “abrir (Figura 5A); na sequência enrolar o palito cortado com fio de cobre, colocado de início na posição vertical (Figura 5B), de modo a fazer um “rolo” com a palha de aço e o fio de cobre que vai servir para puxar a palha de aço. Este será o nosso “deslocador”, visto lateralmente (Figura 5C) e o deslocador na sua vista superior (Figura 5D). (detalhe: o “rolo” deve se encaixar no cilindro sem, no entanto, provocar qualquer atrito com as paredes do cilindro);



Figura 5A



Figura 5B



Figura 5C



Figura 5D

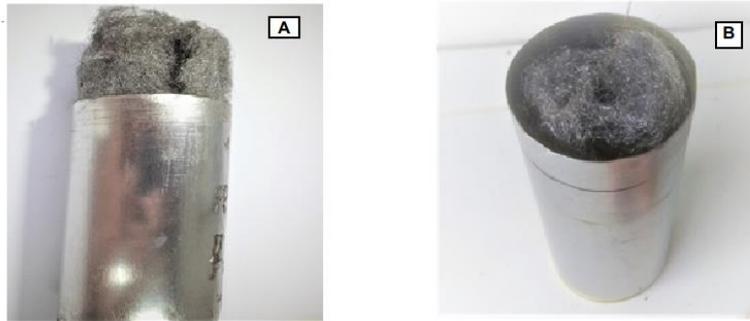


Figura 6 - "deslocador colocado no cilindro: vista lateral (A); vista superior (B)

- Utilizando as placas de papelão, cortar dois círculos, com diâmetros um pouco menor que o diâmetro do cilindro (aproximadamente 4,5 cm);

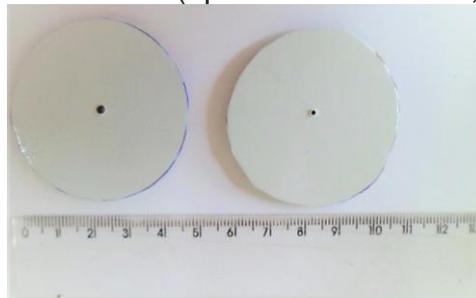


Figura 7 - círculos de papelão

- Pegar o balão de festa e cortar no gargalo, de modo que se possa colocar os círculos dentro do balão cortado; fazer um furo, com o prego pequeno, na parte central dos círculos;

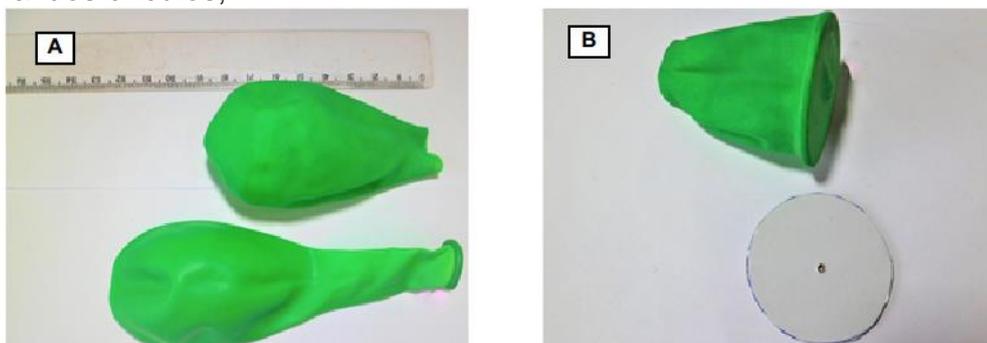


Figura 8 - balão de festas e balão de festas com gargalo cortado (A); balão cortado e discos com furo central, um já dentro do balão (B)

- Colocar um dos círculos no interior do balão, posicionar bem na parte central e passar cola quente na parte externa do balão (contornando o mesmo); colocar o outro círculo sobre a cola quente e segurar firme para colar; inverter o balão, de modo que, agora, o círculo colado fique na parte interna do balão e fazer o mesmo processo para colar o outro círculo (Figura 9A);
- Depois de colados os dois círculos no balão, com o prego fazer um furo no balão, a partir do furo central dos círculos, de modo que o furo fique centralizado no balão e nos dois círculos (Figura 9B);



Figura 9A

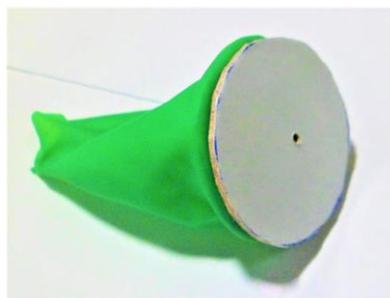


Figura 9B

- Passar o fio de cobre do deslocador pelo furo central dos círculos e encaixar o balão na abertura do cilindro. Tomar cuidado para o fio “correr facilmente” pelo furo, sem atrito). Teremos nosso pistão (Figura 10);



Figura 10 - pistão pronto

- Para a montagem do virabrequim devemos pegar uma caneta esferográfica; retirar a carga da caneta esferográfica e cortar um pequeno pedaço (em torno de 1 cm)

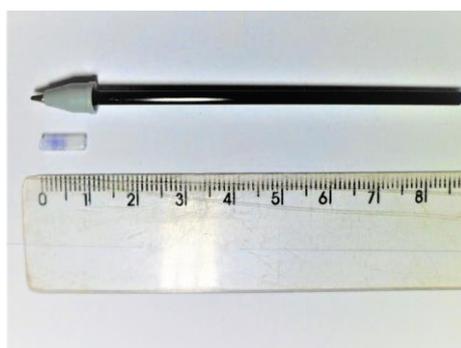


Figura 11 - detalhe do pedaço da carga da caneta esferográfica

- Com o auxílio de um alicate, cortar um pedaço de arame de aproximadamente 30 cm. Pegar o pedaço de carga da caneta (cortado anteriormente) e colocar na parte central do arame e fazer uma “curva em U” (detalhe: uma das “pernas do U” é maior que a outra, medindo 11 cm)

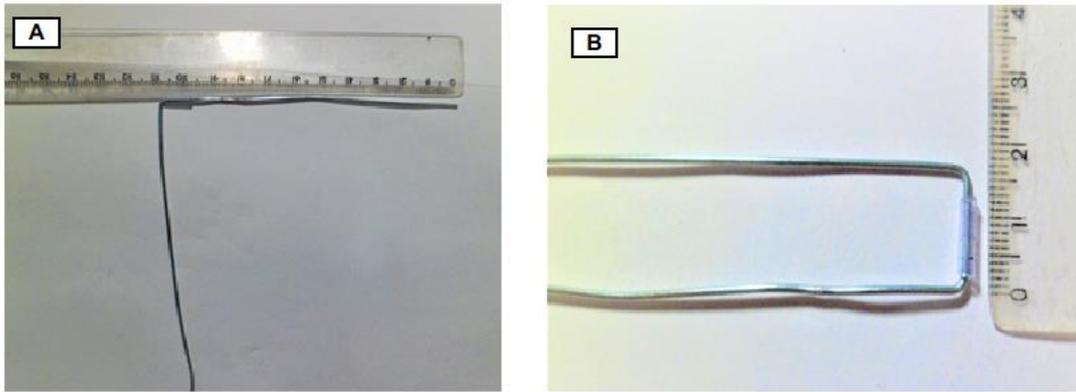


Figura 12 - pedaço da carga colocada na parte central (A); pedaço do arame dobrado em U com carga na parte central (B)

- Fazer uma curva de 90° em cada perna do U (Figura 13A); em seguida, fazer uma nova curva em 90°, agora para “fora” do U, para as laterais, ficando cada parte das “dobras” medindo 1 cm (Figura 13B);



Figura 13A



Figura 13B

- Pegar dois palitos de picolé e com a furadeira fazer um furo na parte superior; cortar dois pedaços de aproximadamente 2,5 cm do corpo da caneta esferográfica e com a furadeira fazer dois furos diametralmente opostos de modo que o eixo do virabrequim passe através dos mesmos, que servirão de suporte para o virabrequim; essas partes serão encaixadas no virabrequim usando dois conectores de fios;

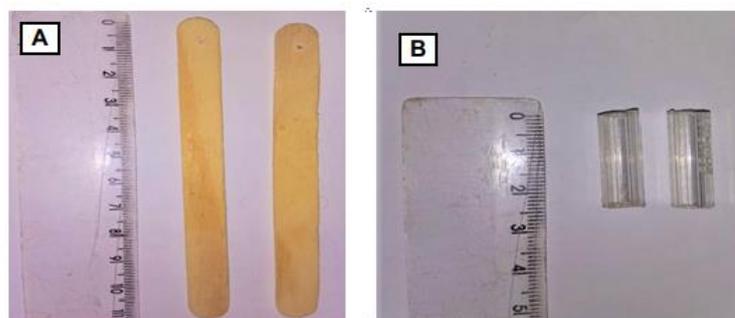


Figura 14 - palitos de picolé furados na parte superior (A); pedaços do corpo da caneta furados (B);

- Colocar os palitos de picolé logo após a parte central; em seguida, colocar os pedaços do corpo da caneta, devem ser colocados após os palitos de picolé e

os conectores devem ser colocados após os pedaços do corpo da caneta e apertar os parafusos dos mesmos para “fixar” todo o conjunto do virabrequim;

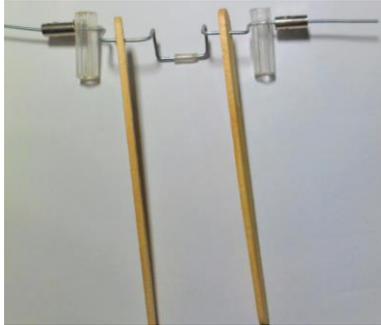


Figura 15 – detalhe do virabrequim montado

- Cortar dois círculos de 11 cm de diâmetro que irão servir de “volante”(Figura 16A); fazer um furo na parte central dos dois discos; fazer um “sulco” de 1 cm em uma das faces de um dos discos (Figura 16B); passar o arame do virabrequim pelo furo central e encaixar a ponta do arame no “sulco (Figura 16C); colar os dois círculos, de modo que o fio de arame fique encaixado entre os discos;

