

---

## OBJETO DE APRENDIZAGEM: MÁQUINAS TÉRMICAS<sup>+</sup>\*

---

Ricardo Andreas Sauerwein  
Inés Prieto Schmidt Sauerwein  
Departamento de Física – UFSM  
Programa de PG Educação em Ciências  
Santa Maria – RS

### Resumo

*Neste trabalho, apresentamos um objeto de aprendizagem (OA) desenvolvido como material didático de apoio para o estudo de máquinas térmicas em que destacamos os seguintes aspectos: (1) evolução temporal, (2) interação com vizinhança, (3) trocas de energia e (4) capacidade de controle. Estas ênfases são necessárias para enfrentar dificuldades identificadas em sala de aula, onde usualmente os processos termodinâmicos são apresentados na forma de diagramas de pressão versus volume (diagramas PxV). O OA simula uma máquina térmica cujo objetivo é redistribuir a energia de três outros subsistemas: dois reservatórios térmicos de temperaturas diferentes e um subsistema puramente mecânico. Através de ajustes, o usuário pode fazer com que a máquina opere na forma de qualquer tipo de ciclo, reversível ou irreversível, composto de quatro etapas determinadas pelo tipo de interação da máquina com os subsistemas vizinhos. Em particular o OA pode simular uma máquina térmica operando na forma de um ciclo de Carnot. A interface do OA contém uma animação representativa da máquina térmica operando entre os três subsistemas. Em um*

---

<sup>+</sup> Learning object: heat engines

<sup>\*</sup> Recebido: janeiro de 2012.  
Aceito: agosto de 2012.

*painel ao lado da animação é traçado o diagrama  $PxV$  de sua substância de trabalho; em outro painel, abaixo da animação, apresenta-se um gráfico com quatro curvas de variações de energia em função do tempo da substância de trabalho da máquina térmica e dos outros três subsistemas. Através desses painéis gráficos, que são atualizados em sincronia com o movimento da animação, o usuário pode, por exemplo, identificar os instantes em que ocorrem os processos irreversíveis. O OA permite ajustes que podem conduzir à eliminação paulatina das irreversibilidades, de modo que a máquina de Carnot pode ser vista como o caso limite em que toda irreversibilidade foi eliminada ou, usando as variações de energia ao final de cada ciclo, como a máquina mais eficiente. O OA encontra-se disponível em:*

*<<http://www.ufsm.br/mpeac/pub/ras/2011/termociclos.html>>*

*<<http://www.graxaim.org/pub/ras/2011/termociclos.html>> (site alternativo).*

**Palavras-chave:** *Objetos de Aprendizagem. Recursos Digitais e Virtuais sobre o Ensino de Física. Máquinas Térmicas. Processos Irreversíveis.*

### **Abstract**

*In this work we present an interactive learning object (LO) developed to facilitate the teaching/learning process of heat engines. The LO focus on the following issues: (1) time evolution, (2) neighborhood interaction, (3) energy exchange, (4) control capacity. These focus are necessary to overcome some learning difficulties identified in classroom when approaching the subject thru the pressure volume diagrams ( $PxV$  diagrams). The LO simulates a heat engine projected to redistribute energy of three other subsystems: two heat reservoir of different temperatures and a reversible work source. The LO can be adjusted by the user in such a way that the heat engine operates any cycle, reversible or irreversible, composed of four stages. Each of these stages is defined by the type of interaction between the engine and the neighbor subsystems. In particular, the LO can simulate a heat engine which operates on a reversible Carnot cycle, either direct*

of reverse. The LO interface presents an animation that represents a working heat engine in operation among the three other subsystems. In a side panel, it is shown the  $PxV$  diagram of the engine's working substance. Just below the animation, the LO has another panel where it is plotted four curves given the energy variation in function of time of the engine's working substance and the three other subsystems. Thru the plots of these two panels, that are updated in synchrony with the animation's movement, the user can, for instance, identify where irreversible processes take place. The LO provides adjusts that can be used to tune an initial irreversible cycle until it become a Carnot cycle by the systematic reduction of its irreversibility or by the searching of the most thermodynamic efficient engine. The LO can be found as the following web pages:

<<http://www.ufsm.br/mpeac/pub/ras/2011/termociclos.html>>

<<http://www.graxaim.org/pub/ras/2011/termociclos.html>>.

**Keywords:** *Learning Objects. Digital and Virtual Resources in Physics Teaching. Heat Engines. Irreversible Processes.*

## I. Introdução

O *Graxaim/Máquinas Térmicas (G/MT)* é um objeto de aprendizagem (OA) pertencente à Família Graxaim (de Objetos de Aprendizagem). Esse grupo de OA originou-se há cerca de dois anos, quando começamos a desenvolver aplicativos baseados em simulações computacionais de sistemas físicos para servirem de material de apoio à nossa prática docente. A partir da colaboração com o grupo *Métodos e Processos de Ensino Aprendizagem de Ciências (mpEAC)* desta Universidade, que vem aplicando OAs Graxaim em algumas de suas atividades de ensino, pesquisa e extensão, esses OA começaram a ser utilizados por outros professores. Em trabalhos anteriores (SAUERWEIN; SAUERWEIN, 2011a; SAUERWEIN; SAUERWEIN, 2011b), apresentamos as linhas mestras da proposta pedagógica com as quais desenvolvemos os OA. Um OA Graxaim é desenvolvido para trabalhar com um determinado conteúdo<sup>1</sup>. Neste trabalho, vamos apresentar o OA

---

<sup>1</sup> Alguns objetos de aprendizagem por nós desenvolvidos podem ser vistos nas páginas <<http://www.graxaim.org>> ou na do grupo mpEAC <<http://www.ufsm.br/mpeac/graxaim>>.

G/MT que desenvolvemos para ensinar a termodinâmica envolvida em máquinas térmicas.

A principal motivação que nos levou a desenvolver o G/MT é a posição central que as máquinas térmicas ocupam na disciplina termodinâmica. Há várias razões para justificar esse destaque, tais como os motores a explosão, que movem automóveis e caminhões, e as turbinas existentes em usinas termoelétricas ou nucleares. Esses são alguns dos exemplos da presença de máquinas térmicas em nosso cotidiano, sem as quais a sociedade atual não poderia se manter. Historicamente, o surgimento da revolução industrial é consequência da invenção da máquina a vapor. Do ponto de vista da História das Ciências, foram questões subjacentes à busca do aperfeiçoamento das máquinas a vapor que levaram à descoberta (ou síntese) das leis gerais da Termodinâmica.

