

CICLO DE CARNOT

META

Fazer com que o estudante comece a pensar no ensino de ciências como algo “orgânico” que está em profunda transformação. Fazer com que os alunos percebam, através de um texto básico complementado com atividades lúdicas, *applets* de ensino, vídeos, que o conceito de máquina térmica pode ser apreendido de forma simples e divertida. Que os estudantes percebam que a terminologia está intimamente ligada à tecnologia dos motores e refrigeradores.

OBJETIVOS

Ao final desta aula, o aluno deverá:

estar ciente das novas possibilidades e dos desafios que envolvem o ensino de ciências em geral. Estes, também, devem ter compreendido que as ciências naturais estão baseadas na experimentação e que esta é feita de ensaios, experiências e medidas e que estas levam a compreensão e matematização dos conceitos físicos (naturais em geral). Que o conceito de energia calorífica e trabalho, junto com as leis dos gases são de fundamental importância na compreensão dos fenômenos naturais e em aplicações tecnológicas como máquinas térmicas e refrigeradores..

PRÉ-REQUISITOS

Os alunos deverão ter cursado psicologia da educação física A e B

INTRODUÇÃO

O tema ciclo de *Carnot* em geral não é abordado no ensino médio. Mas, apesar disto o incluímos aqui no nosso curso, assim como os tópicos da teria cinética dos gases e entropia, por efeito de completeza e para que você perceba que mesmo sem perceber sempre estamos usando o modelo atômico e molecular para explicar e ilustrar nossas teorias físicas. Para que você se recorde em seguida apresentamos um resumo da teoria com muitas ilustrações e acompanhado de vários *applets* de ensino. Como o ciclo de *Carnot* é um ciclo ideal, não há exemplos de experimentos caseiros sobre esse tema. Mas colocaremos a você o desafio de bolar uma aula sobre este tema.

Na aula 6 vimos os ciclos dos motores a Diesel, Otto e Stirling. Lá não nos preocupamos com o rendimento ou eficiência dessas máquinas térmicas. Esses motores foram colocados lá como aplicações da transformação da energia calorífica em trabalho motor. Aqui vamos nos deparar com o problema da idealização ou construção de um motor ideal. Está na mídia o problema do consumo de energia e do aquecimento global. Há muito tempo o homem se depara com problema de se usar a energia e os recursos naturais de forma racional. É nessa aula que deparamos pela primeira vez com o problema de ser impossível se construir uma máquina ideal. Isto é, que transforme toda energia consumida em trabalho \rightarrow perda zero.

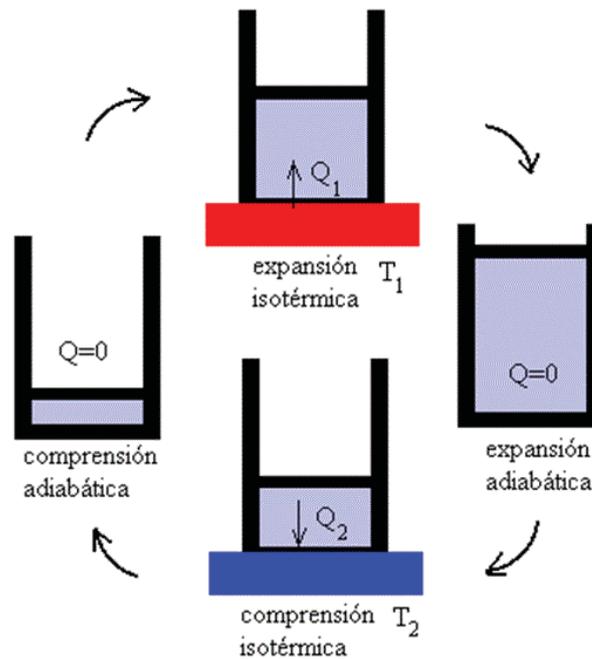
TEORIA

Sadi Carnot (1796 - 1832) foi um engenheiro francês que, em 1824, inventou uma máquina teórica a que deu o nome de engenho de *Carnot* [e-escola].

Suponhamos que a máquina funciona com um gás ideal, que está contido num cilindro onde numa das suas extremidades se encontra um pistão (êmbolo móvel). Idealiza-se tanto o cilindro como o pistão como não sendo condutores térmicos.

