

# Nota de aula - Máquinas Térmicas

Eveling Ribeiro

Maio 2023

## 1 Sentido de um Processo Termodinâmico

Na natureza, a grande maioria dos processos termodinâmicos que ocorrem são **processos irreversíveis**, ou seja, acontecem em um determinado sentido, porém não ocorrem no sentido contrário. O fluxo de calor que sai de um corpo quente para um corpo frio é um processo irreversível, pois o processo inverso não é possível. Imagine, como exemplo, se ao tocar em uma xícara com café bem quente suas mãos ficassem mais frias e a xícara mais quente. Certamente esse é o sentido errado para a transferência de energia. No entanto, vale ressaltar que esse processo, ainda assim, não violaria a lei da conservação da energia, visto que a energia total do sistema fechado (mãos + xícara de café) seria igual à energia total se o processo acontecesse no sentido correto. Um outro exemplo é um livro deslizando sobre uma mesa. A energia mecânica é convertida em calor devido ao atrito. Esse processo também é irreversível, pois o inverso nunca seria observado (o livro inicialmente em repouso sobre a mesa entrando em movimento e sua temperatura, bem como a da mesa, diminuindo). O sentido preferencial desses processos é determinado pela *segunda lei da termodinâmica*.

Apesar desse sentido preferencial, podemos imaginar vários processos idealizados que poderiam ser reversíveis. O **processo é reversível** se tanto o sistema quanto a sua vizinhança puderem retornar aos seus estados iniciais, através de variações infinitesimais nas condições iniciais. Um sistema que realiza esse processo está sempre próximo do equilíbrio termodinâmico com as vizinhanças e no interior do próprio sistema. Por exemplo, o fluxo de calor entre dois corpos com uma diferença de temperatura infinitesimal entre si pode ser invertido variando-se levemente uma ou outra temperatura. Esses processos não ocorrem na natureza, sendo apenas idealizações de processos reais. No entanto, fazendo o gradiente de pressão e o gradiente de temperatura muito pequenos, podemos manter o sistema muito próximo de seu estado de equilíbrio, e o processo pode se tornar aproximadamente reversível. Por essa razão, podemos chamar um processo reversível de processo de *quase-equilíbrio*.

Em contrapartida, processos irreversíveis como a expansão livre de um gás, conversão de trabalho em calor pelo atrito e fluxo de calor com diferença de temperatura finita são processos de *não-equilíbrio*, onde o sistema não está em equilíbrio termodinâmico em nenhum momento do processo, atingindo o equilíbrio térmico somente no final do processo e nenhuma mínima variação é capaz de fazer com que esses sistemas sofram um processo inverso.

### 1.1 Desordem e Processos Termodinâmicos

O estado aleatório ou o grau de desordem do estado final de um sistema pode ser relacionado ao sentido da realização de um processo natural. Imagine, por exemplo, organizar em ordem alfabética vários nomes de pessoas impressos em crachás. Ao jogar para o ar o conjunto de cartões ordenados, podemos esperar que os mesmos caiam no chão ainda em ordem alfabética? A resposta é não. A tendência natural é que eles atinjam o solo de forma aleatória.

A energia cinética macroscópica é a energia associada à organização, ao movimento coordenado de muitas moléculas, porém, a transferência de calor envolve variações de energia do estado aleatório, ou o movimento molecular desordenado. Logo, a conversão de energia mecânica em calor envolve um aumento de desordem do sistema.

## 2 Máquinas Térmicas

Qualquer dispositivo que transforma calor parcialmente em trabalho ou energia mecânica é denominado **máquina térmica**. Geralmente uma quantidade de matéria no interior da máquina absorve ou libera calor, expande-se e se comprime e algumas vezes sofre transição de fase. Essa matéria é chamada de **substância de trabalho** da máquina. Em máquinas de combustão interna a substância de trabalho é a mistura de gasolina com ar; na turbina a vapor, a substância de trabalho é a água.

O tipo mais simples de máquina que vamos estudar é aquela cuja substância de trabalho sofre um **processo cíclico**, uma sequência de processos que, ao final, reconduzem a substância ao seu estado inicial.

