

# Máquinas térmicas, bombas de calor e refrigeradores<sup>1</sup>

Física I (4302112) — IFUSP 2017

## 1 Transformando energia

Alguns livros didáticos definem energia como a *capacidade de realizar trabalho*, entendida como trabalho mecânico macroscópico. Vimos, no entanto, que a energia pode fazer mais do que isso: também pode ser usada para aquecer objetos, por exemplo. Neste texto vamos discutir um pouco mais o funcionamento de alguns equipamentos modernos, como motores a combustão e refrigeradores, que funcionam transformando energia – que retiram de algum reservatório “quente” na forma de calor – em energia mecânica macroscópica (energia *útil*) ou vice-versa. Carros, navios e aviões, aparelhos de ar condicionado, usinas termoelétricas ou nucleares são apenas alguns exemplos. A engenharia das chamadas máquinas térmicas nos remete a duas questões importantes sobre a energia: em que medida podemos usar trabalho mecânico para aquecimento e calor para fazer o trabalho mecânico? E, mais especificamente, em que medida podemos converter a energia, nas formas em que esta existe na natureza, em formas úteis para a tecnologia e para a sociedade?

Os oceanos, por exemplo, contêm uma quantidade muito grande de energia armazenada no movimento microscópico aleatório das moléculas de água. Se pudéssemos converter apenas uma pequena fração dessa energia em formas mais úteis, poderíamos satisfazer as necessidades energéticas do mundo por milhares de anos. Por que um navio não pode simplesmente retirar, na forma de calor, parte da energia térmica do oceano e usá-la para propulsão? Esse esquema não viola o princípio de conservação da energia: a energia retirada na forma de calor simplesmente seria convertida em uma quantidade igual de trabalho mecânico útil. No entanto, vimos que o fato de que a entropia do Universo nunca pode diminuir impõe restrições às conversões possíveis de energia.

Vimos também que a energia é uma das grandezas que está associada ao *estado* de um objeto e que, portanto, pelo princípio da conservação da energia, qualquer alteração no estado de um objeto deve ser acompanhada de uma alteração (ou um conjunto de alterações) no estado do seu entorno. Sempre que ocorre um par de alterações de estado, de diferentes tipos, mas complementares, energia é convertida de uma forma em outra. Por exemplo, a queima do gás propano envolve duas mudanças de estado: uma mudança na energia das ligações químicas dos reagentes (às vezes chamada energia química) e uma mudança na temperatura dos gases (associada ao que às vezes se chama de energia térmica). A combustão é um processo irreversível: seria bastante surpreendente se os gases aquecidos de uma combustão de repente sofressem um processo inverso, esfriando e reconstituindo o propano original e oxigênio. Uma vez que o processo é irreversível, podemos concluir que a entropia do gás aumenta durante o processo de combustão.

Uma bola acelerando em queda livre é um outro exemplo de mudanças de estado complementares: a mudança no estado de movimento da bola (que pode ser associado a sua energia cinética de translação) e a mudança na configuração do sistema Terra-bola (associada à energia potencial gravitacional). Se a interação da bola com a atmosfera da Terra for desprezível, esse processo pode ser considerado reversível: um filme no qual se registrasse a bola caindo poderia ser passado “de trás para a frente” sem problemas, mostrando a bola desacelerando à medida que sobe, como se tivesse sido atirada para cima (algo perfeitamente realizável). Podemos então concluir que a entropia do sistema Terra-bola não se alterou nesse processo.

## 2 Qualidade da energia

Para entender exemplos como o que acabamos de formular, devemos definir um sistema e analisar cuidadosamente todas as trocas de energia entre esse sistema e seu entorno. Até agora vimos que a energia pode entrar

---

<sup>1</sup>Texto elaborado pela equipe de Física 2, apoiado, entre outros textos, em partes do capítulo 21 do livro *Principles and Practice of Physics*, Eric Mazur; completa o suplemento 1 do livro M&I sobre máquinas térmicas e calor.

ou sair de um sistema de duas formas: mecanicamente (quando há realização de trabalho macroscópico) e na forma de calor (a partir de uma diferença de temperatura, com a realização de trabalho microscópico). A figura abaixo mostra um diagrama com essas duas formas de trocar energia, sendo que uma seta para dentro do sistema representa uma entrada de energia no sistema e uma seta para fora representa uma saída de energia do sistema.