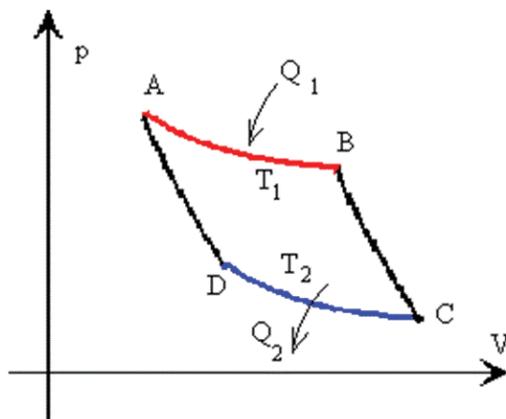
A máquina imaginada funcionaria segundo um ciclo de Carnot, que consiste na alternância de duas transformações isotérmicas com duas adiabáticas (não ocorre transferência de energia sob a forma de calor), tal como mostra a figura 1.

O ciclo de *Carnot* é um ciclo ideal, que trabalha entre duas temperaturas, T_f e T_q , e onde a segunda é superior à primeira. Pela observação da figura 1, constata-se que o ciclo funciona em quatro etapas:



A representação gráfica do ciclo de *Carnot* em um diagrama p-V é o seguinte

- Ramo A-B isotérmica a temperatura T_1
- Ramo B-C adiabática
- Ramo C-D isotérmica a temperatura T_2
- Ramo D-A adiabática



- Processo de A para B: corresponde a uma expansão isotérmica à temperatura T_1 . O gás é posto em contacto térmico, através da base do cilindro, com uma fonte de energia sob a forma de calor à temperatura T_1 . Durante a expansão do volume V_A para o volume V_B , o gás recebe energia, $|Q_1|$, e realiza trabalho, W_{AB} , para empurrar o pistão, aumentando, desta forma, o volume dentro do cilindro.

- Processo de B para C: a base do cilindro é substituída por uma parede não condutora e o gás expande de forma adiabática, isto é, não entra nem

sai do sistema energia sob a forma de calor. Durante a expansão, a temperatura do gás diminui de T_q para T_f e o gás realiza trabalho, W_{BC} , ao empurrar o pistão.

- Processo de C para D: o gás é posto em contacto térmico, através da base do cilindro, com uma fonte de energia sob a forma de calor à temperatura T_f e é comprimido isotermicamente. O pistão move-se de forma a diminuir a área dentro do cilindro, realizando trabalho, W_{CD} , sob o gás que é comprimido até ao volume V_D . Durante este processo, o gás transfere energia sob a forma de calor, $|Q_f|$, para a fonte fria.

- Processo de D para A: novamente a base do cilindro é substituída por uma parede não condutora, ocorrendo uma compressão adiabática. O gás continua a ser comprimido pelo pistão que realiza trabalho, W_{DA} , sob o gás, o qual aumenta novamente a sua temperatura até T_q , sem que haja qualquer troca de calor no sistema.

A quantidade de calor, Q , que o sistema absorve é:

$$Q = |Q_q| - |Q_f|$$

Quanto ao trabalho realizado pelo sistema, este é igual à área limitada pelas 4 curvas do gráfico PV, anteriormente apresentado. Pela 1ª lei da termodinâmica, para uma transformação cíclica, a variação de energia é zero, logo, é possível obter o trabalho realizado pelo engenho de *Carnot*:

$$\Delta U = 0$$

$$\Leftrightarrow W = |Q_q| - |Q_f|$$

Esta equação significa que apenas parte da energia sob a forma de calor que o ciclo absorve da fonte quente é transformado em trabalho, dado que a restante energia sob a forma de calor $|Q_f|$ é enviada para a fonte fria.

Vamos descrever abaixo passo a passo como se obtém o trabalho realizado em um ciclo de Carnot. Em qualquer ciclo, temos que obter a partir dos dados iniciais:

- A pressão e o volume de cada um dos vértices.
- O trabalho, o calor e a variação de energia interna em cada um dos processos.
- O trabalho total, o calor absorvido, o calor cedido, e o rendimento do ciclo.

Os dados iniciais são os que figuram na tabela abaixo. A partir destes dados, temos de preencher os vazios da tabela.

Variáveis	A	B	C	D
Pressão p (atm)	P_A			
Volume v (l)	V_A	V_B		
Temperatura T (K)	T_1	T_1	T_2	T_2

AS ETAPAS DO CICLO

Para obter as variáveis e grandezas desconhecidas faremos uso das fórmulas que figuram no quadro das transformações termodinâmicas abaixo.