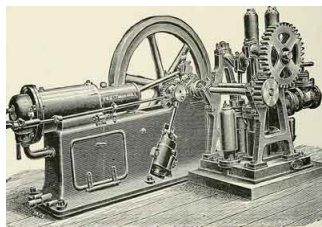


Figura 1: Máquina a vapor.

### 2.1 Reservatório quente e reservatório frio

Todas as máquinas térmicas *absorvem* calor de uma fonte a temperaturas relativamente altas, realizam algum trabalho mecânico e *rejeitam* algum calor a uma temperatura mais baixa. Do ponto de vista da máquina, o calor rejeitado é desperdiçado. Numa máquina a vapor, o calor desperdiçado é aquele que precisa ser transferido a partir do vapor usado para condensar e reciclar a água.

Quando um sistema executa um processo cíclico, sua energia interna inicial é igual à energia interna final. Em qualquer processo cíclico, a primeira lei da termodinâmica exige que

$$U_2 - U_1 = 0 = Q - W \implies Q = W, \quad (1)$$

ou seja, o calor total que flui para o interior da máquina durante o ciclo é igual ao trabalho líquido realizado pela máquina. Ao analisar máquinas térmicas, é útil pensar em dois corpos que podem interagir com a substância de trabalho *reservatório quente* e *reservatório frio*. O primeiro representa a fonte de calor e fornece à substância de trabalho grandes quantidades de calor a uma temperatura constante  $T_H$  sem alterar significativamente sua própria temperatura. O segundo pode absorver grandes quantidades do calor rejeitado pela máquina a uma temperatura constante  $T_C$ .

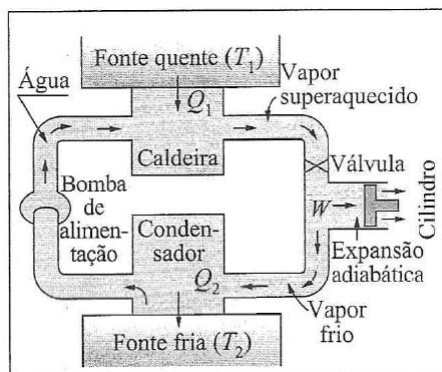


Figura 2: Esquema de Máquina a vapor.

### 2.2 Diagramas de Fluxo de Energia e da eficiência

Podemos representar as transformações de energia em uma máquina térmica usando um *diagrama de fluxo de energia* (Figura 3).

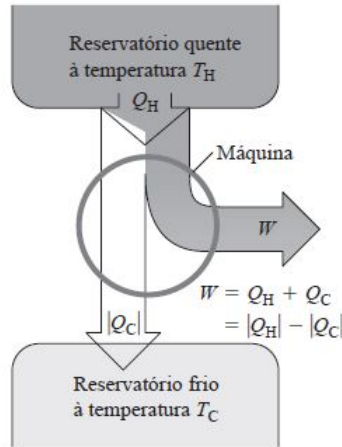


Figura 3: Diagrama esquemático do fluxo de energia de uma máquina térmica.

$Q_H$  é o calor transferido para o reservatório quente e  $Q_C$  o calor transferido para o reservatório frio. Em uma máquina térmica  $Q_H$  é positivo, porque representa um calor absorvido pela substância de trabalho e  $Q_C$  é negativo, pois representa um calor que sai da substância de trabalho. O calor *total*  $Q$  absorvido por ciclo é:

$$Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|. \quad (2)$$

A saída útil da máquina é o trabalho líquido  $W$  realizado pela substância de trabalho. Pela primeira lei,

$$W = Q = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|. \quad (3)$$

A **eficiência térmica** de uma máquina é dada pela razão

$$e = \frac{W}{Q_H}, \quad (4)$$

ou seja, representa a fração do calor  $Q_H$  que é convertida em trabalho. Esse valor é sempre menor do que um. Podemos reescrever a eficiência em termos de  $Q_H$  e  $Q_C$ , utilizando a equação (3). Assim,

$$e = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right|. \quad (5)$$

### 3 Máquina de Combustão Interna

Vamos analisar a eficiência do motor a gasolina, que é um exemplo de máquina térmica usado em automóveis e outras máquinas (Figura 4).