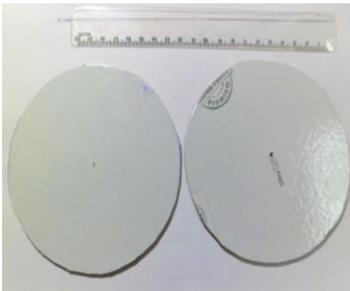


Figura 16A



Figura 16B



Figura 16C



Figura 17 - virabrequim montado com volante acoplado

➤ **Montagem do Motor**

- A próxima etapa é a montagem do motor. Para isso devemos pegar dois pedaços de arame para serem colocados na parte superior do cilindro, que servirão de suporte para o virabrequim; esses pedaços de arame devem ter tamanho suficiente para contornar o cilindro e ficar com uma haste de aproximadamente 11 cm diametralmente opostos (para ser o suporte do

virabrequim); cortar os pedaços de arame e contornar o cilindro deixando o pedaço “sobrando”; posicionar os pedaços de modo a ficarem diametralmente opostos; com o alicate amarrar os pedaços de arame de modo a ficar como uma “antena” na parte superior do cilindro;

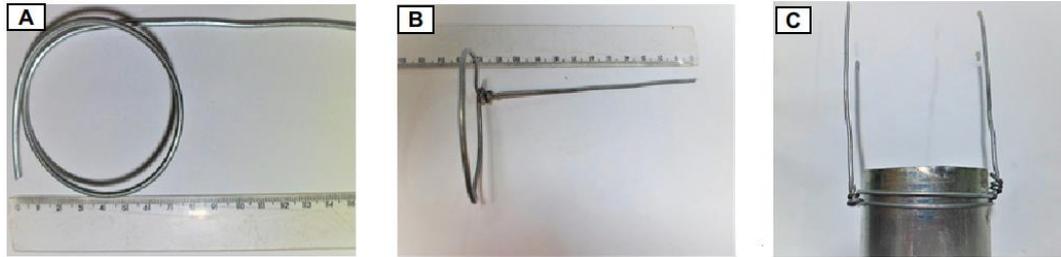


Figura 18 - pedaço do arame cortado no formato da base (A); pedaço de arame com pedaço sobrando (B); arames posicionados na parte superior do cilindro (C)

- O próximo passo é a montagem dos “pés” do motor. Para isso pegar dois pedaços de arame com 50 cm; posicionar os pedaços de arame diametralmente opostos de modo a se encaixar no cilindro;

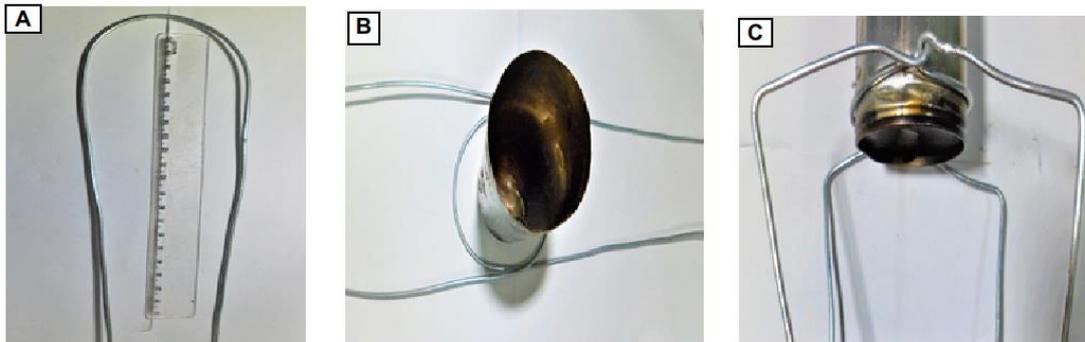


Figura 19 - pedaço de arame curvado para encaixar no cilindro (A); pedaços de arame diametralmente opostos (B); pedaços de arame servindo de suporte para o cilindro (C)

- O próximo passo é amarrar os pedaços de arame de modo que cada pedaço forme duas pernas para servir de suporte para o motor; pegar um pedaço de madeira, para ser o suporte dos pés do motor, e com a furadeira fazer quatro furos para fixar os pés do motor;



Figura 20 - cilindro apoiado sobre os pés com os suportes do virabrequim

- O passo seguinte é começar a montar o motor. Para isso devemos primeiro colocar o deslocador dentro do cilindro (Figura 21A). Para isso devemos encaixá-lo no cilindro, de modo que o balão cortado fique fixado ao cilindro (Figura 22B), tomando cuidado para deixar uma pequena folga (Figura 20C);

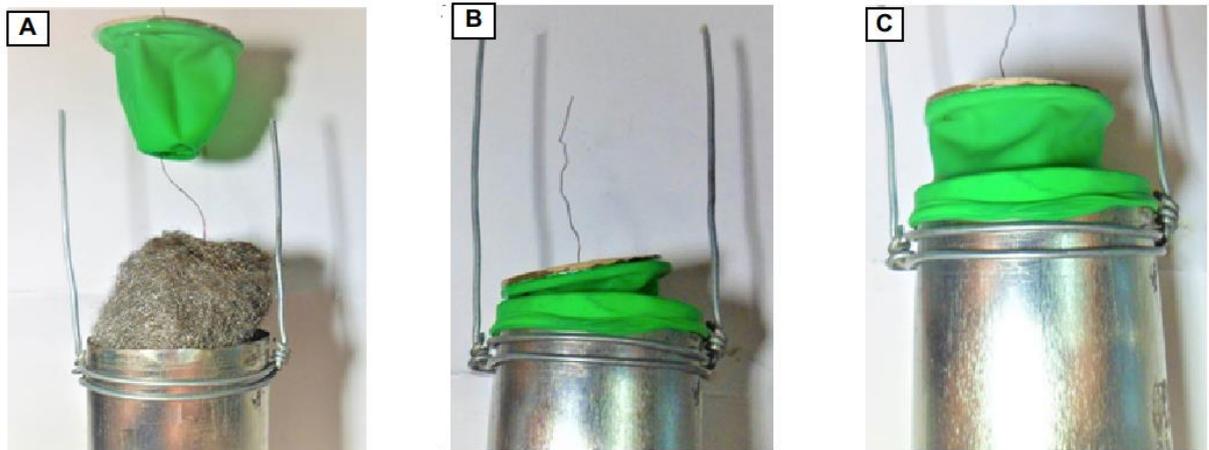


Figura 21 - sequência mostrando deslocador sendo colocado no cilindro

- Próxima etapa é posicionar o virabrequim no cilindro. Para isso devemos colocar um pouco de cola quente nos pedaços do corpo da caneta e encaixar os pedaços da caneta nos suportes do virabrequim (Figura 22A). A seguir, deve-se colar os palitos de picolé nas bordas do disco recoberto com a bola, tomando o cuidado de deixar o eixo do virabrequim na posição “mais alta”; feito isso, deve-se amarrar o fio do deslocador no eixo do virabrequim (no pedaço da carga da caneta que está no meio do virabrequim) (Figura 22B);

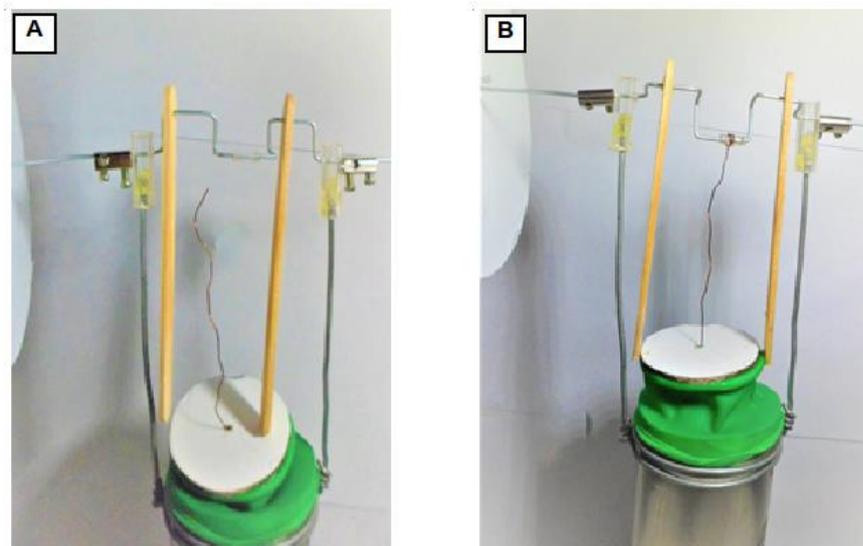


Figura 22 - posicionando o virabrequim nos suportes

- Finalmente, temos o motor *Stirling* caseiro montado (Figura 23).

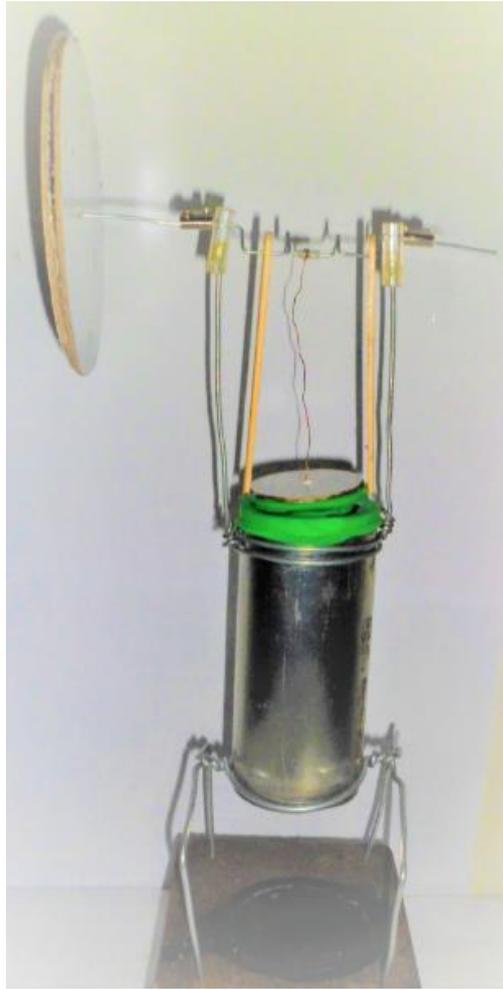


Figura 23 - motor *Stirling* caseiro montado

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCN + Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Volume “Ciências na Natureza, Matemática e suas Tecnologias” Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.