Quadro-resumo das transformações termodinâmicas

Quadro-resumo das transformações termodinâmicas

Equação de estado de um gás ideal	$pV=nRT$
Equação de estado adiabática	$pV^\gamma = \text{cte}$
Relação entre os calores específicos	$cp - cV = R$
Índice adiabático de um gás ideal	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$
Primeiro Princípio da Termodinâmica	$\Delta U = Q - W$

1. Transformação A → B (isotérmica)

A pressão p_B é calculada a partir da equação do gás ideal $P_B V_B = nRT_1$

Varição de energia interna $\Delta U_{A \rightarrow B} = 0$

Trabalho $W_{A \rightarrow B} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}$

Calor $Q_{A \rightarrow B} = W_{A \rightarrow B}$

2. Transformação B → C (adiabática)

A equação de estado adiabática é $pV^\gamma = \text{cte}$ ou então, $Tv^\gamma = \text{cte}$. Explicitamos v_c da equação da adiabática $T_1 v_B^{\gamma-1} = T_2 v_C^{\gamma-1}$. Conhecido v_c e T_2 obtemos p_c , a partir da equação do gás ideal. $P_c V_c = nRT_2$.

Calor $Q_{B \rightarrow C} = 0$

Varição de energia interna $\Delta U_{B \rightarrow C} = n c_v (T_2 - T_1)$

Trabalho $W_{B \rightarrow C} = -\Delta U_{B \rightarrow C}$

3. Transformação C → D (isotérmica)

Varição de energia interna $\Delta U_{C \rightarrow D} = 0$

Trabalho $W_{C \rightarrow D} = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}$

Calor $Q_{C \rightarrow D} = W_{C \rightarrow D}$

4. Transformação D → A (adiabática)

Explicitamos v_D da equação da adiabática $T_1 v_A^{\gamma-1} = T_2 v_D^{\gamma-1}$. Conhecido v_D e T_2 obtemos p_D , a partir da equação do gás ideal. $p_D v_D = nRT_2$.

Calor $Q_{D \rightarrow A} = 0$

Variação de energia interna $\Delta U_{D \rightarrow A} = nC_v(T_1 - T_2)$

Trabalho $W_{D \rightarrow A} = -\Delta U_{D \rightarrow A}$

O CICLO COMPLETO

Variação de energia interna

$$\Delta U = \Delta U_{B \rightarrow C} + \Delta U_{D \rightarrow A} = 0$$

Em um processo cíclico reversível a variação de energia interna é zero

Trabalho

$$W = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow C} + W_{C \rightarrow D} + W_{D \rightarrow A} = nR(T_1 - T_2) \ln \frac{v_B}{v_A}$$

Os trabalhos nas transformações adiabáticas são iguais e opostos. A partir das equações das duas adiabáticas a relação entre os volumes dos vértices $\frac{v_B}{v_A} = \frac{v_C}{v_D}$ é , o que nos conduz a expressão final para o trabalho.

Calor

Na isotérmica T_1 é absorvido calor $Q > 0$ já que $v_B > v_A$ de modo que

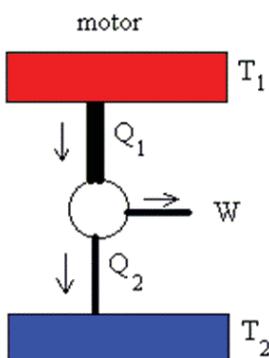
Na isotérmica T_2 é cedido calor $Q < 0$ já que $v_D < v_C$

Rendimento do ciclo

Define se rendimento como o quociente entre o trabalho realizado e o calor absorvido

$$\eta = \frac{W}{Q_{abs}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

MOTOR E REFRIGERADOR

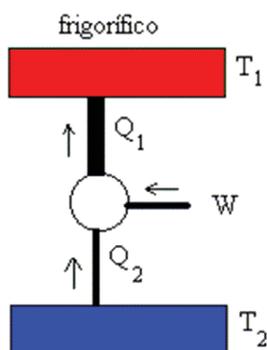


Um motor de *Carnot* é um dispositivo ideal que descreve um ciclo de *Carnot*. Trabalha entre duas fontes, tomando calor Q_1 da fonte quente e a temperatura T_1 , produzindo um trabalho W , e cedendo um calor Q_2 a fonte fria a temperatura T_2 .