Do ponto de vista didático, uma das maneiras de se introduzir o tema é partir da definição do que vem a ser uma máquina térmica. Supondo que adotemos a definição: "uma máquina térmica é um dispositivo que realiza trabalho à custa de calor", ao iniciar a aula com essa definição, estamos admitindo que os alunos aprenderam os conceitos prévios de trabalho, calor e energia. Os dois primeiros conceitos aparecem de maneira explícita na definição adotada, mas sabemos que esses conceitos dependem do conceito de energia (grosso modo, trabalho e calor são duas maneiras pelas quais a energia se transfere de um corpo a outro).

Após uma discussão envolvendo esses três conceitos e a definição acima, os alunos provavelmente aceitarão máquinas a vapor e motores a explosão como exemplos de máquinas térmicas. Porém, sem uma discussão mais abrangente, não conseguirão identificar refrigeradores e aparelhos de ar condicionado como outro tipo de máquina térmica. Para isso, é necessário entender como se dão as trocas de energia pelas quais uma máquina térmica é responsável.

Nesse sentido, não importa a complexidade de uma máquina térmica. De forma geral, ela sempre pode ser vista como um dispositivo que tem por objetivo realizar trocas de energias entre um subsistema de alta temperatura (quente), um subsistema de baixa temperatura (frio) e um subsistema mecânico. A máquina térmica propriamente dita é um quarto subsistema, também conhecido como subsistema auxiliar. Uma vez que os três primeiros subsistemas não interagem diretamente entre si, é a substância contida dentro da máquina térmica, conhecida como sua substância de trabalho que, em última instância, realiza todas as trocas de energia do sistema composto total.

Uma máquina térmica opera ciclicamente, de forma que, em cada ciclo, sua substância de trabalho é submetida a uma sequência de processos termodinâmicos. Pela primeira lei da termodinâmica, ao completar um ciclo, a substância de

trabalho volta ao seu estado inicial, logo, nesse período, seu saldo da variação de energia é nulo. Quanto às perdas e aos ganhos de energia dos três primeiros subsistemas, basta computar as transferências de energia que realizaram com a substância de trabalho da máquina térmica. Em geral, no ensino do nível médio, a substância de trabalho se trata de uma certa quantidade de gás ideal e seus processos termodinâmicos são descritos em um diagrama  $P \times V$ . Portanto, em princípio, é possível determinar todas as modificações do sistema composto total investigando apenas o gás ideal.

O risco de focalizar o ensino de máquinas térmicas em diagramas  $P \times V$  é o de os alunos se enredarem tanto na matemática do problema a ponto de não conseguirem mais imaginar o que está, de fato, sendo representado. Muitas vezes, eles se esquecem, inclusive, de que o desencadeamento dos processos termodinâmicos foram provocados por mudanças na interação do gás ideal com os demais subsistemas; é como se alunos imaginassem que o ciclo observado no diagrama  $P \times V$  se realiza por si mesmo.

Ao considerar o gás como o sistema que de fato importa, todos os demais subsistemas são substituídos pela palavra mágica "vizinhança", que passa de uma abstração útil para algo desprovido de significado real. Um comportamento que frequentemente observamos é o aluno responder que, após um ciclo de uma máquina térmica, **tudo** (isto é, o conjunto dos quatro subsistemas) volta à sua configuração inicial, e não apenas o subsistema auxiliar. Quando perguntados de onde vem ou para onde vai o calor absorvido ou cedido pela máquina térmica, é comum os alunos responderem indistintamente "para a 'vizinhança'". A mesma resposta é dada em relação ao trabalho por ela realizado. A palavra "vizinhança" parece ser usada como uma espécie de "coringa" em uma tentativa de salvar uma compreensão incompleta do assunto de suas contradições. Sucintamente, se em cada ciclo não há modificação líquida alguma, nem no sistema nem na vizinhança, para que, afinal, serve uma máquina térmica? Esse comportamento mostra que o foco no diagrama  $P \times V$  pode, no limite, obnubilar a própria razão de ser desse dispositivo.

Outro aspecto a ser destacado no ensino deste tema é a escassa discussão sobre processos irreversíveis, a qual, quando feita, raramente ocorre no contexto de máquinas térmicas. Nesse sentido, dados dois reservatórios térmicos, o aluno pensa que a única coisa a fazer é construir uma máquina térmica entre eles e operá-la na forma de um ciclo de Carnot. Parece que isso é algo imposto pela natureza tão inexorável quanto a trajetória parabólica de um projétil em lançamento oblíquo. Para melhor compreender esse fato, deve-se considerar a seguinte analogia: imagine um lago no alto de um planalto junto a uma serra. Cabe ao engenho humano perceber o que pode ser feito: um canal ligando o lago até a planície serra abaixo.

Assim, pode-se, por exemplo, aproveitar o fluxo espontâneo de água que se estabelece serra abaixo para irrigar a planície adjacente. Entretanto, nesse uso, estar-se-ia desperdiçando a energia cinética adquirida pela queda de água. Essa energia pode ser utilizada para, por exemplo, mover as turbinas de uma usina hidroelétrica. Em resumo, há diversas formas pelas quais o ser humano pode aproveitar os recursos naturais em benefício próprio e de seus semelhantes.

Posto dessa forma e voltando às máquinas térmicas, dados dois reservatórios térmicos de temperaturas diferentes podemos escolher o que pode ser feito. Na Islândia, que é uma ilha de intenso vulcanismo, há muitas fontes geotérmicas naturais. Reservatórios térmicos artificiais podem ser criados, por exemplo, queimando-se combustíveis em fornalhas. O reservatório frio poderia ser composto pelas águas de um lago. Cabe ao engenho humano decidir o que fazer. É possível usar diretamente o fluxo de calor que se estabelecerá entre a fornalha e a água, para, por exemplo, cozinhar alimentos. Porém, é possível projetar uma máquina térmica, que operando entre esses dois reservatórios térmicos é capaz de realizar trabalho em motor que eventualmente será usado para bombear água de minas de carvão.