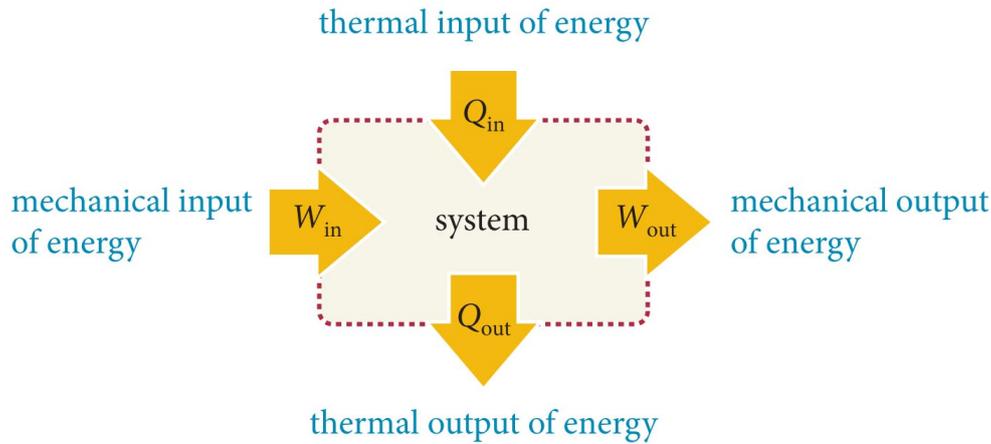
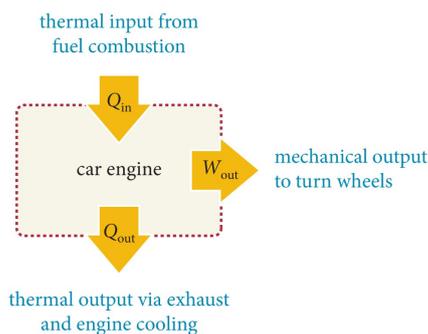


Figura 1: Exemplo de um diagrama de entrada-saída de energia

Em diagramas de entrada-saída de energia, como esse, o trabalho útil realizado é a diferença entre a entrada e a saída de energia mecânica:  $W_{\text{útil}} = W_{\text{entra}} - W_{\text{sai}}$ ; se o resultado for positivo, trabalho foi realizado sobre o sistema (sua energia aumentou por conta desse processo); se for negativo, o sistema realizou trabalho sobre o seu entorno (a energia do sistema diminuiu por conta desse processo). De forma análoga, a energia transferida por diferença de temperatura para o sistema (calor) é a diferença entre o calor que entra e o calor que sai;  $Q = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}}$ ; se  $Q > 0$  a energia do sistema aumentou, se  $Q < 0$  a energia do sistema diminuiu (considerando apenas esse processo).

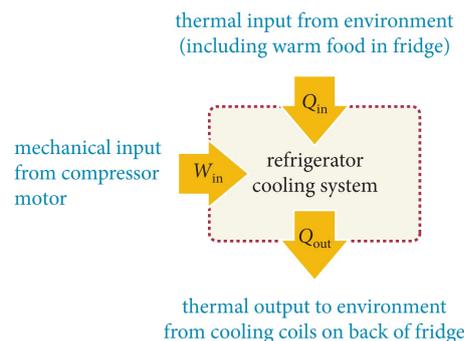
Um diagrama como o mostrado na figura 1 pode representar esquematicamente o funcionamento de qualquer máquina ou processo industrial. A figura 2 mostra as entradas e saídas de energia de dois equipamentos comuns: um motor a gasolina e um refrigerador.