Brasil, Orientações Curriculares para o Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias (MEC/SEB, Brasília, 2006), v. 2.

CARVALHO, Anna Maria Pessoa de, (org.). Ensino de ciências por investigação: condições para a implementação em sala de aula. São Paulo. Censage Learning, 2013.

<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/34/46>

<https://www.youtube.com/watch?v=8d53jgDf3Kq>

ZABALA, Antoni. A prática educativa: como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998.

Sugestões de sites que mostram a construção e montagem de outros tipos de motores *Stirling*

- Manual do Mundo: vídeo do *youtube*

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

- Manual do motor *Stirling*

<http://manualdomotorstirling.blogspot.com/2013/06/lista-dos-materiais-usados-para-um.html>

- [Tutorial simples] Como fazer motor *Stirling* caseiro passo a passo. Vídeo no *youtube* postado por Leandro Vagner

<https://www.youtube.com/watch?v=itZDyNGpZVs&feature=youtu.be>

- Desenvolvendo um motor

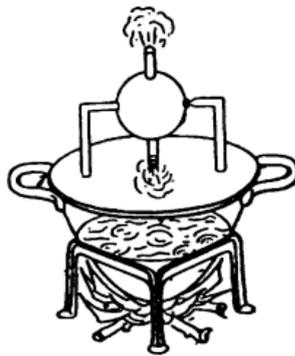
<http://projetotermodinamicastirling.blogspot.com/>

- https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_stirling.htm

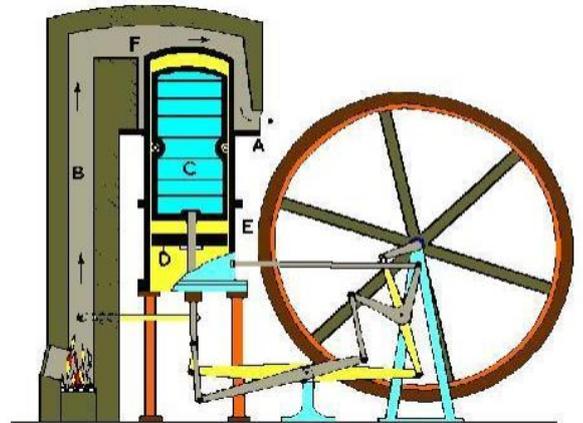
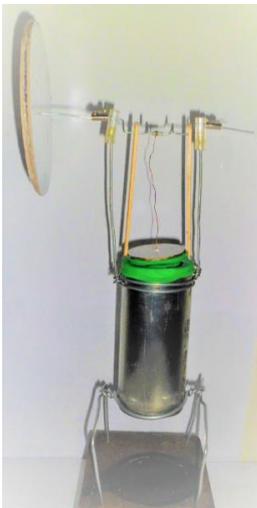
- <http://mistirling.blogspot.com/2008/09/cmo-construir-un-motor-stirling-casero.html>

4 Apêndice (Apostila Estudos sobre Termodinâmica)

ESTUDOS SOBRE TERMODINÂMICA



Fonte: GREEF-USP, 1998



Motor original de Robert Stirling
Fonte: Barros (2005)



ESTUDO DOS GASES

INTRODUÇÃO:

Qual a importância de se estudar os gases e as leis da termodinâmica? Imagine como seria a nossa vida sem geladeira, sem freezer, sem carro, sem avião, sem ar-condicionado.

Seria algo inimaginável nos dias atuais.

Mas, o que todas essas coisas têm em comum?

Analisando o título de nosso material é fácil responder: tais coisas têm a ver com o comportamento dos gases e as leis da termodinâmica.

Realmente, são as leis da termodinâmica que, a partir do comportamento dos gases, regem as trocas de calor na geladeira e no ar-condicionado, assim como o funcionamento da combustão nas turbinas dos aviões e nos motores dos carros, bem como nas máquinas a vapor, que impulsionaram a revolução industrial.

Como isso é possível?

Este é o objetivo deste material: fornecer condições para que possamos entender a importância dos gases e da termodinâmica nos nossos dias.

O estudo dos gases está relacionado ao estudo das relações entre as grandezas macroscópicas dos gases. Tais grandezas são: a pressão, a temperatura e o volume.

O que são gases:

Segundo do dicionário Aurélio gás é “estado da matéria no qual esta ocupa todo o espaço do seu contentor independentemente da sua quantidade”.

Segundo Válio, “chamamos de **gás** o vapor de uma substância cuja **temperatura** esteja **acima da temperatura crítica**” (grifos do autor). (VÁLIO, 2016)

Ao se estudar a dilatação dos sólidos e também dos líquidos, se percebe que, para tais estados, quando a temperatura varia há também variação no volume da substância ou material estudado.

Já os gases não apresentam esse mesmo comportamento pois, na fase gasosa, as forças de atração entre suas moléculas são relativamente fracas, dando às mesmas um alto grau de movimentação, permitindo que assumam a forma do recipiente que o contém, preenchendo-o totalmente. Sendo assim, o volume ocupado pelo gás é igual ao volume do recipiente que o contém.

Temos então que, no estado gasoso, existe um grande espaço vazio entre as moléculas, onde tais moléculas apresentam um movimento caótico. Devido a esse grande distanciamento entre as moléculas, as interações intermoleculares, atrativas ou repulsivas, podem ser consideradas desprezíveis.

O estado gasoso apresenta um comportamento físico relativamente simples, podendo ser descrito por modelos físicos e matemáticos aproximados.

Devido a essa particularidade, os gases apresentam algumas características singulares, listadas a seguir:

- Alta compressibilidade: ter seu volume diminuído facilmente;
- Alta expansibilidade: os gases podem ter seu volume aumentado facilmente;

- Não apresentam volume fixo: os gases ocupam o volume do recipiente que o contem;
- Os gases são miscíveis entre si em qualquer proporção: os gases se misturam facilmente.

Isso significa que, numa variação de volume e temperatura, a pressão do gás também poderá sofrer variação. Dessa forma, podemos dizer que há uma dependência entre as três grandezas físicas: **volume, temperatura e pressão**.

Propriedades dos Gases

Existem três propriedades principais que devemos considerar quando estamos tratando de estudo dos gases.

- **Pressão** (p) – Resultado das colisões das moléculas do gás com as paredes do recipiente;
- **Volume** (V) – O espaço ocupado pelas moléculas desse gás;
- **Temperatura** (T) – Associada à energia cinética média das moléculas desse gás.

Essas propriedades são também conhecidas como variáveis de estado de um gás, pois permitem caracterizar uma determinada massa gasosa num certo instante.

Para estudarmos os gases, devemos utilizar um gás hipotético, chamado de gás ideal, para servir de modelo. Tal modelo obedece às leis físicas conhecidas, como as Leis de Newton, por exemplo.

O que são Gases Ideais?

Gás ideal é um nome dado a um modelo de estudo, em que são feitas algumas aproximações no comportamento dos gases para facilitar o estudo:

- suas moléculas estão suficientemente afastadas umas das outras para que não sofram a ação de forças intermoleculares de coesão;
- os choques das moléculas entre si e com as paredes do recipiente que as contém são perfeitamente elásticos;
- o movimento das moléculas é caótico, aleatório (movimento browniano);
- o volume das moléculas é desprezível quando comparados com o volume do recipiente que as contém.

Esse modelo de gás ideal facilita muito nossos cálculos e ainda nos permite encontrar resultados muito próximos para os gases reais!

O gás ideal não existe na Natureza, no entanto, podemos fazer com que um gás real se comporte de modo semelhante a um gás ideal.

Quando isso ocorre, esse gás real é denominado **Gás Perfeito**

Gás perfeito é um gás real que, tem suas variáveis de estado alteradas para assumir um comportamento próximo do gás ideal. Para isso, devemos eleva sua temperatura e baixar sua pressão.

Então, um gás perfeito é uma idealização em que são consideradas válidas as seguintes hipóteses:

Lei dos Gases Ideais

Que relação existe entre as variáveis de estado de um gás?

As leis a seguir foram obtidas a partir de observações experimentais, levando em consideração as variáveis de estado de um gás.

São consideradas três leis fundamentais para os gases perfeitos (ou ideais)

a) Lei de Boyle ou Lei de Boyle-Mariotte (Transformações Isotérmicas):

No final do século XVII, mais precisamente entre os anos de 1661/1662, **Robert Boyle** (1627-1691), físico e químico irlandês, por meio de observações experimentais quantitativas, verificou que ao variar a pressão exercida sobre um gás, mantida a temperatura constante, o volume ocupado pelo gás variava de maneira inversamente proporcional à variação da pressão.

Alguns anos depois, em 1676, retomando os experimentos realizados por Boyle, **Edme Mariotte** (1620 -1684), físico francês, descreveu a lei que rege às transformações gasosas **isotérmicas**, que ocorrem à temperatura constante, que, posteriormente ficou conhecida como **lei de Boyle-Mariotte**, onde validou as descobertas de Boyle para transformações gasosas à temperatura constante.

Tal lei pode ser enunciada da seguinte forma:

“Quando certa massa de um gás sofre uma transformação isotérmica, ou seja, transformação onde a temperatura é mantida constante, o volume dessa massa gasosa sofrerá uma variação tal que esta variação será inversamente proporcional à variação sofrida pela pressão.”