Nesse contexto, é preciso abordar o assunto sobre máquina térmica com uma ênfase tal que não obscureça sua função tecnológica, de modo que possa ser vista como uma transferência de energia, sob qualquer forma, de um subsistema a outro. Esperamos que os alunos, ao trabalharem com OA G/MT, percebam que o ciclo de Carnot é apenas um entre uma infinidade de outros ciclos que podem ser implementados pelas máquinas térmicas. Além disso, o OA G/MT mostra como os processos irreversíveis acarretam uma diminuição da eficiência da máquina. O OA G/MT permite, inclusive, que, a partir de um ciclo irreversível, seja feito, paulatinamente, o ajuste da máquina de forma a minimizar as trocas irreversíveis de calor até que se chegue à máquina de Carnot.

## **II. O OA Graxaim/Máquinas Térmicas (G/MT)**

O OA G/MT simula possíveis máquinas térmicas, que podem ser implementadas entre três subsistemas: dois reservatórios térmicos de temperaturas diferentes e um subsistema puramente mecânico. No OA, esses três subsistemas são representados esquematicamente, de forma que o professor pode contextualizá-lo da maneira que achar mais conveniente. Por exemplo, pode estabelecer que representa simplificada uma usina termoelétrica, na qual o reservatório quente é a fornalha, o reservatório frio é a atmosfera e a turbina é o subsistema mecânico. Nesse exemplo, a máquina térmica deve transferir energia gerada pela combustão do carvão na fornalha para a turbina. Esta, por sua vez, aciona um gerador (dína-

mo), onde, então, ocorre a transformação de energia mecânica em elétrica, que é o objetivo final da usina.

O quarto subsistema é a máquina térmica, cujo funcionamento, em parte, pode ser controlado pelo usuário. Sua substância de trabalho é uma certa quantidade de gás ideal monoatômico que está encerrada na cavidade formada por um pistão que pode deslizar sem atrito dentro de um cilindro. Um conjunto formado por uma biela e manivela vincula o movimento do pistão ao do subsistema puramente mecânico. Dessa maneira, o gás, ao se expandir ou contrair, estará trocando energia na forma de trabalho com este último. A máquina térmica deve ser considerada ideal no sentido de que suas partes, exceto a substância de trabalho, não acumulam nem cedem energia sob nenhuma forma. Em particular, as paredes do cilindro responsáveis pelas trocas de calor entre o gás ideal e os reservatórios térmicos devem ser supostas perfeitamente diatérmicas e de massa desprezível.

No OA G/MT, o funcionamento dessa máquina térmica entre os três subsistemas é apresentado através de uma animação. Na Fig. 1, mostramos um instantâneo dessa animação. Nesta, a máquina térmica propriamente dita está esquematizada em preto e ilustra o acoplamento mecânico das quatro peças: cilindro, pistão, manivela e biela. A identificação de cada uma delas é inferida a partir do movimento de cada uma delas durante a animação. Assim, a manivela é a peça que executa o movimento de rotação simples em torno de uma de suas extremidades que é mantida fixa. O cilindro é a peça que permanece fixa e dentro da qual se move o pistão. A biela é a peça que articula o pistão à manivela. A cavidade de volume variável limitada pelo pistão e o cilindro é preenchida por um gás ideal, que está representado em laranja. O cilindro está posicionado entre dois quadrados, um azul (acima) e outro vermelho (abaixo) que representam, respectivamente, reservatórios de calor de baixa e alta temperaturas. Finalmente, o círculo em verde concêntrico com o ponto em torno do qual gira a manivela representa o sistema mecânico movido pela máquina térmica, ou seja, no qual a máquina térmica realiza trabalho. Esses quatro subsistemas formam o sistema completo total, logo, não há atmosfera preenchendo o espaço em branco nem há possibilidade de trocas de calor diretas (por irradiação) entre os subsistemas.

O movimento da parte mecânica da máquina térmica é governado pelo movimento de rotação da manivela que executa um movimento de rotação uniforme, o que faz com que o volume do gás ideal varie entre os valores  $V_{\min} = V_0$  e  $V_{\max} = 2 V_0$ . O gás ideal está inicialmente em seu volume de máxima compressão e sua temperatura coincide com a do reservatório quente. Durante o funcionamento da máquina térmica, o gás troca permanentemente energia na forma de trabalho com o subsistema mecânico. As trocas de calor durante a animação são

representadas pelo contato físico entre os reservatórios térmicos e as paredes do cilindro. Quando um reservatório toca o cilindro, devemos assumir contato diatérmico entre o gás ideal e o reservatório em questão. Neste momento, caso suas temperaturas sejam diferentes, haverá uma transferência irreversível de calor do corpo com maior temperatura para o corpo com menor temperatura. Essa troca de calor é instantânea e faz com que o gás assuma imediatamente a temperatura do reservatório. O particular ciclo executado pela máquina térmica é definido pelos intervalos de tempo durante os quais o gás ideal troca calor com cada reservatório térmico. Uma escolha aleatória desses intervalos de tempo fará com que o gás ideal encoste nos reservatórios térmicos em instantes nos quais suas temperaturas ainda não tenham se igualado e, conseqüentemente, a máquina térmica operará na forma de um ciclo irreversível.

O OA G/MT apresenta, ainda, dois painéis gráficos que são atualizados em sincronia com o movimento da máquina térmica. Na Fig. 1, apresentamos um instantâneo de toda a interface do OA G/MT. Nesta figura, vemos que o diagrama  $P \times V$  do gás ideal é apresentado em painel ao lado da animação. Nesse diagrama, o ponto indica o estado termodinâmico corrente do gás ideal, enquanto a linha laranja, os pontos pelos quais o sistema já passou. A pressão  $P$  e o volume  $V$  são dados em termos do estado inicial de referência em que valem, respectivamente,  $P_0$  e  $V_0$ .