(a) Energy input-output diagram for car engine



(a) Motor a gasolina

(b) Energy input-output diagram for refrigerator



(b) Refrigerador

Figura 2: Diagramas de entrada-saída de energia para um motor e uma geladeira.

O motor tem duas saídas de energia: a energia mecânica que sai para girar as rodas do carro e o calor liberado para o meio ambiente [figura 2(a)]. Já no refrigerador há duas entradas de energia: entra calor no sistema a partir dos alimentos que são colocados dentro dela (e que fazem parte do entorno) e entra energia mecânica através do trabalho realizado pelo motor do refrigerador (compressor). O refrigerador também entrega energia para o meio ambiente, na forma de calor (você provavelmente já reparou que a parte de trás de um refrigerador fica quente, esquentando o ambiente).

Cada entrada ou saída de energia, nas figuras 2(a) e (b), é acompanhada por mudanças na entropia do sistema

e do entorno. Vimos que a primeira lei da termodinâmica, que nada mais é do que o princípio da conservação da energia, não impõe nenhuma restrição às possíveis conversões de energia. A conversão completa de energia térmica em energia mecânica não viola o princípio da conservação da energia. Imagine o processo da figura 3 abaixo: gás preso em um recipiente formado por um cilindro com um pistão móvel é mantido a uma temperatura constante e se expande lentamente à medida que a carga no pistão diminui.

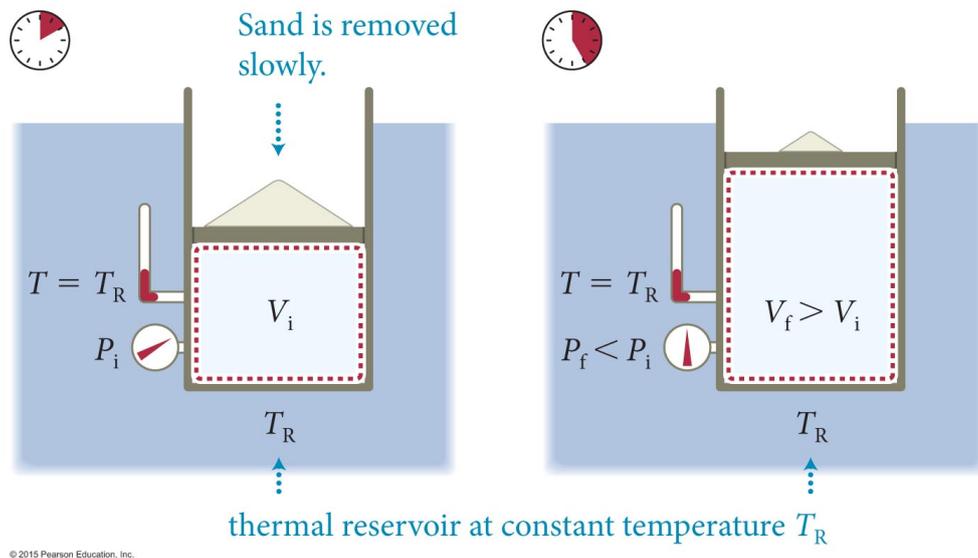


Figura 3: Gás é mantido a uma temperatura constante enquanto se expande lentamente.

Note que, nesse caso, houve conversão completa da energia que entrou no sistema, sob a forma de calor, em trabalho mecânico (movimento do pistão). Acontece que esse processo não é muito prático, pois, para manter a temperatura do gás constante, a expansão teria que ocorrer de forma *muito* lenta; além disso, seria difícil manter tal processo por muito tempo, pois o gás teria que continuar a se expandir indefinidamente, ocupando um volume cada vez maior; em geral, ao projetar um equipamento capaz de converter energia, retirando energia na forma de calor e realizando trabalho mecânico, queremos que ele opere por um longo tempo (em princípio indefinidamente!). Para que isso ocorra, o estado do equipamento que converte energia não pode mudar, ou o equipamento deve voltar ao estado inicial após um certo tempo. Dizemos, nesse caso, que esse equipamento opera de forma estacionária. Quando esse equipamento evolui, mudando de um estado a outro, através de uma série de processos, e *volta ao seu estado inicial*, dizemos que realizou um ciclo. Durante o funcionamento desse equipamento, o ciclo é continuamente repetido.