Matematicamente, podemos escrever: $p \cdot V = \text{constante}$

Como o produto da pressão pelo volume de uma transformação isotérmica é constante, podemos escrever, para n estados de uma mesma massa gasosa a seguinte relação:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = p_3 \cdot V_3 = \dots = p_n \cdot V_n \quad (\text{eq. 1})$$

De maneira genérica, o gráfico pressão (p) versus volume (V) (Figura 1) representativo dessa lei é:

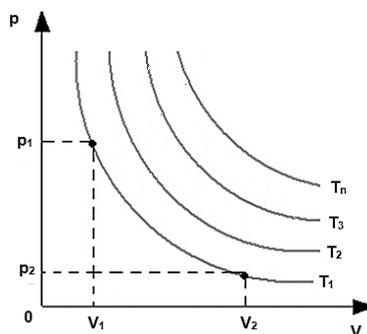


Figura 1 – gráfico $p \times V$ para transformações isotérmica

onde as curvas são ramos de hipérbolas equiláteras e cada uma é chamada de **isoterma**; no gráfico acima $T_n > T_3 > T_2 > T_1$.

b) **Lei de Charles e Gay-Lussac (Transformações Isobáricas):**

No ano de 1787 o químico francês **Jacques Alexandre Cesar Charles** (1746-1823), investigou o comportamento de massas gasosas quando submetidas a temperaturas diferentes, mas mantendo constante a pressão (transformações isobáricas) e verificou que havia variações no volume dessas massas gasosas. Porém, Charles não publicou os resultados de seus experimentos.

Em 1802, o físico e químico francês **Joseph Louis Gay-Lussac** (1778-1850), de maneira independente, chegou às mesmas conclusões. Gay-Lussac quantificou as observações de Charles e anunciou que uma certa massa constante de um gás se expande proporcionalmente à sua temperatura absoluta quando a pressão da referida massa gasosa permanece constante.

A lei que rege as transformações **isobáricas**, transformações à pressão constante, conhecida como **Lei de Charles e Gay-Lussac**, pode ser assim definida:

“À pressão constante (transformações isobáricas) o volume de uma certa massa de um gás é diretamente proporcional à temperatura absoluta a qual está submetida.”

Para uma mesma massa gasosa, sofrendo variações sempre à uma mesma pressão, podemos escrever a seguinte relação genérica:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} = \dots = \frac{V_n}{T_n} \quad (\text{eq. 2})$$

Temos então que o gráfico V X T (de uma transformação isobárica) é uma reta que mostra a proporcionalidade direta entre essas duas grandezas, como representado no gráfico abaixo (Figura 2).

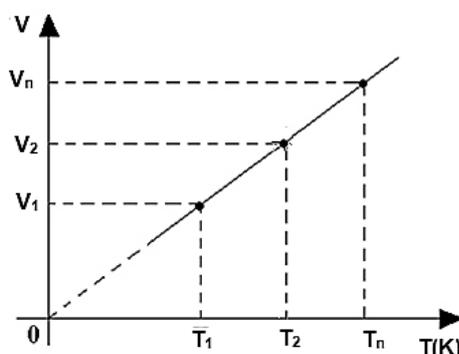


Figura 2 – gráfico V x T para uma transformação isobárica

c) **Lei de Charles (transformações Isovolumétricas) :**

Posteriormente, Gay-Lussac também verificou que a pressão do gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta em transformações isovolumétricas (ou isocóricas), ou seja, à volume constante, a pressão de uma certa massa constante de um gás é diretamente proporcional à temperatura absoluta a qual está submetida.

A lei que rege às transformações **isovolumétricas**, transformações à volume constante, conhecida como **Lei de Charles**, pode ser assim enunciada:

“À volume constante (transformações isovolumétricas) a pressão de uma certa massa de um gás é diretamente proporcional à temperatura absoluta a qual está submetida.”

Para uma mesma massa gasosa, sofrendo variações sempre à um mesmo volume (transformações isovolumétricas), podemos escrever a seguinte relação genérica:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} = \dots = \frac{p_n}{T_n} \quad (\text{eq. 3})$$

Temos então que o gráfico $p \times T$ (de uma transformação isovolumétrica) é uma reta que mostra a proporcionalidade direta entre essas duas grandezas.

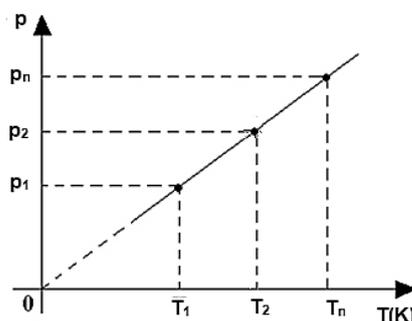


Figura 3 - gráfico $p \times T$ para uma transformação isovolumétrica

Lei Geral dos Gases Ideais (Perfeitos)

Ao longo das leis apresentadas até aqui, foram apresentados sempre casos em que existem sempre duas grandezas constantes: a massa e a temperatura, na lei de **Boyle-Mariotte**; massa e a pressão, na lei de **Charles e Gay-Lussac**; ou a massa e o volume, na lei de **Charles**. Há ainda, uma possibilidade em que apenas a massa permaneça constante, é o caso que analisaremos agora.

Imaginemos uma massa m de determinado gás submetida a certas condições iniciais de pressão (p_0), volume (V_0) e temperatura (T_0).

Essa massa gasosa sofre duas transformações particulares:

- **1ª transformação:** coloca-se essa massa m de gás em um cilindro de embolo livre, aquece-se tal cilindro, temos então uma expansão isobárica (à pressão constante), passando tal massa gasosa do estado 0 para o estado 1. Nesse caso, temos que o volume será:

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}, \text{então: } V_1 = \frac{V_0 \cdot T_1}{T_0} \quad (\text{eq. 4})$$

- **2ª transformação:** após atingir esse novo estágio, a pressão e a massa do gás continuam as mesmas, mas o volume e a temperatura mudaram. Leva-se então essa massa de gás a um estágio 2, no qual o mesmo sofre uma compressão isotérmica tendo, dessa forma, uma redução no volume e um aumento na pressão, representado por:

$$p_0 V_1 = p_2 V_2 \frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}, \text{então: } V_1 = \frac{V_0 \cdot T_1}{T_0} \quad (\text{eq. 5})$$

$$\text{como } T_1 = T_2, \text{temos } \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1} \quad (\text{eq. 6})$$

Portanto, se o gás evoluir para um outro estado qualquer, mantendo constante a massa, temos a chamada **Lei Geral dos Gases Perfeitos**:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{p_n V_n}{T_n} = k \quad (\text{eq. 7})$$

$$\text{Temos então que } \frac{pV}{T} = k \quad (\text{eq. 8})$$

Onde k é uma constante que depende da massa e da composição química do gás.

Equação de Clapeyron ou Equação de estado de um gás

A equação de Clapeyron, também conhecida como lei do gás ideal, ou lei de estado de um gás. Tal equação permite que se calcule o valor de uma das variáveis de estado de um gás quando se conhece a massa do gás em questão e as demais variáveis de estado.

Tal equação parte de uma análise da equação geral dos gases (eq. 8) :

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = k \quad (\text{eq. 8})$$

É possível se determinar o valor dessa constante, partindo do ponto que, nas CNTP, condições normais de temperatura e pressão, onde a pressão é de 1 atm e a temperatura é 0°C (273 K), o volume de 1 mol de um gás é 22,4L. Substituindo tais valores, temos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 22,4 \text{ L}}{273 \text{ K}} = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{K}}$$

Para um número maior de mols de gás, basta acrescentar um fator **n** referente à quantidade de mols a se considerar:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = n \cdot 0,082 \quad (\text{eq. 9})$$

Chega-se assim, a chamada **Equação de Clapeyron**, que relaciona as variáveis de estado de um gás com a quantidade de matéria, em mols.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{eq. 10})$$

Onde: n = quantidade de matéria em mols e
R = constante universal dos gases perfeitos

O valor de R depende das unidades utilizadas na equação de Clapeyron, como:

$$R = 0,082 \frac{\text{atm. L}}{\text{mol. K}}; R = 8,3 \frac{\text{J.}}{\text{K. mol}} \text{ (no SI)}$$

Nota:

Para contextualizar as anotações sobre o estudo dos gases, utilizar o motor Stirling construído pelos alunos, e em grupos (os mesmos que construíram os motores) fazer uma discussão sobre onde se poderiam identificar as transformações gasosas estudadas.

O professor vai intermediar a discussão tendo por base o texto “O CICLO STIRLING”.

Alguns questionamentos para nortear essa discussão (os grupos manuseando os seus respectivos motores):

- O que acontece com um gás quando sua temperatura muda? E se mudar o volume ou a pressão? Identifique essas mudanças analisando o seu motor *Stirling*
- É possível identificar quando o gás tem sua temperatura alterada? Quando?
- É possível identificar quando o gás tem sua temperatura mantida constante?
- É possível identificar quando o gás tem seu volume alterado? Quando?
- É possível identificar quando o gás tem seu volume mantido constante?
- Qual a etapa em que o gás tem sua pressão está alterada?
- Quais as alterações sofridas nas variáveis de estado no funcionamento do motor *Stirling*?



Figura 4 – Motor *Stirling* pronto (para ser usado nas reflexões desta aula)

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA TERMODINÂMICA

Atualmente fala-se em veículos elétricos e movidos a energia solar, porém estes veículos estão em fase de desenvolvimento para chegarem aos mercados consumidores em grande escala.

O que ainda impera hoje no mercado automobilístico mundial são os veículos com motores à explosão. Esse tipo de motor é regido pelo princípio básico da energia térmica, obtida pela queima de combustíveis, sendo convertida em energia cinética por meio de rápidas expansões de volumes gasosos. São essas expansões que movem os êmbolos do motor, os quais, nos automóveis, são chamados cilindros ou pistões. Dependendo do modelo, os motores desses veículos podem ser mais ou menos eficiente e mais ou menos poluentes.

Os veículos com motores há explosão hoje existentes são evoluções de modelos que surgiram quando o homem “dominou” a tecnologia das máquinas térmicas, que teve seu início no apogeu das máquinas a vapor.