Em uma definição ampla, podemos conceber uma máquina térmica como um dispositivo cujo objetivo é redistribuir energia. Para enfatizar esse aspecto, o OA G/MT exibe um gráfico, em um painel logo abaixo da animação e em sincronia com esta, com as variações da energia, por ciclo, de cada um dos quatro subsistemas (identificados por suas cores), em função do tempo  $t$ . Neste gráfico, uma variação positiva corresponde ao ganho de energia do subsistema em questão. Caso seja negativa, houve uma perda de energia. O saldo da variação de energia em cada ciclo é dado pelo valor da variação de energia à medida que  $t/T$ , onde  $T$  é o período do ciclo, aproxima-se da unidade. Note que a variação da energia ao final de cada ciclo do gás ideal (curva laranja) é nula, pois o gás ideal volta ao seu estado inicial. Pode-se observar que a simulação satisfaz o princípio da conservação da energia, uma vez que, em cada instante, a soma das variações dos quatro subsistemas é nula. A energia é dada em termos da unidade  $E_0 = P_0V_0$  e o gráfico é reiniciado a cada novo período.

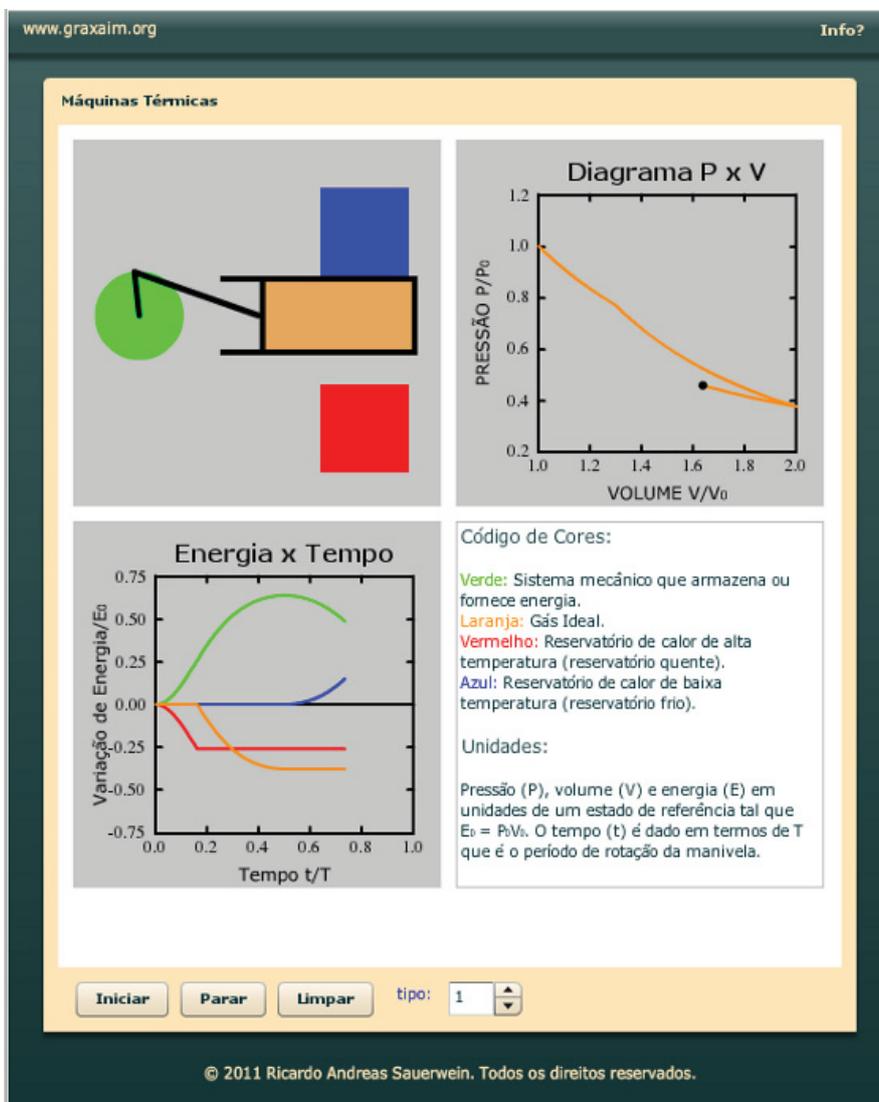


Fig. 1 – Instantâneo da interface do usuário do OA Graxaim/Máquinas Térmicas.

Os processos termodinâmicos irreversíveis simulados pelo OA G/MT são trocas irreversíveis de energia na forma de calor, as quais acontecem quando dois corpos de diferentes temperaturas entram em contato. Na simulação, esses proces-

sos podem ocorrer apenas nos momentos em que um dos reservatórios térmicos recém encosta na máquina. Nesse instante, se as temperaturas do gás ideal e do reservatório forem diferentes, haverá um fluxo de calor do subsistema de maior temperatura para o subsistema de menor temperatura. Após essa troca instantânea de energia, o gás ideal imediatamente assume a temperatura do reservatório térmico.

Como consequência no diagrama  $P \times V$ , o ponto que identifica o estado de equilíbrio do gás ideal subitamente se desloca devido à variação brusca da pressão. É importante não confundir essa variação brusca da pressão essencialmente não quase estática com um processo isocórico reversível, em que há um aumento lento da pressão a volume constante. Com a animação "congelada" não é possível perceber que o ponto que identifica o estado corrente no diagrama  $P \times V$  realiza um "salto" instantâneo; logo, haveria a possibilidade de ocorrência dessa confusão. Porém, ao observar o gráfico com as trocas de energia, é possível, mesmo em imagens instantâneas do OA, identificar as mudanças bruscas ou os "saltos" nas variações de energia que representam inequivocamente trocas irreversíveis de calor.

Os controladores do OA G/MT se localizam na base da interface onde há três botões *Iniciar*, *Parar*, *Limpar* e uma caixa de seleção em que se escolhe o *Tipo*. A finalidade dos dois primeiros botões é dada pelos seus respectivos nomes. Para começar a simulação, é necessário pressionar o primeiro botão enquanto o segundo botão a interrompe. Caso pressione novamente o botão *Iniciar*, a simulação recomeça do ponto onde parou. Caso se queira voltar à configuração inicial, é preciso pressionar o botão *Limpar*.