Em um motor real, a fonte quente é representado pela caldeira de vapor que adiciona o calor, o sistema cilindro-êmbolo produz o trabalho, e é cedido calor a fonte fria que é a atmosfera.

A máquina de *Carnot* também pode funcionar em sentido inverso, denominando-se então refrigerador. É extraído calor Q_2 da fonte fria aplicando um trabalho W , e cede Q_1 a fonte quente.

Em um refrigerador real, o motor conectado a rede elétrica produz um trabalho que é empregado para extrair um calor da fonte fria (a cavidade do refrigerador) e é cedido calor a fonte quente, que é a atmosfera.



ATIVIDADES

1. Atividade usando o *applet* de Ensino do projeto “*Física com Ordenador*”.
Link <http://www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/estadistica/carnot/carnot.htm>

Introduzir os valores das seguintes variáveis

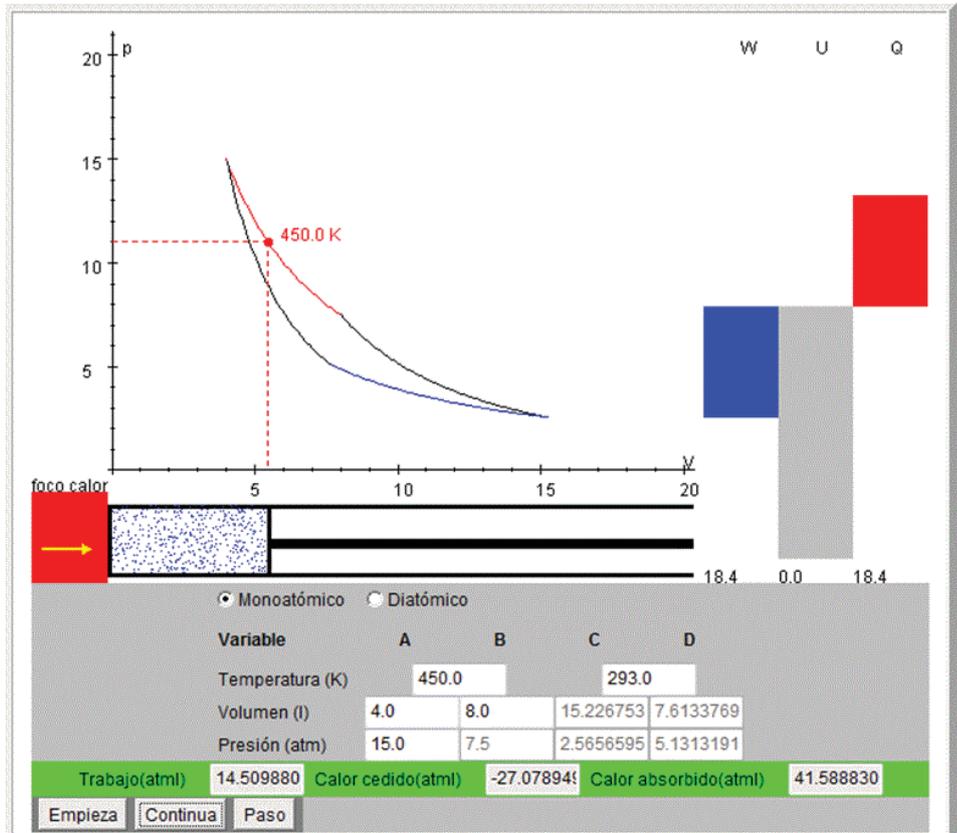
- Temperatura da fonte quente T_1
- Temperatura da fonte fria T_2
- Tem-se que cumprir que $T_1 > T_2$
- O volume de A, v_A
- O volume de B, v_B .
- Se tem que cumprir que $v_A < v_B$
- A pressão de A, p_A

Se não se cumprem as condições anteriores um mensagem é mostrada na borda inferior na simulação.

Uma vez introduzidos os dados clique no botão titulado Começar, o programa interativo calcula:

- A pressão e o volume de cada um dos vértices
- O trabalho, calor e variação de energia interna em cada uma das transformações
- O trabalho total, o calor absorvido e o calor cedido.