Para entendermos como isso foi possível, precisamos adentrar no campo da Termodinâmica.

Segundo o dicionário Michaelis, Termodinâmica significa “ramo da física que estuda as relações entre calor, trabalho e outras formas de energia, as propriedades das substâncias que interagem nessas relações e como a energia pode ser transformada de uma forma em outra.”

A partir dessa definição, temos alguns conceitos a discutir para bem estudarmos a termodinâmica e, por conseguinte, entendermos o funcionamento das máquinas térmicas e dos motores à explosão, usados nos veículos que transitam pelas nossas cidades.

CONCEITOS INICIAIS PARA O ESTUDO DE TERMODINÂMICA

Trabalho de um gás:

Trabalho de um gás, ou trabalho termodinâmico, é a medida da energia que um gás, confinado em um recipiente, cede ao se expandir ou que o gás recebe ao ser comprimido.

Se consideramos o motor *Stirling*, quando fornecemos calor ao mesmo, percebemos o movimento dos pistões, esse movimento dos pistões é o que chamamos de trabalho termodinâmico. Um motor *Stirling* sempre contém um gás pressurizado no seu interior, que é chamado de gás de trabalho. A Potência é gerada pelo aquecimento e resfriamento do gás de trabalho pelo lado externo do cilindro. Esse gás de trabalho é movimentado da parte fria para a parte quente do motor e vice-versa, através de pistões. Com isso, se obtém acréscimo ou decréscimo da temperatura do gás de trabalho. A mudança na temperatura do gás de trabalho causa uma subsequente mudança na pressão do mesmo, que gera força para movimentar o pistão.

Se consideramos que o motor *Stirling* está recebendo calor de uma fonte térmica, temos que a energia térmica fornecida pela fonte de calor aumenta o nível de agitação das partículas do gás confinado no pistão do mesmo. Essas partículas, mais agitadas colidem com maior frequência e intensidade com o pistão, provocando a subida dele.

Temos então uma variação da energia cinética das partículas do gás, provocando as seguintes transformações de energia: da fonte de calor (energia térmica) para o gás (energia cinética) e do gás (energia cinética) para o pistão (energias cinética e potencial); nesta última, verifica-se a realização de trabalho do gás sobre o pistão.

A definição de trabalho (τ), vista no estudo de mecânica, está associada ao deslocamento de um corpo devido a aplicação de uma força, paralela ao referido deslocamento:

$$\tau = F \cdot d \cdot \cos\theta \quad (\text{eq. 11})$$

Se considerarmos um gás confinado em um cilindro (tipo o que compõe o motor *Stirling*) a força aplicada é perpendicular ao êmbolo e, conseqüentemente, paralela ao deslocamento, formando um ângulo de 0° com o deslocamento do pistão na subida (expansão do gás devido ao aquecimento) e de 180° na descida do pistão (contração do gás devido ao resfriamento). Daí, temos que (partindo da eq. 11):

$$\tau = F \cdot d \cdot \cos\theta; \text{ para } \theta = 0^\circ, \cos 0^\circ = 1 \text{ então:}$$

$$\tau = F \cdot d; \quad (\text{eq. 12})$$

Multiplicando o segundo termo da eq. 12 por $\frac{A}{A}$, onde A é a área do cilindro, teremos:

$$\tau = F \cdot d \cdot \frac{A}{A} = \left(\frac{F}{A}\right) d \cdot A \quad (\text{eq. 13})$$

Como d é o deslocamento do êmbolo no cilindro, temos que esse deslocamento provoca uma variação (ΔV) no volume do gás. Lembrando que pressão (p) é definida como:

$$p = \frac{F}{A}, \quad (\text{eq. 14})$$

Substituindo eq. 14 em eq. 13, teremos:

$$\tau = F \cdot d \cdot \frac{A}{A} = \left(\frac{F}{A}\right) d \cdot A = p \Delta V$$

$$\tau = p \Delta V \quad (\text{eq. 15})$$

DIAGRAMA PRESSÃO x VOLUME (p x V) – DIAGRAMA DE CLAPEYRON

O trabalho termodinâmico é determinado por duas grandezas, a pressão e a variação do volume ($\tau = p \Delta V$), (eq. 15).

Se tivermos um gráfico que relacione as grandezas pressão e volume, representado diversos estágios de uma transformação gasosa, podemos

generalizar que o módulo do trabalho pode ser obtido por meio do diagrama pressão x volume. Basta que consideremos a área **A** compreendida entre a curva que represente as evoluções sofridas pelo gás e o eixo do volume, conforme gráfico abaixo (Figura 5):

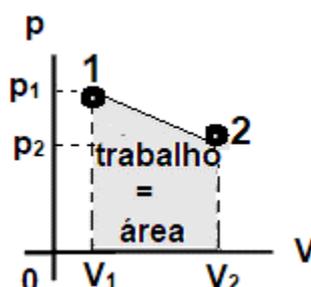


Figura 5 –gráfico p x V onde está em destaque a área do gráfico que é igual ao módulo do trabalho

Podendo o trabalho ser positivo (motor) ou negativo (resistente), devemos sempre observar como se deu a variação do volume. Se houver expansão, haverá trabalho realizado pelo gás, ou seja, trabalho positivo; se houver contração, haverá trabalho realizado do êmbolo sobre o gás, portanto, trabalho negativo.

$$\Delta V > 0 \Rightarrow \tau > 0 \Rightarrow \text{trabalho realizado pelo gás sobre o êmbolo}$$

$$\Delta V < 0 \Rightarrow \tau < 0 \Rightarrow \text{trabalho realizado do êmbolo sobre o gás}$$

Nota:

Para contextualizar as anotações sobre trabalho termodinâmico, utilizar o motor *Stirling* construído pelos alunos, e em grupos (os mesmos que construíram os motores) fazer uma discussão, com os grupos sobre onde se poderiam identificar a realização de trabalho no funcionamento do motor.

O professor vai intermediar a discussão tendo por base o texto “O CICLO STIRLING”.

Alguns questionamentos para nortear essa discussão (os grupos manuseando os seus respectivos motores):

- É possível dizer que no funcionamento do motor Stirling há realização de trabalho?
- Em que etapa podemos identificar que o trabalho é positivo? E negativo?

PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica é uma variação do princípio de conservação da energia, que expressa de maneira geral que: “a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada”.

Para definir corretamente a primeira lei da termodinâmica, é necessário entender que um sistema é um conjunto de partículas hermeticamente isolado.

Podemos ter um sistema formado por uma massa de um gás, uma pessoa, um conjunto de planetas, ou até mesmo o universo pode ser considerado um sistema.

Todo sistema apresenta uma energia interna (U), correspondente à soma das energias cinéticas (E_C) (de translação e rotação) e da sua energia potencial (E_P).

$$U = E_C + E_P \quad (\text{eq. 16})$$

Porém, quando consideramos os gases perfeitos, essa energia interna é representada apenas por sua energia cinética (E_C), não sendo, portanto, consideradas as energias potenciais (E_P) gravitacional e/ou elétrica. Temos então:

$$U = E_C \quad (\text{eq. 17})$$

Para um gás ideal monoatômico, temos que sua energia interna é definida por:

$$U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T \quad (\text{eq. 18})$$

Onde: U – energia interna do gás monoatômico
n – número de mols
R – constante universal dos gases perfeitos
T – temperatura na escala Kelvin

Para um gás ideal hermeticamente fechado, há duas formas de troca de energia com o meio: mediante trabalho (realizado pelo gás ou sobre o gás) ou mediante calor (recebido ou cedido pelo gás).

O princípio de conservação da energia garante que a energia total de um determinado sistema permanece constante.

Dessa forma, calor trocado com o sistema (Q) será igual à soma da variação da energia interna do gás (ΔU) com o trabalho realizado pelo/sobre o gás (τ), tendo em vista que ocorre uma conversão do calor nessas duas outras formas de energia:

$$Q = \Delta U + \tau \quad (\text{eq. 19})$$

Temos então que a quantidade de calor trocada com um sistema gasoso é a responsável pela mudança de estado de um gás, e, portanto, pela alteração na pressão, volume e/ou temperatura, sempre sem alteração na quantidade de energia total do gás, ou seja, sem ferir a lei de conservação da energia.

CONSEQUÊNCIAS DA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

TRANSFORMAÇÃO ISOVOLUMÉTRICA: transformação em que o volume do gás permanece constante.

Na transformação isovolumétrica não há deslocamento do êmbolo; então o trabalho é nulo. ($\tau = 0$). Logo, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, para uma transformação isovolumétrica, temos:

$$Q = \Delta U \quad (\text{eq. 20})$$

onde toda a quantidade de calor trocada com o sistema é utilizada para a variação da energia interna do gás:

- se o gás recebe calor ($Q > 0$), ocorre um aumento da energia interna do gás, o que provoca um aumento da temperatura do mesmo;
- se o gás cede calor ($Q < 0$), ocorre uma redução na energia interna do gás, o que provoca uma diminuição da temperatura do mesmo.

Partindo da igualdade $Q = \Delta U$ (eq. 20), teremos, para um gás monoatômico:

$$Q = \Delta U$$

$$mc\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T \quad (\text{eq. 21})$$

Lembrando que n (números de mols) é $n = \frac{m}{M}$ (eq. 22)

Substituindo eq. 21 na eq. 20, teremos:

$$mc\Delta T = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T \quad (\text{eq. 23})$$

Cancelando os termos iguais na eq. 22, teremos:

$$Mc = \frac{3}{2} R \quad (\text{eq. 24})$$

Chamando Mc de C_v , teremos:

$$C_v = \frac{3}{2} R \quad (\text{eq. 25})$$

A grandeza física encontrada acima, na eq. 25, define o calor molar de um gás ideal a volume constante (C_v). Ela representa a quantidade de calor que um mol desse gás precisa para variar uma unidade de temperatura na escala absoluta (escala Kelvin).