O OA G/MT simula vários tipos de máquinas térmicas que operam entre dois reservatórios térmicos. A única diferença entre elas, como veremos adiante, é a forma (sequência e instantes) com que a máquina interage ou não com cada reservatório. Neste OA, preferimos enumerar os tipos, que são selecionados pelo controlador apropriado, em vez de lhes atribuir nomes termodinamicamente significativos. Dessa forma, o professor tem total liberdade de uso desse recurso didático. Pode, por exemplo, estimular uma discussão em classe propondo aos alunos que caracterize algum particular tipo (funciona como motor ou refrigerador? é reversível ou irreversível?).

Ao selecionar um particular tipo, fazemos com que a máquina opere segundo determinada sequência. Há um total de oito tipos, porém, inicialmente, vamos apresentar sucintamente os quatro primeiros que não requerem nenhum ajuste adicional.

Tipo 1. A máquina térmica opera na forma de um Ciclo de Carnot,

realizando trabalho no subsistema mecânico à custa da energia absorvida do reservatório térmico quente.

Tipo 2: A máquina térmica opera na forma de um Ciclo de Carnot reverso. A máquina funciona como um refrigerador cujo objetivo é retirar energia do reservatório frio à custa do trabalho realizado pelo subsistema mecânico.

Tipo 3: O nome termodinamicamente significativo seria *sem isotermas*. A máquina térmica não interage com os reservatórios térmicos. Logo, o "ciclo" é formado por duas adiabáticas coincidentes. O gás se expande e se contrai pelo mesmo "caminho" no diagrama P x V.

Tipo 4: O nome termodinamicamente significativo seria *sem adiabáticas*. A máquina opera irreversivelmente. O gás se expande em contato com o reservatório térmico e se comprime em contato com o reservatório frio. Nos instantes em que o pistão muda o sentido de movimento, troca-se o contato de um reservatório térmico por outro. Conseqüentemente, o gás que está com a temperatura de um reservatório deve imediatamente assumir a temperatura do outro, o que só pode ser feito com uma troca irreversível de calor.

Acreditamos que o OA G/MT é um recurso didático valioso, mesmo que utilizado só no ciclo Tipo 1. A animação em sincronia com o traçado do diagrama P x V do gás ideal não exige que o aluno abstraia o tempo em que ocorrem os processos termodinâmicos. Isso faz com que os alunos percebam que as mudanças dos processos termodinâmicos, do isotérmico ao adiabático, ou vice-versa, exibidas no diagrama P x V são impostas por mudanças na forma como o gás interage ou não com os reservatórios térmicos. Dessa forma, fica claro que quem determina os instantes e as durações dos contatos da máquina com os reservatórios térmicos controla a forma como a energia será redistribuída. Isso fica particularmente claro quando se observam os gráficos com as variações de energia. Ao final do ciclo, quando  $t/T = 1$ , o sistema mecânico apresenta um aumento de energia ( $\Delta E_M > 0$ ), enquanto o reservatório térmico apresenta uma diminuição ( $\Delta E_h < 0$ ). O reservatório frio também teve um aumento de energia ( $\Delta E_c > 0$ ) e o gás ideal, como era de se esperar, teve variação de energia nula. Logo, ao final do ciclo, apenas o gás ideal volta ao seu estado inicial, e a máquina cumpriu seu propósito de realizar trabalho à custa da energia absorvida na forma de calor. A eficiência da máquina térmica pode ser estimada numericamente pela leitura do gráfico  $\varepsilon = |\Delta E_M|/|\Delta E_h|$ , de modo que se pode estimar inclusive a razão entre as temperaturas entre os dois reservatórios térmicos, pois sabemos que, em uma máquina térmica operando na

forma de um ciclo de Carnot,  $\varepsilon = 1 - T_c/T_h$ , onde  $T_c$  e  $T_h$  são, respectivamente, as temperaturas dos reservatórios frio e quente.

O ciclo do Tipo 2 também aborda um caso importante do conteúdo programático dado pelas máquinas térmicas funcionando em "ciclo reverso", ou seja, como um refrigerador ou bomba de calor. Como o diagrama  $P \times V$  desse ciclo é percorrido no sentido anti-horário, fica-se com a impressão de que se trata de um caso conceitualmente fácil, parecendo que basta passar o filme de trás para frente. Para enfatizar que esse não é necessariamente o caso, no OA G/MT, a manivela da máquina térmica sempre gira no sentido horário. É a sequência com que se induz os processos termodinâmicos pela manipulação dos reservatórios térmicos que define o funcionamento da máquina. Assim, a máquina, ao invés de começar pela expansão isotérmica, começa pela expansão adiabática. Ao final do ciclo, quando  $t/T = 1$ , observa-se que foi retirada energia na forma de calor do reservatório frio ( $\Delta E_c < 0$ ) à custa de energia fornecida pelo subsistema mecânico ( $\Delta E_m < 0$ ). No processo, o reservatório quente recebeu energia na forma de calor ( $\Delta E_h > 0$ ).

Uma máquina operando segundo um ciclo do Tipo 3 seria, na verdade, uma "não-máquina", pois, ao final de cada ciclo, não ocorre transferência de energia entre os subsistemas em que opera. Mostrar esse ciclo é importante para alunos que confundem reversibilidade com periodicidade. Somente nesse tipo de estado de cada subsistema, dado por sua quantidade de energia, varia periodicamente.

Máquinas térmicas reais sempre apresentam processos termodinâmicos irreversíveis. Historicamente, a busca de máquinas mais eficientes se deu no sentido de minimizar as irreversibilidades. Estas, no entanto, só podem ser de fato eliminadas em idealizações teóricas. Para trazer esse tipo de discussão para sala de aula, o OA G/MT também simula ciclos irreversíveis. O primeiro deles pode ser acompanhado selecionando-se o Tipo 4. A comparação dos gráficos de variações de energia da máquina do tipo 4 com o ciclo de Carnot (Tipo 1) mostra que a primeira máquina térmica realiza mais trabalho que a máquina de Carnot. O mesmo fato pode ser visto estimando-se a área interna às curvas apresentadas nos diagramas  $P \times V$ . Porém, em um mundo em que as fontes de energia térmicas são caras, a comparação relevante se dá entre as eficiências das duas máquinas. Através dos valores exibidos nos gráficos de variações de energia, OA G/MT permite verificar que a máquina de Carnot é, de fato, a mais eficiente.