Inicialmente, no *tempo de admissão*, uma mistura de ar + gasolina entra no cilindro através da abertura de uma válvula de admissão, fazendo com que o pistão desça, aumentando o volume do cilindro de um valor mínimo  $V$  até um valor máximo  $rV$ , onde  $r$  é a *razão de compressão* e nos automóveis modernos essa quantidade apresenta valores na ordem de 8 a 10. Posteriormente, a válvula de admissão se fecha e a mistura é comprimida de modo aproximadamente adiabático até atingir o volume  $V$  no *tempo de compressão*. A seguir, no *tempo motor ou tempo de potência*, a mistura aquecida sofre ignição causada por uma centelha e o gás se expande de modo aproximadamente adiabático até atingir novamente o volume  $rV$ , empurrando o pistão e realizando trabalho. Por fim, a válvula de exaustão se abre, o pistão sobe empurrando os resíduos da combustão para fora, diminuindo o volume até  $V$ , no *tempo de exaustão*, deixando o cilindro livre para retornar ao tempo de admissão.

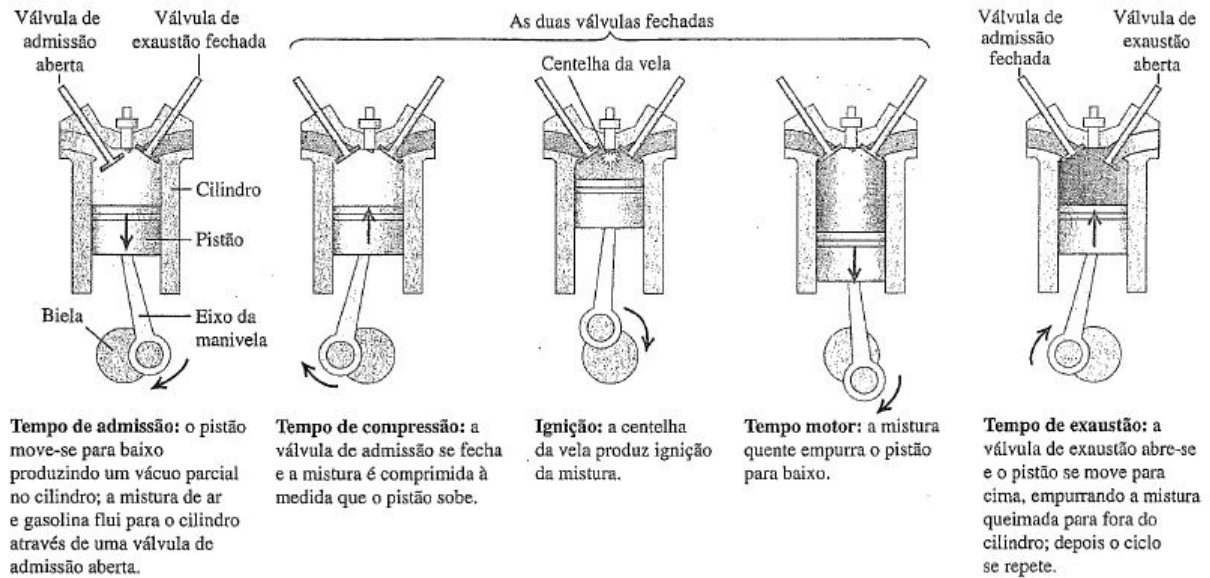


Figura 4: Ciclo de um motor de combustão interna com quatro tempos.

### 3.1 Ciclo de Otto

A Figura (5) é um diagrama  $PV$  de um modelo idealizado dos processos termodinâmicos que ocorrem em um motor a gasolina. Esse modelo é chamado **ciclo de Otto**. A mistura de ar + gasolina entra ciclo no ponto  $a$  e é comprimida adiabaticamente até o ponto  $b$ , onde sofre ignição. O calor  $Q_H$  é fornecido ao sistema através da combustão que ocorre do ponto  $b$  até  $c$ . A mistura sofre uma expansão adiabática do ponto  $c$  até o ponto  $d$ , realizando trabalho. A seguir, o gás é resfriado ao longo da linha  $da$ , onde o calor  $|Q_C|$  é rejeitado. Na prática, ele deixa a máquina como gás de exaustão, não sendo reaproveitado pelo sistema. Todavia, como há uma equivalência na quantidade de gasolina e ar que entra no sistema, podemos considerar o processo cíclico.