TRANSFORMAÇÃO ISOBÁRICA: transformação em que a pressão permanece constante.

A transformação isobárica se dá com deslocamento do êmbolo. A aplicação da primeira lei da termodinâmica na transformação isobárica ocorre na forma integral, pois o deslocamento do êmbolo é no recebimento de calor, em que a expansão do gás, ou na liberação de calor pelo gás, em que esse gás se contrai, havendo então a realização de trabalho do gás sobre o meio ou o recebimento de trabalho do gás pelo meio externo.

Nas duas situações citadas há a variação a temperatura do gás, ocasionada pela variação da energia interna do mesmo. Para tal situação, utilizando a primeira lei da termodinâmica, teremos:

$$Q = \tau + \Delta U, \text{ (eq. 18)}$$

desenvolvendo a mesma para um gás monoatômico, teremos:

$$mc\Delta T = p\Delta V + \frac{3}{2}nR\Delta T, \text{ (eq. 26)}$$

aplicando da equação de Clapeyron ($p\Delta V = nR\Delta T$), temos:

$$mc\Delta T = nR\Delta T + \frac{3}{2}nR\Delta T \text{ (eq. 27)}$$

cancelando ΔT teremos:

$$mc = \left(nR + \frac{3}{2}nR \right) \text{ (eq. 28)}$$

cancelando m , teremos:

$$c = \frac{1}{M}R + \frac{3}{2}\frac{1}{M}R \text{ (eq. 29)}$$

$$Mc = R + \frac{3}{2}R \Rightarrow Mc = \frac{5}{2}R \text{ (eq. 30)}$$

Fazendo $Mc = C_P$, temos:

$$C_P = \frac{5}{2}R; \text{ (eq. 31)}$$

onde C_P é o calor molar do gás a pressão constante.

A grandeza física encontrada acima (eq. 31) define o calor molar de um gás à pressão constante (C_P). Essa grandeza representa a quantidade de calor que um mol desse gás absorve ou cede para variar uma unidade de temperatura na escala absoluta (escala Kelvin)

RELAÇÃO ENTRE OS CALORES MOLARES

Determinada massa de um gás pode sofrer um aquecimento (ou resfriamento) isovolumétrico ou isobárico; sendo assim, as grandezas definidas como calor molar serão úteis no cálculo da quantidade de calor envolvido. Podemos relacioná-las da seguinte forma:

$$C_p - C_v = \frac{5}{2}R - \frac{3}{2}R \quad (\text{eq. 32})$$

$$C_p - C_v = R \quad (\text{eq. 33})$$

Essa expressão é conhecida como **Relação de Mayer**, e é válida para os gases ideais monoatômicos, diatômicos ou poliatômicos.

Uma outra relação que envolve essas grandezas é o **Coefficiente de Poisson (γ)**, utilizado nas transformações rápidas. Esse coeficiente é definido por:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (\text{eq. 34})$$

Para um gás monoatômico, temos:

$$\gamma = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} \Rightarrow \gamma = \frac{5}{3} \Rightarrow \gamma \cong 1,67$$

TRANSFORMAÇÃO ADIABÁTICA

Vimos até agora transformações que ocorrem com determinada massa gasosa devido às trocas de calor entre o sistema e o ambiente, recebendo calor do meio ou cedendo calor ao meio.

Há, porém, a possibilidade de haver transformação na massa de gás sem que haja a troca de calor deste com o ambiente; é o que chamamos de transformação adiabática.

Transformações desse tipo podem ser obtidas utilizando-se um recipiente com paredes isolantes ou por meio de uma compressão ou uma expansão rápida do gás, o que não permite a troca de calor durante a transformação.

Na figura abaixo (Figura 6) temos o diagrama $p \times V$ para uma transformação adiabática:

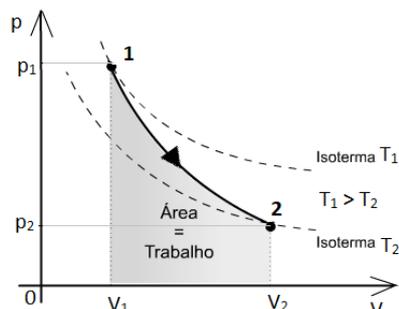


Figura 6 – gráfico $p \times V$ representando uma transformação adiabática (fonte: Válio, 2018)

Esse diagrama representa uma expansão adiabática de uma certa massa gasosa, em que há uma redução da pressão e da temperatura (ao passar do estado 1 para o estado 2); na compressão adiabática aconteceria o contrário, um aumento da pressão e da temperatura.

Para uma transformação adiabática, considerando constante a massa do gás e, aplicando a lei geral dos gases perfeitos (eq. 7), teremos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (\text{eq. 7})$$

Temos que, para uma transformação adiabática, vale a relação:

$$pV^\gamma = \text{constante} \Leftrightarrow p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (\text{eq. 35})$$

em que γ é o coeficiente de Poisson, já definido anteriormente.

Aplicando a primeira lei da termodinâmica para uma transformação adiabática, temos:

$$Q = \tau + \Delta U \quad (\text{eq. 18})$$

Como em uma transformação adiabática temos $Q = 0$, resulta que:

$$Q = \tau + \Delta U \Rightarrow 0 = \tau + \Delta U \Rightarrow \tau = -\Delta U \quad (\text{eq. 36})$$

Essa equação indica que, como não há trocas de calor entre o gás e o ambiente, todo o trabalho realizado ou recebido pelo gás é convertido integralmente em energia interna do gás; daí temos que, em uma compressão adiabática ocorre o aquecimento do gás e em uma expansão adiabática, temos um resfriamento do gás.

Na figura abaixo (Figura 7) temos, na situação inicial (i), um gás confinado em um recipiente de paredes adiabáticas sobre o qual está caindo um bloco de determinada massa; ao ser atingido pelo bloco com grande força, na situação final (f), o êmbolo comprime rapidamente a massa do gás, provocando a realização de um trabalho sobre o gás ($\tau < 0$) e, conseqüentemente, um aumento na energia interna do gás ($\Delta U > 0$).

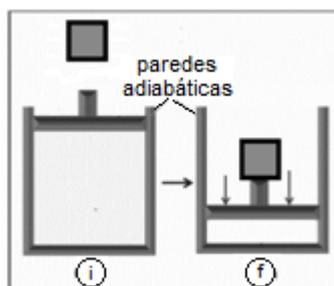


Figura 7 – representação de uma transformação adiabática (autoria própria)

Ao contrário, se o gás se expandir rapidamente, realizando um trabalho sobre o sistema ($\tau > 0$), provocando uma diminuição na energia interna do gás ($\Delta U < 0$).

Nota:

Para contextualizar as anotações sobre trabalho termodinâmico, utilizar o motor *Stirling* construído pelos alunos, e em grupos (os mesmos que construíram os motores) fazer uma discussão, com os grupos sobre onde ver a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica no funcionamento do motor.

O professor vai intermediar a discussão tendo por base o texto “O CICLO STIRLING”.

Alguns questionamentos para nortear essa discussão (os grupos manuseando os seus respectivos motores):

- O que acontece com o funcionamento do motor se o mesmo for alimentado por uma fonte de calor mais potente?
- É possível se identificar, no funcionamento do motor, que tipo de transformações?

AS MÁQUINAS TÉRMICAS E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Máquina térmica é qualquer dispositivo cuja finalidade é transformar calor em trabalho. Existem máquinas térmicas de combustão externas como as locomotivas a vapor e o motor *Stirling*, e máquinas térmicas de combustão interna como o motor de um automóvel.

Máquinas térmicas são máquinas que trabalham em ciclos, realizando trabalho útil, a partir da circulação de calor, fornecido por um combustível, entre duas fontes: a **fonte quente** (a câmara de combustão nos motores dos automóveis, as caldeiras nas locomotivas e usinas termoelétricas, e a chama de uma vela, no caso do motor *Stirling* desenvolvido pelos alunos) e a **fonte fria** (o ar atmosférico, no caso dos motores dos automóveis, das locomotivas e do motor *Stirling* desenvolvido pelos alunos ou por uma massa de água, no caso das termoelétricas). Entre essas duas fontes ocorrerá a formação do fluxo de calor (da fonte quente para a fonte fria), que estabelece o funcionamento da máquina térmica. Boa parte do calor ao ser absorvido pela fonte fria fica “indisponível” e não poderá ser convertido em trabalho útil, porém, tal fonte é indispensável para que se estabeleça o fluxo de calor necessário ao funcionamento da máquina térmica.

No esquema a seguir (Figura 8), podemos identificar simplificada o funcionamento de uma máquina térmica.

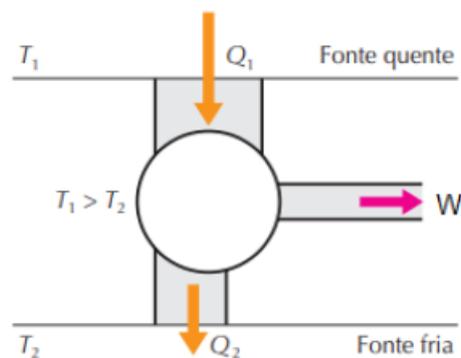


Figura 8 – representação esquemática do funcionamento de uma máquina térmica
Fonte: Júnior, Ferraro, & Soares, 2009

Na figura acima temos a quantidade de calor liberado pela fonte quente (Q_1), a quantidade de calor rejeitado à fonte fria (Q_2) e o trabalho (τ), realizado pelo gás.