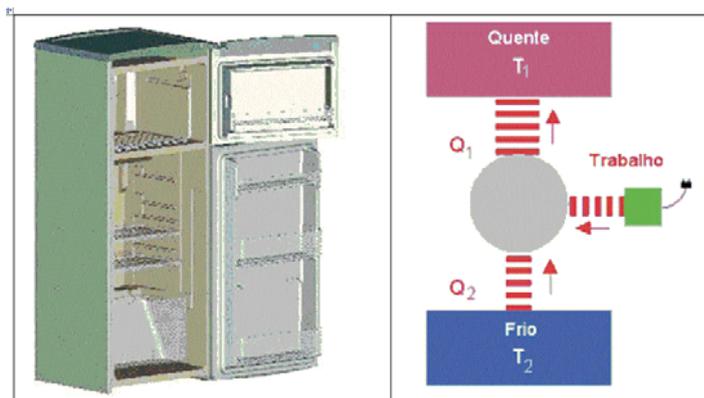




Texto de Aplicação. Refrigerador (UDESC – Mundo Físico)

Até algumas décadas atrás, o frio artificial era empregado quase unicamente na conservação de produtos alimentícios. A principal causa para tanto eram dificuldades de ordem técnica, relacionadas com a geração do frio. Os poucos refrigeradores encontrados nas residências e nas lojas - meros "armários" dotados de isolamento térmica - eram alimentados por grandes blocos de gelo, que uma central frigorífica - uma indústria de gelo - preparava e distribuía diariamente. Vem daí, aliás, o nome geladeira. Com a paulatina expansão da rede elétrica, entrou em cena o refrigerador movido a eletricidade.

O refrigerador é uma máquina de transferência de calor que capta o calor interno do refrigerador e o põe para fora. Isto se consegue por meio da constante evaporação e condensação do refrigerante. Para que se processe a evaporação, a troca do estado líquido para o gasoso é preciso calor, que é absorvido dos produtos existentes no refrigerador. A troca oposta, a condensação, expulsa o calor, que é liberado do refrigerante para o exterior do refrigerador.



A segunda lei da termodinâmica postula que, entre dois corpos submetidos a diferentes temperaturas, o calor sempre se transfere do mais quente para o mais frio. O caminho inverso não pode ser percorrido espontaneamente. E é isto, de fato, o que se verifica nos fenômenos naturais que envolvem trocas de calor.

Para promover a operação inversa, isto é, retirar calor de um corpo frio e entregá-lo a um mais quente, é preciso realizar trabalho sobre o sistema. O problema, na verdade, não é difícil; a observação acurada de alguns fenômenos comuns na vida diária ajuda a compreendê-lo.

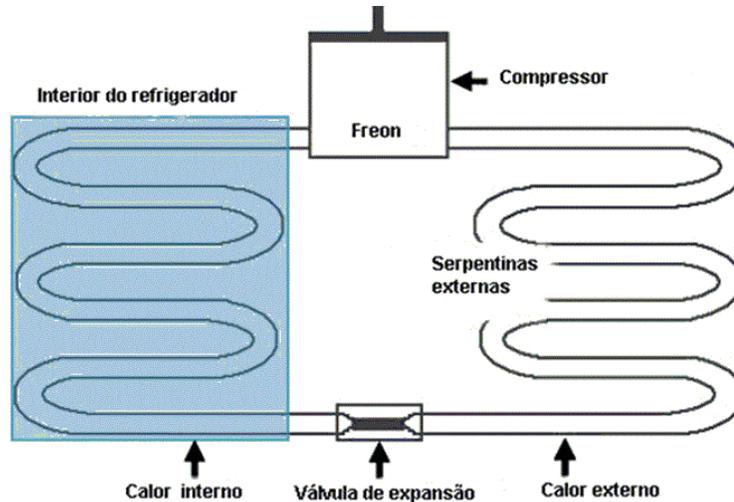


A transpiração é uma defesa natural do organismo contra as altas temperaturas que lhe podem ser danosa. O suor contém água; esta, evaporando-se sobre a pele, absorve calor do corpo, reduzindo a temperatura. O mesmo efeito pode ser observado, mais facilmente, umedecendo a pele com álcool.

Não só o álcool e a água, mas qualquer substância, passando de líquido a vapor, retira do meio ambiente o calor necessário a esta transição. E as máquinas destinadas a produzir artificialmente o frio, subtraindo calor de um corpo, ou de um ambiente fechado, são elaboradas para aproveitarem o fenômeno.