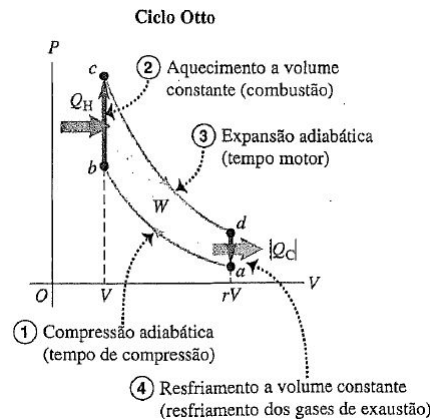


Figura 5: Diagrama  $PV$  de um ciclo de Otto, modelo do ciclo idealizado de um motor a gasolina.

Vamos calcular a eficiência desse ciclo ideal. Sabemos que a eficiência é dada pela equação (5). Como os processos  $bc$  e  $da$  ocorrem a volume constante, os calores  $Q_H$  e  $Q_C$  se relacionam com as temperaturas, ou seja,

$$Q_H = nC_V(T_c - T_b), \quad (6)$$

$$Q_C = nC_V(T_a - T_d). \quad (7)$$

Lembrando que  $Q_H > 0$  e  $Q_C < 0$ . Assim, temos

$$e = 1 - \left| \frac{T_a - T_d}{T_c - T_b} \right|. \quad (8)$$

Podemos utilizar a relação entre volume e temperatura para um processo adiabático de um gás ideal, dada pela equação

$$PV^\gamma = \text{constante}. \quad (9)$$

Logo, podemos escrever,

$$P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma. \quad (10)$$

Da relação fundamental dos gases sabemos que,

$$PV = nRT. \quad (11)$$

Assim, para o processo adiabático  $ab$ , temos

$$T_a (rV)^\gamma = T_b V^\gamma. \quad (12)$$

Analogamente para o processo adiabático  $cd$ ,

$$T_c (V)^\gamma = T_d (rV)^\gamma. \quad (13)$$

Dividindo as equações (12) e (13) pelo fator comum  $V^{\gamma-1}$ , temos

$$\frac{T_a}{T_b} = \frac{1}{r^{\gamma-1}}. \quad (14)$$

$$\frac{T_d}{T_c} = \frac{1}{r^{\gamma-1}}. \quad (15)$$

Substituindo então as relações obtidas para  $T_b$  e  $T_c$  em (16), temos

$$e = 1 - \left| \frac{T_a - T_d}{T_d r^{\gamma-1} - T_a r^{\gamma-1}} \right|. \quad (16)$$

Fatorando  $r^{\gamma-1}$  no denominador, chegamos à

$$e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}, \quad (17)$$

que representa a eficiência térmica no ciclo de Otto. Essa eficiência é sempre menor do que a unidade, mesmo em um modelo idealizado. Considerando  $r = 8$  e  $\gamma = 1,4$  (o valor para o ar), a eficiência teórica é  $e = 0,56$  ou 56%. Quanto maior o valor de  $r$ , maior a temperatura ao final da compressão adiabática da mistura ar + combustível. Quando essa temperatura é muito elevada, há o risco de ocorrer a *pré-ignição*, que é quando ocorre a explosão espontânea da mistura durante a compressão, ao invés de explodir quando a centelha da vela produz ignição.

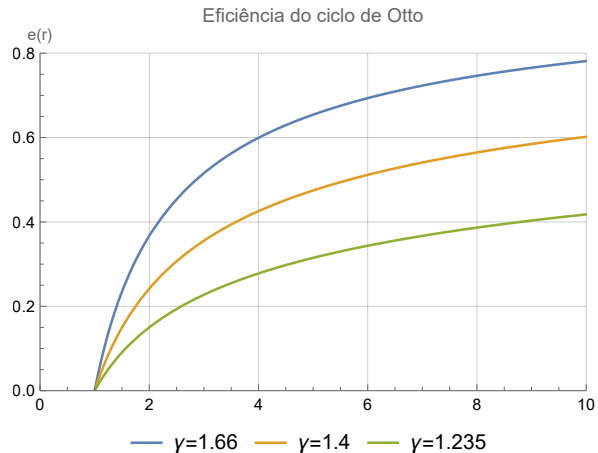


Figura 6: Eficiência do ciclo de Otto para vários valores de  $\gamma$ .