Através do contraste entre esses quatro tipos de ciclo, OA G/MT pode ser usado para estimular uma discussão em sala de aula que poderá facilitar o processo de ensino/aprendizagem deste tema. Em particular, o OA G/MT enfatiza que as máquinas térmicas não se restringem ao equipamento físico que as compõem, afinal, em todos os tipos, a parte mecânica da máquina em si executa exatamente o

mesmo movimento. A tarefa realizada pela máquina é determinada pela sequência de interações que ela executa. No OA G/MT, a parte que move os reservatórios térmicos é um agente invisível. Em uma máquina térmica real, o equipamento que realiza a tarefa de sincronização das interações da substância de trabalho com os reservatórios térmicos também faz parte dela.

Ao selecionar os tipos de ciclo de 5 a 8 se abrem dois novos controladores, onde se podem ajustar os valores de dois volumes  $V_1$  e  $V_2$  que são fixados em unidades de  $V_0$ , e, portanto, podem assumir valores de 1 a 2. O volume  $V_1$  estabelece o ponto durante a fase de expansão do gás em que haverá uma mudança no tipo de interação do gás. O ajuste do volume  $V_2$  tem o mesmo efeito, porém é o ponto da fase de compressão. Desta forma, o gás ideal sofre mudança de processo nos pontos em que seu volume vale  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $2V_0$  e  $V_2$ , e assim sucessivamente. As interações de cada trecho de  $V_0$  a  $V_1$ ,  $V_1$  a  $2V_0$ ,  $2V_0$  a  $V_2$  e  $V_2$  a  $V_0$  são definidas, respectivamente, de acordo com o tipo selecionado, a saber:

Tipo 5: Contato com RTQ, Adiabática, Contato com RTF, Adiabática.

Tipo 6: Adiabática, Contato com RTF, Adiabática, contato com RTQ.

Tipo 7: Contato com RTF, Adiabática, Contato com RTQ, Adiabática.

Tipo 8: Adiabática, Contato com RTQ, Adiabática, contato com RTF.

Os Tipos 5 e 6 são versões em geral irreversíveis, respectivamente, dos ciclos de Carnot direto e reverso. No início, os volumes  $V_1$  e  $V_2$  estão ajustados de forma que a mudança do processo isotérmico para o adiabático (ou vice-versa) ocorram quando o pistão se encontra no meio da câmara ( $V_1=V_2=1,5V_0$ ). Na falta de maiores informações, essa é uma hipótese razoável para se tentar fazer com que a máquina se aproxime de um ciclo reversível.

Uma possível atividade que o professor pode sugerir a seus alunos é tentar descobrir que valores de  $V_1$  e  $V_2$  farão com que o ciclo do Tipo 5 reproduza o Ciclo de Carnot, ou seja, elimine seus processos irreversíveis. Analogamente, pode pedir que façam o mesmo com o ciclo do Tipo 6, porém, agora, para obter a máquina térmica de Carnot operando como um refrigerador (ciclo tipo 2). A busca da solução é feita através da eliminação das trocas irreversíveis de calor. É preciso que o gás atinja a mesma temperatura do RTF (ou RTQ) no momento em que se estabelece o contato diatérmico.

As sequências definidas pelos ciclos do Tipo 7 e 8 são introduzidas de maneira que todas as possibilidades de ciclo de 4 etapas sejam cobertas pelo OA G/MT. Nesses ciclos, é impossível encontrar valores de  $V_1$  e  $V_2$  que façam com que a máquina opere reversivelmente e troque energia com algum reservatório

térmico. A única solução reversível seria uma “não-máquina” (ciclo 3), na qual a escolha de  $V_1$  e  $V_2$  impediria qualquer contato com os reservatórios térmicos.

### III. Identificação do OA G/MT com sistemas reais

Como mencionamos anteriormente, o OA G/MT é um recurso didático desenvolvido para ser inserido em um material didático mais amplo. O OA G/MT é mais uma ferramenta de que o professor dispõe para incorporar ao material que vai ser trabalhado com seus alunos. O professor tem total liberdade de definir o tipo de abordagem e as opções metodológicas dos conteúdos conceituais. Poderíamos fazer uma analogia com um material experimental, porém, em vez de equipamentos reais, o OA G/MT pode ser visto como um equipamento virtual. Portanto, uma questão pertinente é verificar se os alunos imediatamente reconhecem o OA G/MT como algo pertinente ao estudo de máquinas térmicas e suas relações com sistemas físicos reais. Para analisar essa questão, trabalhamos com uma turma de treze alunos de Instrumentação para o Ensino de Física, disciplina obrigatória do curso de Licenciatura Plena em Física. Deliberadamente, evitamos escolher uma turma de Termodinâmica para não trabalhar com uma turma já direcionada para o tema.

Inicialmente, construímos um outro OA apenas com a animação da máquina térmica (o painel superior esquerdo do OA G/MT) sem qualquer texto de identificação. Através de um *datashow*, apresentamos essa animação para a turma. Em seguida perguntamos, através de um questionário escrito, o significado dessa animação. Oito alunos identificaram o OA G/MT como uma máquina térmica, fazendo menção a pistões, motores, etc. Cinco alunos fizeram menção a palavras jargão de termodinâmica, tais como ciclos, ciclo de Carnot. Podemos afirmar que todos identificaram a animação como algo relacionado à termodinâmica.

Em seguida, discutimos com os alunos o significado da animação. Revisamos os conceitos termodinâmicos de reservatório térmico de alta e baixa temperaturas, fonte reversível de trabalho, máquinas térmicas e sua substância de trabalho. Mostramos que, na animação, cada um desses subsistemas é identificado por um código de cores. Na sequência, distribuímos para os alunos uma folha de papel com duas ilustrações em preto e branco: (1) uma usina nuclear<sup>3</sup> e (2) um refrigera-

---

<sup>3</sup> Extraída do Gabarito da IV Olimpíada de Ciências para alunos da 8ª série, 2002, Centro de Divulgação Científica e Cultural da USP. Disponível em: <<http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/02/Gabarito2.html>>. Acesso em: 28 out. 2009.

<sup>4</sup> dor. Também distribuimos giz de cera com as cores usadas na animação. Os alunos tiveram que colorir as partes dos diagramas com as respectivas cores. Após análise das respostas, consideramos que sete alunos atribuíram as cores consistentemente com seus significados. É importante destacar que não foram nem discutidos nem revisados os funcionamentos dos sistemas complexos representados.