E é na série de processos que formam um ciclo – no qual o sistema volta ao seu estado inicial e portanto tanto a sua variação de energia como de entropia são nulas – que não é possível converter todo o calor recebido em energia mecânica, pois, como já vimos, a entropia do Universo não pode diminuir. Isso é ilustrado na figura 4.

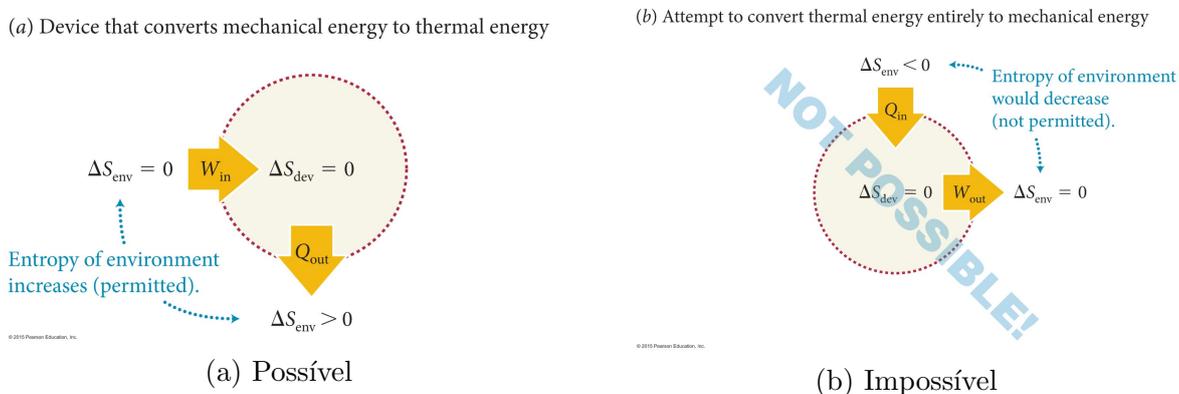


Figura 4: Diagramas de entrada-saída de energia para dois equipamentos em funcionamento cíclico.

A única forma de conseguir manter o funcionamento cíclico de um sistema que transforma energia recebida na forma de calor do ambiente em energia mecânica (e causando com isso uma diminuição na entropia do entorno) é

*devolver* parte da energia recebida ao ambiente de forma a manter a variação *total* de entropia do entorno maior ou igual a zero. A figura abaixo mostra uma das formas através da qual podemos fazer isso. Um equipamento em operação estacionária (cíclica) retira energia de um reservatório quente (na forma de calor), converte parte dessa energia em energia mecânica, e transfere o restante da energia (também na forma de calor) a um reservatório mais frio.

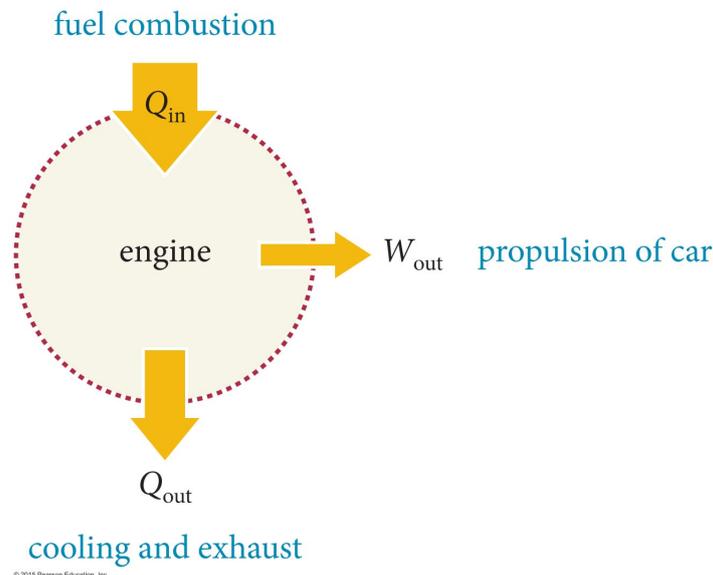


Figura 5: Diagrama de entrada-saída de energia para um motor de automóvel, que é um dos possíveis tipos de máquina térmica.