As substâncias favoráveis à produção do frio são denominadas fluidos frigoríferos (refrigerante). O amoníaco, um refrigerante altamente adequado, é tóxico. Por isso, foram desenvolvidos outros produtos menos tóxicos como os clorofluorcarbonetos (CFCs) por volta da década de 1930. A

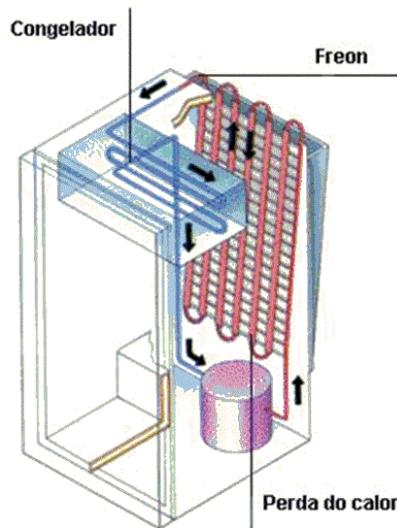
partir da década de 1990, os CFCs foram trocados pelos hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) e pelos hidrofluorcarbonetos (HFCs), que são menos prejudiciais à camada de ozônio da Terra.



Um refrigerador compõe-se basicamente de um compartimento fechado, que se quer resfriar, e de um tubo longo, chamado serpentina, dentro do qual circula um gás. A serpentina está ligada a um compressor. Uma parte dela se situa no interior do refrigerador; a outra parte fica em contato com o ambiente externo.

O compressor apresenta um pistão que se move dentro de um cilindro. Ali, o gás é comprimido até liquefazer-se na serpentina externa. À medida que passa ao estado líquido, o vapor desprende calor. Assim, a serpentina externa se aquece e cede esse calor ao ambiente.

Quando a válvula de expansão se abre, o líquido penetra na serpentina interna da geladeira. Por não ser ali comprimido, o líquido passa novamente ao estado de gás, e absorve calor do ambiente interno. A seguir, esse gás é novamente comprimido e o ciclo se repete. A substância usada no interior das serpentinas deve ser tal que, mesmo à temperatura ambiente, requeira pressões relativamente baixas para passar do estado gasoso ao estado líquido. O CFC, por exemplo, se liquefaz a 20°C quando comprimido a 5,6 atm. Os refrigeradores atuais armazenam os alimentos a uma temperatura que vai desde 3°C até 5°C .

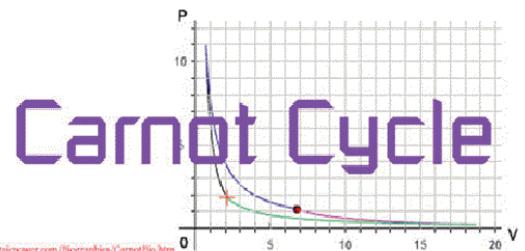
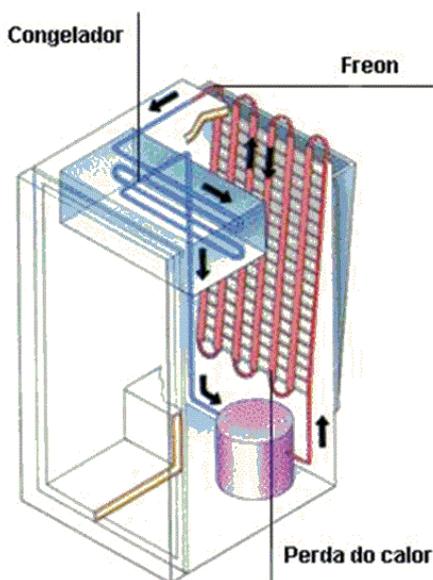


Por que o congelador fica na parte superior do refrigerador?