Matematicamente, temos que:

$$Q_1 = \tau + Q_2 \quad (\text{eq. 37})$$

RENDIMENTO DE UMA MÁQUINA TÉRMICA (η)

O rendimento de uma máquina térmica é definido pela razão entre o trabalho útil realizado pela máquina e o calor cedido pela fonte quente.

$$\eta = \frac{\tau}{Q_1} \quad (\text{eq. 38})$$

Como: $Q_1 = \tau + Q_2$ (eq. 37), podemos ter:

$$\tau = Q_1 - Q_2 \quad (\text{eq. 39})$$

daí,

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (\text{eq. 40})$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (\text{eq. 41})$$

O REFRIGERADOR

Em uma máquina térmica, o calor flui, de forma espontânea, da fonte de maior temperatura para a de menor temperatura. É possível, porém, que esse sentido seja invertido se for realizado um trabalho sobre o gás. Teremos então um processo induzido. É o que ocorre nas chamadas **máquinas frigoríficas**, das quais a geladeira doméstica e o aparelho de ar-condicionado são exemplos, cuja função é retirar calor de um ambiente frio (parte interna) para um ambiente quente (parte externa).

O funcionamento das máquinas frigoríficas é possível pela realização de um trabalho sobre o gás, proporcionado por um compressor elétrico.

O esquema a seguir ilustra o funcionamento de uma máquina frigorífica (Figura 9).

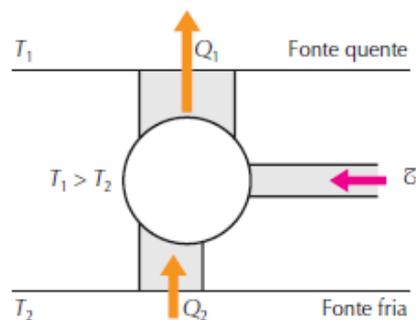


Figura 9 – representação esquemática do funcionamento de uma máquina frigorífica
Fonte: Júnior, Ferraro, & Soares, 2009

Enquanto nas máquinas térmicas falamos em rendimento para avaliarmos a relação entre o trabalho realizado e o calor recebido da fonte quente, nas máquinas frigoríficas temos a **eficiência**, para medir a relação do calor retirado da fonte fria e o trabalho realizado sobre o gás. Definindo eficiência, temos:

$$e = \frac{Q_2}{\tau} \quad (\text{eq. 42})$$

Quando tivermos um diagrama $p \times V$, representando um determinado ciclo termodinâmico, se considerarmos a área compreendida no referido gráfico, esta figura representa numericamente o Trabalho realizado em cada ciclo. Numericamente pois, dependendo do sentido do ciclo o trabalho poderá ser positivo ou negativo. Se o ciclo for no sentido horário, teremos uma máquina térmica, pois estará recebendo calor para realização de um trabalho positivo ($\tau > 0$); já se o sentido do ciclo for anti-horário, teremos uma máquina frigorífica, onde ocorre o recebimento de calor do ambiente para a retirada de calor, ou seja, o trabalho será negativo ($\tau < 0$) pois o meio irá realizar trabalho sobre o gás.

A figura a seguir (Figura 9) ilustra um diagrama $p \times V$ para uma determinada transformação cíclica sofrida por um gás. Se o ciclo for no sentido horário ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$), a área em destaque (região interna do gráfico) vai representar um trabalho positivo (uma máquina térmica); se porém, o ciclo for no sentido anti-horário ($1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$), a área em destaque vai representar um trabalho negativo (uma máquina frigorífica).

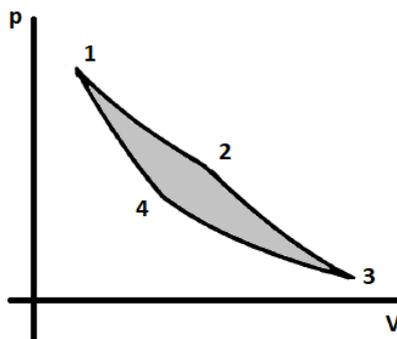


Figura 10 - gráfico $p \times V$ representando uma transformação cíclica (Fonte: Válio, 2018)

ALGUNS CICLOS TERMODINÂMICOS

O CICLO DE CARNOT

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), físico, matemático e engenheiro francês, em sua obra "Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines Propres a Développer Cette Puissance" (Reflexões sobre Potência Motriz do Fogo e Máquinas Próprias para Aumentar essa Potência), por sinal sua única obra. Nessa obra, Carnot buscou responder ao seguinte questionamento: que condições são necessárias para que uma máquina térmica tenha o maior rendimento possível?



Carnot idealizou uma máquina que, operando com um gás ideal, funcionaria com o ciclo, conhecido como Ciclo de Carnot, representado no diagrama abaixo (Figura 11):

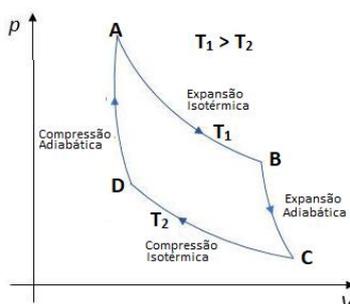


Figura 11 – gráfico p X V representando um ciclo de Carnot
(Fonte: Válio, 2018)

O Ciclo de Carnot é composto por duas transformações isotérmicas intercaladas com duas transformações adiabáticas. Esse ciclo é constituído da seguinte forma:

- Expansão Isotérmica (AB): o gás recebe calor do meio para realizar trabalho sob uma temperatura constante T_1 (temperatura da fonte quente);
- Expansão Adiabática (BC): o gás realiza trabalho, sem trocar calor com o meio externo, tendo uma diminuição na sua temperatura;
- Compressão Isotérmica (CD): o gás cede calor ao meio, a uma temperatura constante T_2 (temperatura da fonte fria);
- Compressão Adiabática (DA): o gás recebe trabalho do meio externo sem trocar calor com o meio externo, tendo um aumento na sua temperatura.

Rendimento no Ciclo de Carnot

Analisando o gráfico acima, temos que na expansão isotérmica (AB), uma quantidade de calor Q_1 é absorvida pelo gás a partir da fonte quente; na

compressão isotérmica (DA) certa quantidade de calor Q_2 é cedida pelo gás à fonte fria.

Temos então que, na compressão isotérmica (DA), o trabalho recebido pelo gás é igual à quantidade de calor cedida pelo gás à fonte ($Q_2 = \tau$), já que não houve variação da energia interna ($\Delta U = 0$). Assim temos que, quanto menor for a temperatura da fonte fria, menor será a quantidade de calor fornecida a fonte fria e, conseqüentemente, melhor será o rendimento dessa máquina térmica.

Pode-se então, dizer que, em uma máquina térmica que funciona segundo o Ciclo de Carnot o calor recebido da fonte quente e rejeitado à fonte fria são proporcionais às temperaturas absolutas dessas referidas fontes:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{eq. 43})$$

Lembrando que o rendimento (η) para uma máquina térmica qualquer é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (\text{eq. 41})$$

Para o Ciclo de Carnot, podemos escrever então:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{eq. 44})$$

Para uma máquina operando num ciclo de Carnot, seu rendimento só atingiria 100% quando a temperatura da fonte fria fosse de 0K; como essa temperatura não é possível de ser atingida, também não é possível uma máquina de Carnot ter rendimento de 100%.

Por ser um ciclo hipotético, o Ciclo de Carnot serve então como “referência” para as demais máquinas térmicas. Temos então que, nenhuma máquina térmica, operando em ciclo sobre duas temperaturas T_1 e T_2 , quaisquer, onde $T_1 > T_2$, poderá ter rendimento maior que o previsto para essas mesmas temperaturas quando considerado o ciclo de Carnot.

O MOTOR STIRLING

Histórico do motor *Stirling*

Robert Stirling, nasceu em 25 de outubro de 1790 na zona rural de Perthshire, na Escócia e faleceu em 6 de junho de 1878 em Galston.



Figura 12 - ROBERT STIRLING (1790-1878)

Fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Robert_Stirling.jpg

Filho de fazendeiro, nasceu numa época em que melhorias agrícolas por meio de recuperação de terras e novas máquinas estavam em pleno andamento na Grã-Bretanha. Michael *Stirling*, seu avô, já havia inventado, em 1785, uma debulhadeira rotativa acionada por energia hidráulica (BARROS, 2005).

Os motores a vapor da época, onde o caráter cíclico não era evidente já que tais máquinas recebiam calor de uma caldeira, transformavam a expansão em trabalho e o rejeitavam depois de condensado na forma de água quente (Aurani, 1986), eram considerados perigosos, devido à riscos de queimaduras e explosões devido as altas pressões atingidas pelo vapor e do uso de materiais inadequados.

Preocupado com essa situação, Robert Stirling decide buscar alternativas para diminuir esses riscos, que essas máquinas representavam para a saúde e a vida de seus operadores.

A invenção de um motor de combustão externa de ciclo fechado por Robert Stirling foi algo tão avançado cientificamente para a época que pelo menos 30 anos se passaram sem que se pudesse entender o funcionamento do motor por completo, complementa Barros (2005).

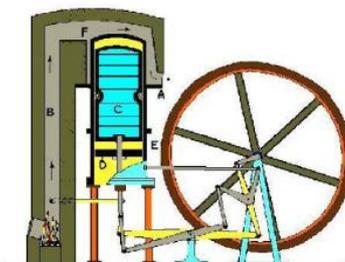


Figura 13 - Figura mostrando o desenho esquemático do motor original proposto por Robert Stirling

Fonte: Barros (2005)

O CICLO STIRLING

O ciclo de *Stirling* propriamente dito é um ciclo termodinâmico ideal composto de dois processos regenerativos isotérmicos (temperatura constante) e dois isométricos (volume constante) como mostrado nos planos pressão-volume ($p \times V$) e temperatura entropia ($T \times S$) na Figura abaixo.