### 3 Máquinas térmicas

Vamos, a seguir, apresentar idealizações quase estáticas de alguns ciclos termodinâmicos empregados em motores comuns, como o que opera um avião a jato ou um motor a gasolina. Esses ciclos idealizados representam processos quase-estáticos e podem ser representados por exemplo em um diagrama  $P$ - $V$ . Tais ciclos são ciclos ideais, aproximações dos processos que ocorrem em máquinas reais como as turbinas a gás ou motores a combustão interna, descrevendo as variações de estado (pressão e temperatura) dos gases. São utilizados como base didática para a análise dos ciclos reais, que se desviam do modelo ideal, devido tanto a limitações tecnológicas como a fenômenos de irreversibilidade, como o atrito. A partir desses ciclos idealizados, e com algumas hipóteses sobre o comportamento do gás que o opera (como, por exemplo, que é um gás ideal) é possível estimar a eficiência desses motores, expressando-a em função de parâmetros característicos do ciclo (temperaturas máxima e mínima no caso do ciclo de Carnot, volumes máximos e mínimos, pressões máximas e mínimas, etc. em outros ciclos).

Já vimos um exemplo de ciclo ao estudarmos o ciclo de Carnot, representado no diagrama  $P$ - $V$  ao lado. O ciclo de Carnot tem o rendimento máximo possível, pois todas as trocas de calor se dão a temperatura constante, durante os processos isotérmicos. Vimos que podemos expressar esse rendimento em termos das temperaturas das fontes quente (baixa temperatura) e fria,  $T_A$  e  $T_B$ .

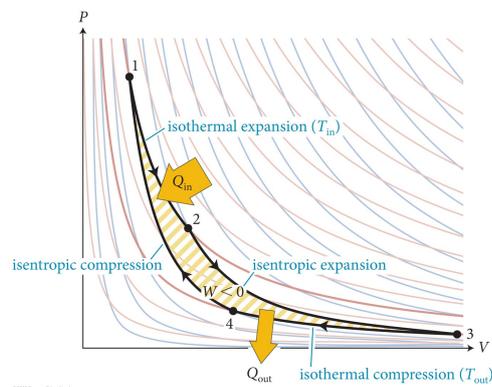


Figura 6: Ciclo de Carnot

Embora mais eficiente, o ciclo de Carnot apresenta uma série de problemas que o inviabilizam na prática.

Primeiro, como é possível ver na figura 6, a quantidade total de trabalho realizado em um ciclo (área hachurada) é pequena. Ainda mais importante, a necessidade de processos isotérmicos significa que todo o processo tem que ocorrer de forma muito lenta e o ciclo não poderia ser repetido rapidamente. Um motor operando com o ciclo de Carnot realizaria trabalho mecânico muito lentamente, ou seja, a potência seria pequena.