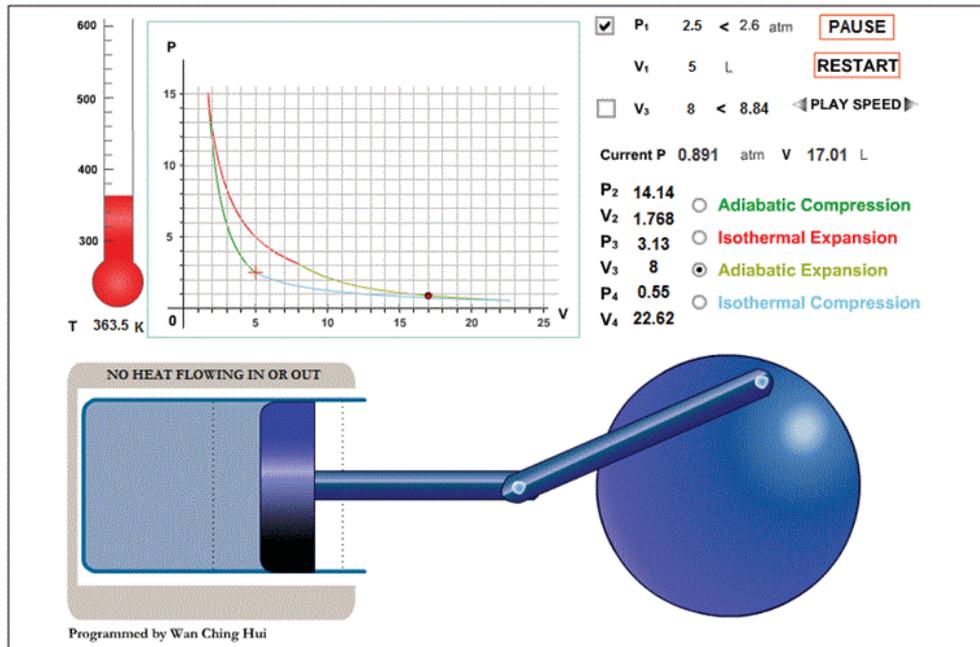
Colocando o congelador na parte superior, o ar frio, sendo mais denso, desce e troca de lugar continuamente com o ar que se aquece em contato com os alimentos. Forma-se, assim, uma corrente de convecção. A fim de permitir a convecção, as prateleiras do refrigerador são vazadas. Se o congelador ficasse embaixo, o ar mais frio ficaria concentrado embaixo e não subiria. A troca de calor seria, então, pouco eficiente.

Applets de Ensino

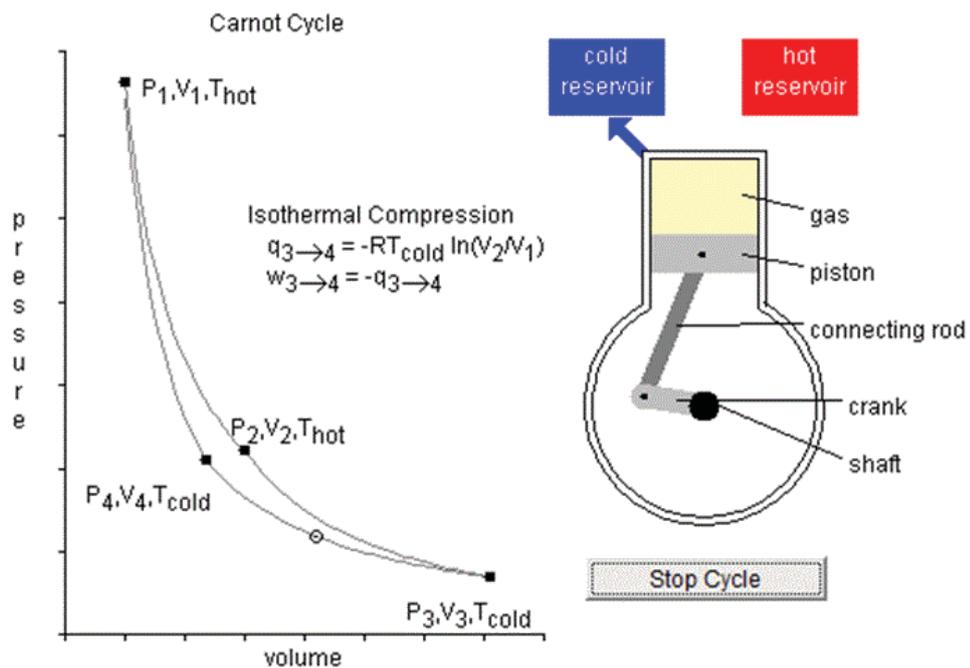
1. Página de Wan Ching Huin - http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/carnot.htm



2. Página do *site* de ensino - bpReid • Software for Science and Mathematics
<http://www.bpreid.com/carnot.php>



3. Ver página de ensino do laboratório NTNUJAVA - <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=23> (Fu-Kwun Hwang)
4. Ver página de ensino do Prof. Jones http://www.mhhe.com/physsci/physical/jones/graphics/jones2001phys_s/ch13/others/13-3/simulation.html
5. Núcleo de Construção de Objetos de Aprendizagem (UFPb) <http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/15dRefrigerador/animacao/anim.html>