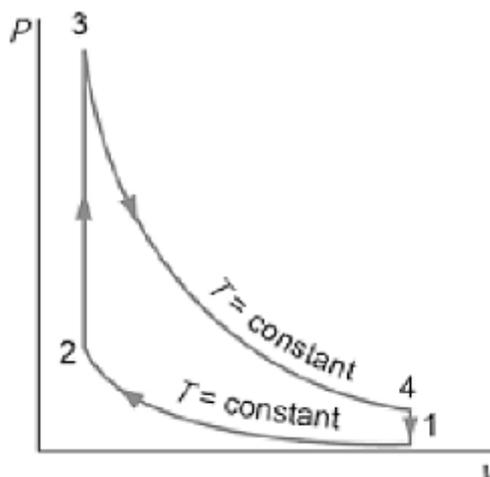


Figura 14 - Figura mostrando um diagrama pressão x volume, onde temos os tempos de funcionamento de um ciclo de um motor *Stirling*
Fonte: Adaptado de (Borgnakke & Sonntag, 2009)

No diagrama representado na figura 14 temos:

- 1 → 2 – Compressão isotérmica: tempo em que o ar contido dentro do motor é contraído e sua pressão é aumentada à temperatura constante. Um trabalho (W_{12}) é realizado sobre o fluido de trabalho enquanto uma quantidade de calor é rejeitada à fonte fria. Temos então que o fluido de trabalho esfria e se contrai enquanto a temperatura se mantém constante;
- 2 → 3 – Aquecimento isovolumétrico: tempo em que ocorre uma elevação da temperatura e conseqüente aumento na pressão, onde há transferência do calor da fonte quente para o fluido de trabalho sem que haja realização de trabalho sobre o mesmo;
- 3 → 4 – Expansão isotérmica: tempo em que o ar contido no motor sofre uma expansão isotérmica, absorvendo o calor de fontes externas. Um trabalho (W_{34}) é realizado pelo fluido de trabalho enquanto uma quantidade igual de calor é fornecida ao sistema a partir da fonte quente. Nessa etapa o fluido de trabalho se expande mantendo a temperatura constante;
- 4 → 1 – Resfriamento isovolumétrico: tempo em que ocorre a diminuição da temperatura e pressão devido à transferência de calor fluido de trabalho para o meio externo, sendo mantido o volume constante, não havendo, portanto, realização de trabalho.

Para ilustrar a sequência de operações, tomando por base o texto de (Thombare & Verma, 2008), vejamos os seguintes passos: considere um cilindro contendo dois pistões opostos com um regenerador entre os pistões (Figura 15). O

regenerador pode ser pensado como uma esponja termodinâmica, liberando e absorvendo calor alternadamente. É uma matriz de metal finamente dividido na forma de fios ou tiras. Um dos dois volumes entre o regenerador e os pistões é chamado de espaço de expansão e é mantido em um T_{max} de alta temperatura. O outro volume é chamado de espaço de compressão e é mantido a uma temperatura baixa T_{min} . Existe, portanto, um gradiente de temperatura ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$) através das faces transversais do regenerador, mas assume-se que não há condução térmica na direção longitudinal. Supõe-se ainda que os pistões se movem sem atrito ou perda de vazamento do fluido de trabalho entre eles.

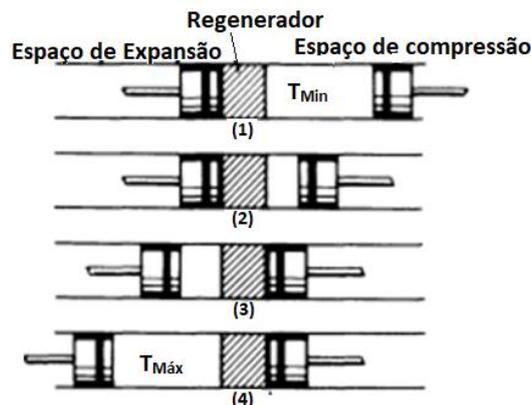


Figura 15 - sequência de funcionamento de um ciclo de *Stirling*
fonte: autoria própria, adaptado de Thombare & Verma (2008)

Para iniciar o ciclo, assumo o pistão de espaço de compressão no ponto morto externo e o pistão de espaço de expansão no ponto morto interno, próximo à face do regenerador. Todo o fluido de trabalho é então no espaço de compressão a frio e o volume é um máximo, então a pressão e a temperatura são valores mínimos, representados por 1 nos diagramas P-V e T-S. Durante a compressão (processo 1-2), o pistão de compressão se move em direção ao ponto morto interno e o pistão do espaço de expansão permanece estacionário. O fluido de trabalho é comprimido no espaço de compressão e a pressão aumenta. A temperatura é mantida constante porque o calor, Q , é abstraído do circuito de compressão para as imediações.

No processo de transferência 2-3, ambos os pistões se movem simultaneamente, o pistão de compressão para (e o pistão de expansão se afasta) do regenerador, de modo que o volume entre eles permaneça constante. Portanto, o fluido de trabalho é transferido, através da matriz metálica porosa do regenerador, do espaço de compressão para o espaço de expansão. Na passagem pelo regenerador, o fluido de trabalho é aquecido de T_{min} para T_{max} 'por transferência de calor da matriz, e emerge do regenerador para o espaço de expansão na temperatura T_{max} ' O aumento gradual da temperatura na passagem através da matriz, em volume constante, provoca um aumento na pressão.

Para expansão (processo 3-4), o pistão de expansão continua a se afastar do regenerador em direção ao ponto morto externo; o pistão de compressão permanece estacionário no ponto morto interno, adjacente ao regenerador. Conforme a expansão prossegue, a pressão diminui à medida que o volume aumenta. A temperatura permanece constante porque o calor QE é adicionado ao sistema a partir de uma fonte externa.

O processo final no ciclo é o processo de transferência 4-1, durante o qual ambos os pistões se movem simultaneamente para transferir o fluido de trabalho (em volume constante) de volta através da matriz regenerativa do espaço de expansão para o espaço de compressão. Na passagem através da matriz, o calor é transferido do fluido de trabalho para a matriz, de modo que o fluido de trabalho diminui em temperatura e emerge em T_{min} no espaço de compressão. O calor transferido neste processo está contido na matriz, para transferência para o gás no processo 2-3 do ciclo subsequente.

O ciclo é composto, portanto, de quatro processos de transferência de calor

Processo 1-2 - compressão isotérmica; transferência de calor do fluido de trabalho em T_{min} para o despejo externo.

Processo 2-3 - volume constante; transferência de calor para o fluido de trabalho a partir da matriz regenerativa.

Processo 3-4 - expansão isotérmica; transferência de calor para o fluido de trabalho no T_{max} de uma fonte externa.

Processo 4-1 - volume constante; transferência de calor do fluido de trabalho para a matriz regenerativa.

Se o calor transferido no processo 2-3 tiver a mesma magnitude que no processo 4-1, as únicas transferências de calor entre o motor e seu entorno são, (a) suprimento de calor no eixo e, (b) rejeição de calor em T_{min} . O fornecimento de calor e a rejeição de calor a temperatura constante satisfazem a exigência da Segunda Lei da Termodinâmica para eficiência térmica máxima, assim a eficiência, η , do ciclo de Stirling é a mesma do ciclo de Camot, ou seja, $(T_{max} - T_{min}) / T_{max}$. A principal vantagem do ciclo de Stirling sobre o ciclo de Carnot reside na substituição de dois processos isentrópicos por dois processos de volume constante, o que aumenta grandemente a área do diagrama P-V. Portanto, para obter uma quantidade razoável de trabalho do ciclo de Stirling, não é necessário recorrer a pressões muito altas e volumes varridos, como no ciclo de Carnot.

Bibliografia

- Afonso, C. F. (2012). *Termodinâmica para Engenharia, 1ª ed.* Porto, Portugal: FEUP Edições (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Aurani, K. M. (1986). Ensino de conceitos: estudo das origens da 2ª Lei da Termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Barros, R. W. (2005). Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis. *Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia)*. Itajubá: Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- BOLZAN, E. C., LIMA, W. V., LOBO, C., & LÜDKE, E. (OUTUBRO de 2017). PRINCÍPIOS DE TERMODINÂMICA PARA O ENSINO DE FÍSICA: EXPERIMENTO DE MOTOR DE STIRLING. *Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI*; v. 13 n. 25, 210-218. Acesso em outubro de 2019, disponível em http://www2.reitoria.uri.br/~vivencias/Numero_025/artigos/pdf/Artigo_21.pdf
- BORGNACKE, C., & SONNTAG, R. E. (2009). *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA.
- Brasil. (2002). PCN+ ensino médio: orientações educacionais complementares aos parâmetros. Brasília, Brasil. Fonte: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>
- GRASSELLI, E. C. (2018). Uma abordagem das Máquinas Térmicas no Ensino da Termodinâmica sob a ótica da Aprendizagem Significativa. *Dissertação (Mestrado)*. Medianeira, Paraná: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física.
- GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. (1998). *Leituras de Física, Física Térmica, pra ler, fazer e pensar*. São Paulo: Instituto de Física da USP. Fonte: <http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/termo3.pdf>
- Júnior, F. R., Ferraro, N. G., & Soares, P. A. (2009). *Os Fundamentos da Física. Física 2 10ª edição*. São Paulo: Editora Moderna.
- Luz, A. M., & Álvares, B. A. (2008). *Física; volume 2; 1ª edição*. São Paulo: Scipione.

- Rocha, R. F., & Dickman, A. G. (maio de 2016). Ensinando Termodinâmica por meio de Experimentos de Baixo Custo. *Abakós, Belo Horizonte*, v. 4, n. 2, 71-93. Acesso em outubro de 2019
- Sasaki, D. G. (26 a 30 de Janeiro de 2009). *ENSINANDO AS LEIS DA TERMODINÂMICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES EM JAVA SOBRE MÁQUINAS TÉRMICAS*. Acesso em outubro de 2019, disponível em SBF Sociedade Brasileira de Física:
<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/sys/resumos/T0849-1.pdf>
- SCHULZ, D. (2009). Ciclo de Stirling, Aprendizagem significativa de termodinâmica no ensino médio através do estudo de máquinas térmicas como tema motivador. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, UFRGS. Fonte: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_stirling.htm
- Thombare, D., & Verma, S. (2008). Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* n. 12, 1-38.
- Válio, A. B., Fukui, A., Ferdinian, B., Molina, M. d., & Venê. (2016). *Ser Protagonista: Física 2: Ensino Médio; 3ª edição (Coleção Ser Protagonista)*. São Paulo: Edições SM.
- Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford: University Press.