## 4 Ciclo de Brayton

Para diminuir esse problema temos que evitar isotermas, e “engordar” o ciclo, de modo que mais trabalho mecânico seja entregue pelo motor. Se substituirmos as duas isotermas da figura 6 por duas isobáricas, obtemos o ciclo da figura 7 abaixo, conhecido como ciclo de Brayton. Esse ciclo realiza uma quantidade bem maior de trabalho que o ciclo de Carnot e pode ser repetido de forma razoavelmente rápida. Turbinas a gás e aviões a jato operam com ciclos que podem ser razoavelmente aproximados pelo ciclo de Brayton. A substância que opera o ciclo realiza dois processos isobáricos ( $1 \rightarrow 2$  e  $3 \rightarrow 4$ ) e dois processos adiabáticos ( $2 \rightarrow 3$  e  $4 \rightarrow 1$ ). Energia entra e sai do sistema, sob a forma de calor, durante as duas isobáricas. Note que agora trabalho mecânico é realizado também durante as isobáricas e como resultado a área hachurada do ciclo é significativamente maior que a do Ciclo de Carnot, e processos isobáricos e adiabáticos podem ser realizados rapidamente, de forma que a potência desse motor pode ser bem maior.

Uma turbina a gás operando segundo esse ciclo tem três componentes principais: um compressor de gás, uma câmara de combustão e uma turbina na qual ocorre a expansão do gás. Na prática, o sistema é aberto: ar fresco entra por um lado e gases quentes são expelidos pelo outro lado da turbina. Mas para efeito de uma análise da termodinâmica do processo, podemos admitir que os gases expelidos são reaproveitados e reinjetados no sistema. A figura 8 mostra um esquema de uma turbina a gás – tipicamente o ar ambiente; o gás é sugado pelo compressor, que o comprime adiabaticamente até que esteja a uma pressão bem alta ( $4 \rightarrow 1$ ). O ar comprimido então passa para a câmara de combustão, é aquecido a temperaturas que podem chegar a 2000 K a uma pressão constante ( $1 \rightarrow 2$ ) e os gases quentes são expelidos para a atmosfera ( $2 \rightarrow 3$ ) pela parte de trás da turbina, empurrando o motor para a frente; os gases expelidos então esfriam até a temperatura inicial em um outro processo a pressão constante ( $3 \rightarrow 4$ ), completando o ciclo.

(a) PV diagram for Brayton cycle

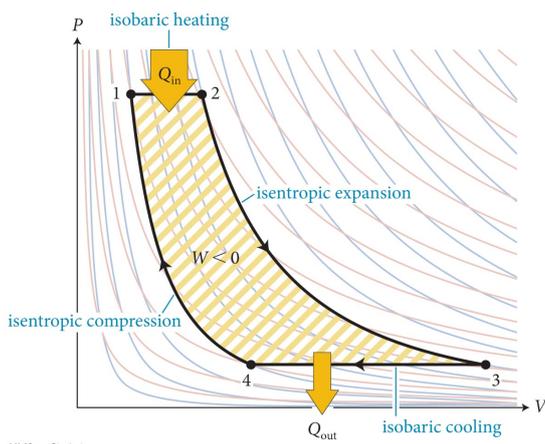


Figura 7: Ciclo de Brayton.

(b) Flow chart for gas turbine operating on Brayton cycle

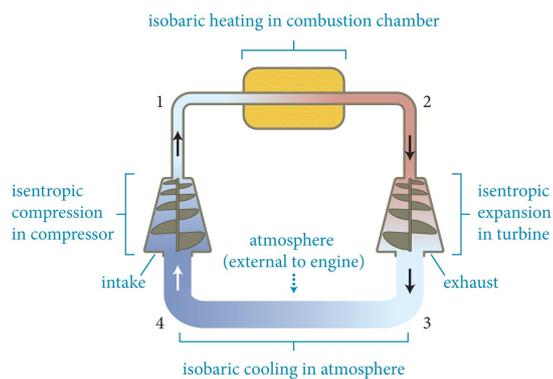


Figura 8: Esquema de uma turbina a gás operando segundo o ciclo de Brayton.

Para fazer funcionar o compressor, a turbina é colocada na câmara de expansão. Os gases, ao se expandirem, movem a turbina, que fornece alguma energia desses gases para o compressor. Em uma turbina de avião a jato, por exemplo, a turbina e o compressor são colocados em um único eixo de transmissão, de modo que a turbina alimenta o compressor (figura ao lado).