VIDEO AULAS

<http://www.youtube.com/watch?v=BRsYnZicUjQ&feature=related>
http://www.youtube.com/watch?v=s3N_QJVucF8&feature=related
<http://www.youtube.com/watch?v=kJlmRT4E6R0&feature=related>

ATIVIDADES

1. Compare o ciclo *Otto* com o de *Carnot*.
2. Compare o ciclo *Diesel* com o de *Carnot*.
3. Compare o ciclo *Stirling* com o de *Carnot*.
4. Prepare uma aula interdisciplinar, de forma resumida, sobre o ciclo de *Carnot*, onde você começaria explicando o ciclo de *Carnot* qualitativamente, através de um *applet* de ensino, e depois você discutiria os problemas do aquecimento global e poluição.
5. Por que um carro precisa ser refrigerado?
6. Qual é a função do carburador?
7. Faça uma análise dos vídeos aulas acima, dando muita atenção se eles satisfazem a proposta de serem materiais complementares ou se eles podem substituir as aulas presenciais.
8. Faça uma análise dos *applets* acima, dando muita atenção se eles satisfazem a proposta de serem materiais complementares a aula presencial.



COMENTÁRIO SOBRE AS ATIVIDADES

Os alunos e futuros professores devem estar se perguntando por que não há experiências sobre o ciclo de *Carnot*. A resposta é bem simples. O ciclo de *Carnot* é um ciclo termodinâmico ideal.

Eles devem ter percebidos que existe muito material de apoio na *internet*, principalmente *applets* de ensino. Que o tema ciclo de *Carnot* pode ser muito bem explorado em sala de aula.

Estes devem, através de vídeo aulas, percebidos que mesmo alguns projetos sérios não conseguem se afastar do conceito das aulas teóricas baseadas na exposição de conceitos e na resolução de exercícios.

Os futuros professores devem perceber que o tema máquinas térmicas está intimamente ligado ao tema da conservação dos recursos naturais e a poluição. Que o aperfeiçoamento das máquinas é uma busca contínua do desenvolvimento tecnológico.

Respostas as questões

1. Tem que se fazer os gráficos.
2. Tem que se fazer os gráficos.
3. Tem que se fazer os gráficos
4. Tem que preparar e enviar.
5. Para resfriar o motor, pois o ciclo motor tem que jogar calor para o ambiente.
6. Evaporar a gasolina ou álcool para que este faça a combustão nos pistões.
7. Eles têm que assistir a vídeo aula e comentar.
8. Eles têm que ver os *applets* e comentar.

CONCLUSÃO

Mostramos através de um texto simples complementado com alguns experimentos de baixo custo e vários *applets* de ensino, que o conceito de ciclo de *Carnot* pode ser ensinado de forma lúdica e menos teórica. Também ficou claro que a ciclo de *Carnot* é um tema que envolve muitos fatos (experiências) corriqueiros e cotidianos e que podemos torná-lo um tema mais atraente e menos decorativo para os alunos.

Deve ter ficado claro para o futuro professor que existem muitos conceitos e paradigmas envolvidos nas explicações dos fenômenos termodinâmicos. Que podemos usar um ou mais destes ao explicar estes.

Estes devem ter ficado cientes que existem diversos materiais de apoio ao ensino de física, como ludotecas e vídeos aulas, que podem ser usados como reforço no aprendizado.

RESUMO

Apresentamos aqui um texto simples sobre ciclo de *Carnot* recheado de *applets* de ensino. Mostramos que existem vários vídeos aulas, alguns feitos de forma profissional, que devem ser sugeridas aos seus futuros alunos.

Trouxemos um texto sobre refrigeração para ilustrar as possíveis aplicações do tema ciclo de *Carnot* e mostrar a sua importância em nossa vida diária.



REFERÊNCIAS

e-escola. <http://www.e-escola.pt/topico.asp?id=577>

Física com ordenador.

Mundo Físico. UDESC. <http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/index.php?idSecao=8&idSubSecao=&idTexto=199>

Wolfram Demonstration Project - <http://demonstrations.wolfram.com/topic.html?topic=Physics&start=21&limit=20&sortmethod=recent>

RAMALHO, F.J; NICOLAU, J.F.; TOLEDO, P.A.. **Os Fundamentos da Física.**

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.; **Física**, Vol. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1996

Tipler, P.A.; **Física (Para Cientistas e Engenheiros), Vol.2 , Gravitação Ondas e Termodinâmica**, 3a Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