Na Fig. 2, mostramos um caso representativo do conjunto de respostas consistentes. Note que a substância de trabalho da usina nuclear é o vapor de água corretamente identificado pelo aluno que, no entanto, não colore o tubo por onde o vapor é conduzido para mover a turbina. O reservatório quente é identificado como sendo o reator que gera um circuito de água quente responsável por aquecer o vapor da máquina térmica que circula em outro circuito. Consideramos uma identificação correta, tanto o aluno que coloriu de vermelho o reator quanto o que coloriu de vermelho esse circuito de água quente, cujo único propósito é conduzir calor. Esse mesmo critério de fronteiras não rígidas foi utilizado para verificar a consistência na identificação das outras cores.

A Fig. 3 é representativa do conjunto de respostas inconsistentes. Esse particular aluno adota um critério que colore de vermelho as partes quentes dos sistemas e de azul as partes frias. Assim, tanto no caso do esquema da usina nuclear quanto no do refrigerador, o dínamo ou motor elétrico é identificado como algo quente, possivelmente devido à experiência pessoal do aluno com esses dispositivos. Aparentemente, o uso inconsistente do código de cores está mais relacionado ao desconhecimento do funcionamento desses sistemas complexos e seus esquemas do que do OA G/MT. No entanto, isso mostra que o professor, ao planejar o uso do OA G/MT, deve cuidar para relacioná-lo de maneira explícita a sistemas físicos reais.

### III. Considerações finais

Neste trabalho, apresentamos o OA G/MT que desenvolvemos como material didático de apoio para um dos principais tópicos da Termodinâmica, que é o estudo de Máquinas Térmicas. O OA G/MT exibe uma animação de uma máquina térmica operando entre dois reservatórios térmicos de calor e uma fonte reversível de trabalho. À medida que a máquina térmica se movimenta, o OA traça, simultaneamente, em dois painéis adjacentes: (1) diagrama  $P \times V$  de sua substância de tra-

---

<sup>4</sup> Extraída da página “Refrigeradores domésticos – Geladeira”. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Refrigeracao/geladeira.htm>>. Acesso em: 28 out. 2009.

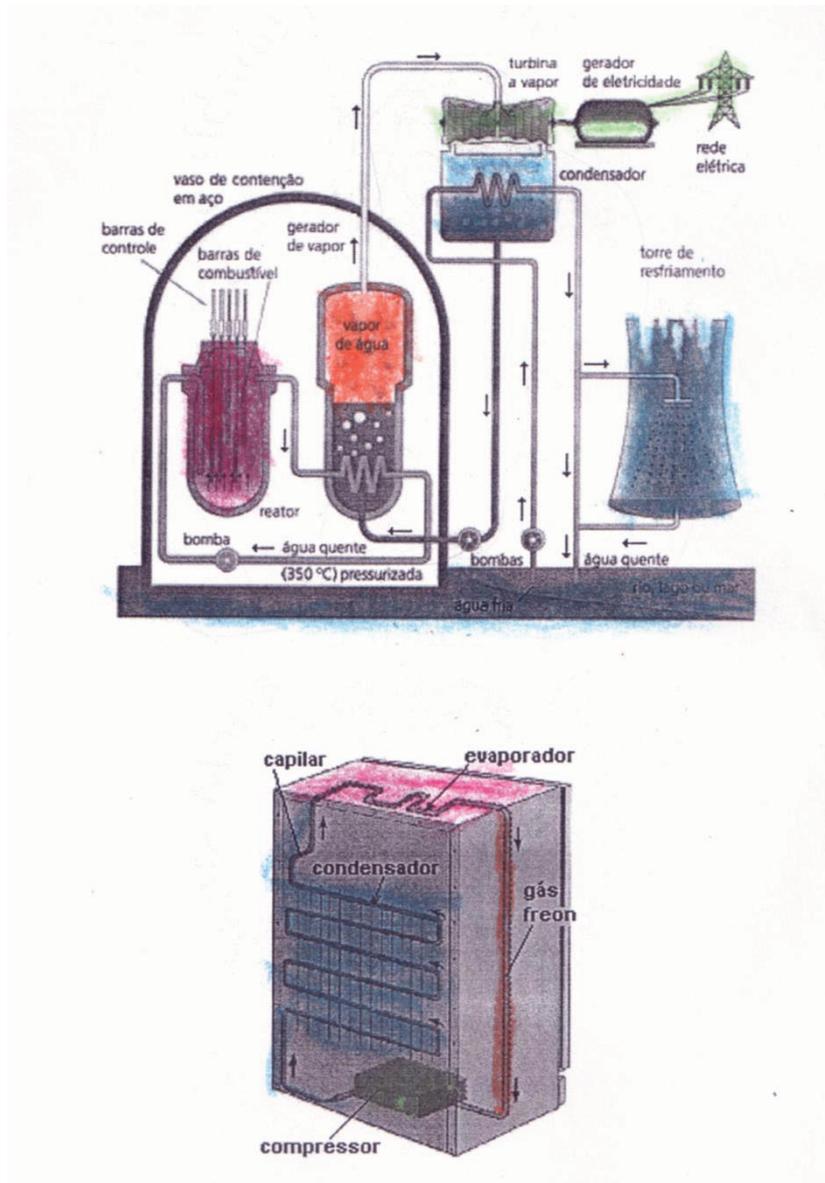


Fig. 2 – Tarefa de um aluno representativa do conjunto de respostas consistentes.