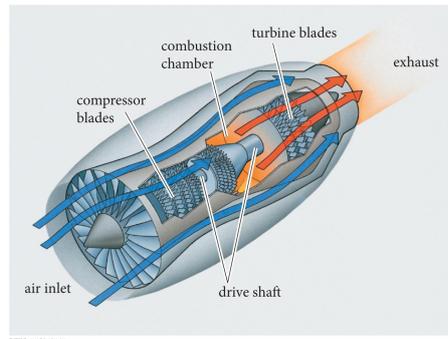


Figura 9: Motor de um avião a jato.

Esse ciclo foi proposto por George Brayton, que, em 1872 pediu uma patente para o seu "Ready Motor", motor que usava um compressor de pistão separado do expansor, injetando ar comprimido quente pelo cilindro interno do expansor. As primeiras versões do motor de Brayton eram motores a vapor que misturavam o combustível e o ar, que ficavam contidos em um reservatório e depois iam para um cilindro de expansão onde ocorria a queima; à medida que o combustível entrava no cilindro de expansão, era acendida uma chama piloto. Uma tela de proteção foi usada para impedir que o fogo voltasse para o reservatório, porém nas primeiras tentativas tal tela falhava e uma explosão ocorria. Em 1874 Brayton resolveu o problema da explosão adicionando o combustível imediatamente antes do cilindro expansor. O motor agora usava combustíveis mais pesados, como querosene e óleo combustível, sob os quais a ignição continuava pela chama piloto. Brayton produziu e vendeu os "Ready Motors" para execução de uma variedade de tarefas, como bombeamento de água, operação de moinho, geradores termoelétricos e propulsão marítima (figura 10).

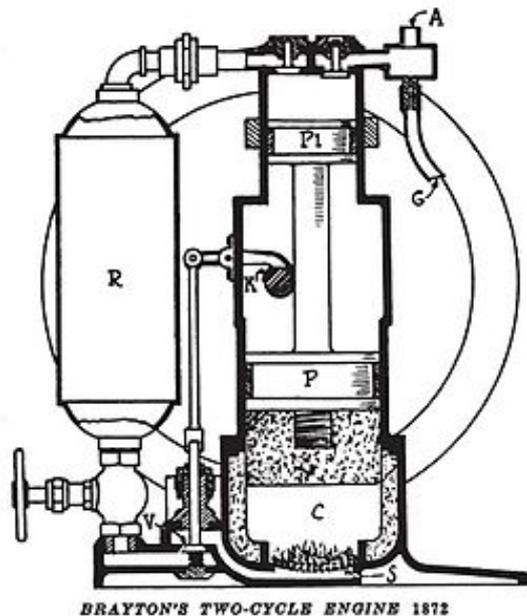


Figura 10: Esquema do motor proposto por Brayton em 1872 (Wikipedia).

Embora o ciclo de Brayton tenha uma potência maior que o ciclo de Carnot, ele não é tão eficiente, o que significa que a razão entre o trabalho realizado sobre o entorno e o calor retirado deste é menor. O motivo pode ser entendido pela figura 7: no ciclo de Brayton as trocas de calor não são isotermas (como no ciclo de Carnot). A troca de calor se inicia à temperatura  $T_1$  alcançada na compressão e aumenta até a temperatura mais alta  $T_2$  durante a combustão. A saída de calor se inicia à temperatura  $T_3$  (a temperatura final da expansão adiabática) e diminui até a temperatura mais baixa  $T_4$  (a temperatura do início da compressão adiabática). Vimos que a eficiência de um ciclo é a máxima possível quando as trocas de calor são isotérmicas. Como há trocas de calor a temperaturas intermediárias nesse caso, a eficiência global é menor do que a que teríamos se toda a troca de calor ocorresse às temperaturas máxima ( $T_2$ ) e mínima ( $T_4$ ). Ainda, ao contrário do que ocorre com o ciclo de Carnot, a sua eficiência depende das propriedades do fluido empregado no ciclo.

É possível estimar a eficiência máxima de um motor operando segundo o ciclo de Brayton, *supondo que o gás que opera o sistema é um gás ideal*. Com um pouco de álgebra é possível mostrar que

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{onde} \quad r = p_1/p_4.$$

(Vocês farão essa conta em sala de aula).

## 5 Outros ciclos

Vários outros ciclos termodinâmicos são possíveis, e muitos deles descrevem de forma idealizada o funcionamento de outros motores térmicos que encontramos a nossa volta. Por exemplo, motores funcionando segundo um ciclo conhecido como *ciclo de Otto* equipam atualmente a maioria dos automóveis de passeio, que possuem motores de combustão interna: máquinas térmicas nas quais o calor recebido no ciclo tem origem em uma reação química de combustão que ocorre *dentro* do motor. Eles utilizam os próprios gases resultantes da combustão como fluido de trabalho. Uma versão idealizada do ciclo de Otto pode ser representada em um diagrama  $P$ - $V$  por duas adiabáticas e duas isocóricas (figura 11). Um outro exemplo de motor de combustão interna é o que opera com o ciclo de Diesel (que pode ser esquematizado em um diagrama  $P$ - $V$  por duas adiabáticas, uma isobárica e uma isocórica, conforme mostra a figura 12). Nos motores de combustão externa, ao contrário, o processo de combustão ocorre *fora do motor*, esquentando um outro fluido que realiza o ciclo. Uma locomotiva a vapor ou a turbina a gás de uma usina termoeletrica operam com ciclos de combustão externa. Uma usina nuclear também é uma máquina térmica, mas não um motor a combustão, uma vez que o calor vem de uma reação nuclear de fissão, na qual energia, na forma de massa, se transforma em energia mecânica (entre outras coisas).

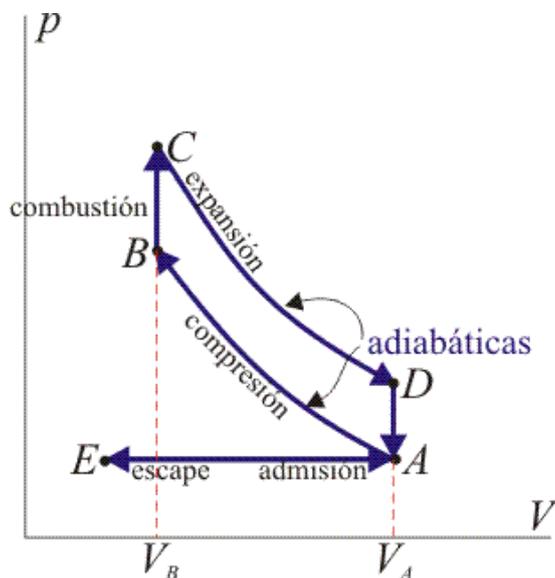


Figura 11: Ciclo de Otto, que pode ser esquematizado por duas transformações adiabáticas e duas transformações isocóricas.

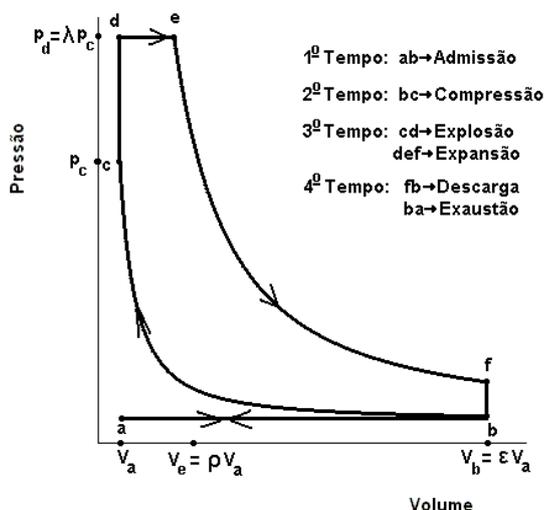


Figura 12: Idealização do ciclo de Diesel, no qual o gás passa por duas transformações adiabáticas, uma isobárica e uma isocórica.