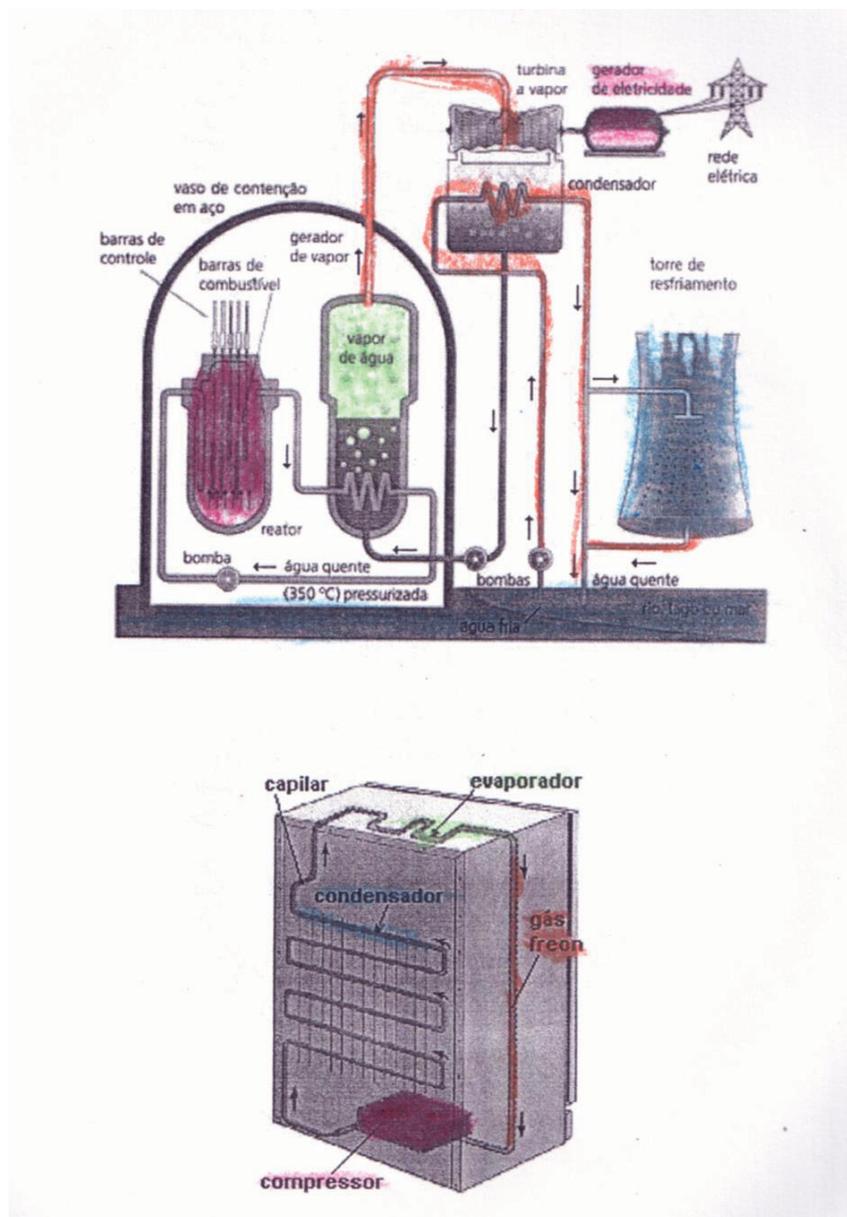


Fig. 3 – Tarefa de um aluno representativa do conjunto de respostas inconsistentes.

balho (um gás ideal monoatômico) e (2) gráficos com as variações de energia por ciclo de cada dos quatro subsistemas existentes. O usuário pode fazer com que a máquina térmica representada no OA simule quaisquer processos termodinâmicos, reversíveis ou irreversíveis, compostos de quatro etapas.

O OA G/MT foi desenvolvido para auxiliar os alunos a superarem várias dificuldades no processo de ensino-aprendizagem que identificamos em nossa prática docente: (1) abstração do tempo dos processos termodinâmicos; (2) relacionamento de processos termodinâmicos exibidos em diagramas  $P \times V$  com interações entre o fluido e subsistemas vizinhos; (3) compreensão de uma máquina como um dispositivo para uma manipulação consciente de processos de troca de energia; (4) concepção de ciclos com presença de processos irreversíveis.

A criação do OA G/MT também pretendeu estimular discussões em sala de aula ou servir para propor tarefas aos alunos. Os gráficos apresentados, apesar de sua escala de baixa precisão, permitem estimar numericamente as trocas de energia realizadas. Dessa forma, é possível, por exemplo, propor uma tarefa na qual, a partir de uma máquina irreversível, busca-se, através de ajustes sucessivos, eliminar as trocas irreversíveis de calor de forma a se chegar à máquina de Carnot. O cálculo da eficiência das máquinas irreversíveis intermediárias vai mostrar que o processo de eliminação das irreversibilidades é equivalente ao processo de busca da máquina mais eficiente, emulando, em certo sentido, o processo histórico do aprimoramento das máquinas térmicas.

O potencial didático deste OA foi investigado junto a alunos de licenciatura em física cursando a disciplina Instrumentação para o Ensino de Física. Além disso, vem sendo utilizado regularmente na disciplina Termodinâmica, ministrada a alunos do quinto ou sexto semestres, respectivamente, dos cursos de bacharelado ou licenciatura em Física da Universidade Federal de Santa Maria. Os resultados com esses grupos mostram que este OA é um material didático valioso para facilitar o processo de ensino-aprendizagem desse tópico central da termodinâmica. O OA é disponibilizado em tecnologia *Shockwave Flash* (arquivo com extensão SWF), logo, pode ser utilizado diretamente em computadores, independentemente de seu sistema operacional, desde que disponham de um dos mais populares navegadores (*Firefox*, *Chrome*, *Opera*, *Internet Explorer*, entre outros) ou, ainda, pode ser inserido em materiais didáticos de terceiros através, por exemplo, da linguagem de estruturação de documentos HTML. O OA se encontra disponível em:

<<http://www.ufsm.br/mpeac/pub/ras/2011/termociclos.html>>

<<http://www.graxaim.org/pub/ras/2011/termociclos.html>> (*site alternativo*).

## Referências

SAUERWEIN, R. A.; SAUERWEIN, I. P. S. Projeto Graxaim: uma proposta para desenvolvimento de objetos de aprendizagem. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, XIII, 2011, Foz do Iguaçu. **Programação...** Disponível em:

<[http://sbfisica.org.br/~fisica2011/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&itemid=13](http://sbfisica.org.br/~fisica2011/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&itemid=13)>. 2011a. Acesso em: 29 jan. 2012.

SAUERWEIN, R. A.; SAUERWEIN, I. P. S. Produção de material didático de física e as tecnologias de informação e comunicação. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, VIII, 2011b. **Programação...** Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/enpecatual.html>>, 2011. Acesso em: 29 jan. 2012. Atas ainda não publicadas.