### 3.2 O ciclo Diesel

O ciclo do motor Diesel é semelhante ao do motor a gasolina. A diferença mais importante é que não existe combustível no cilindro no início do tempo de compressão. Um pouco antes do início do tempo de potência os injetores começam a injetar o combustível diretamente no cilindro, com uma velocidade suficiente para manter a pressão constante durante a primeira parte do tempo de potência. Nesse caso, não é necessário usar vela de ignição, visto que, em virtude da alta temperatura resultante da compressão adiabática, o combustível explode espontaneamente assim que injetado no cilindro.

O ciclo Diesel idealizado é representado na Figura (7). Começando pelo ponto  $a$ , o ar é comprimido adiabaticamente até o ponto  $b$ , aquecido à pressão constante até o ponto  $c$ , expandido adiabaticamente até o ponto  $d$  e resfriado a volume constante até o ponto  $a$ .

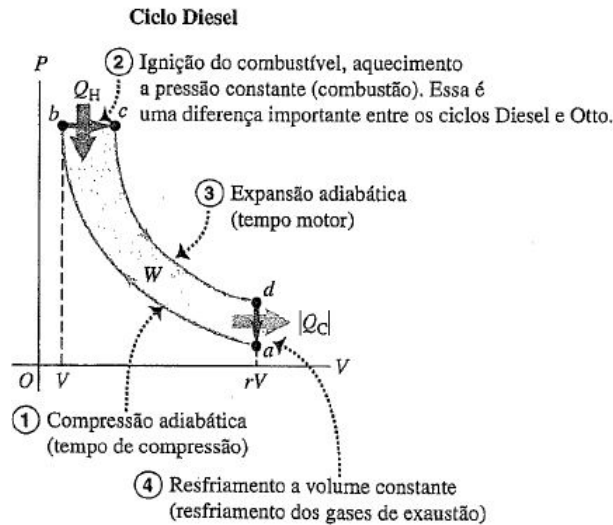


Figura 7: Diagrama  $PV$  de um ciclo Diesel ideal.

A eficiência do ciclo Diesel é obtida a partir de

$$e = 1 - \frac{1}{\gamma r^{\gamma-1}} \left( \frac{r_c^\gamma - 1}{r_c - 1} \right), \text{Exercício: Mostre isso!} \quad (18)$$

onde  $r_c$  é chamada *razão de corte*, definida como  $V_c/V_b$ , sendo  $V_c$  o volume no ponto  $c$  e  $V_b$  o volume no ponto  $b$ . A eficiência do ciclo de Otto é teoricamente maior que a do Diesel, satisfazendo a seguinte relação

$$\lim_{r_c \rightarrow 1} e_{\text{Diesel}}(r) = e_{\text{Otto}}(r). \quad (19)$$

No entanto, o ciclo do Diesel tem uma diferença crucial: não existe combustível no cilindro no processo de compressão adiabática e, portanto, não pode ocorrer a pré-ignição. Dessa forma, a razão de compressão  $r$  pode ser muito maior do que a de um motor a gasolina, o que aumenta a eficiência na prática. Valores de  $r$  em torno de 15 a 20 são normais. Com esses valores e com  $\gamma = 1,4$ , a eficiência teórica de um ciclo Diesel idealizado é cerca de 0,65 até 0,70.

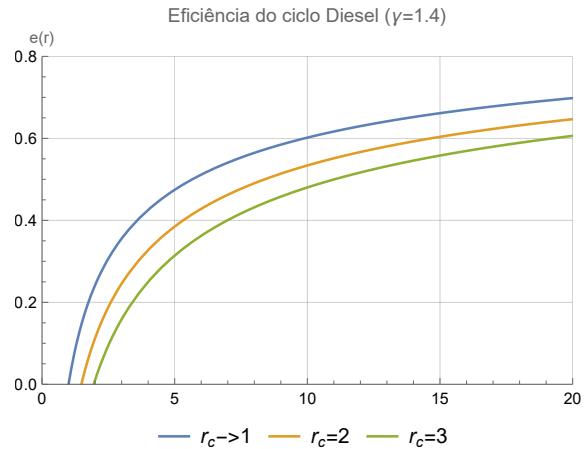


Figura 8: Eficiência do ciclo do Diesel para vários valores de  $r_c$ .

### Exercício para fixação

- Um motor a gasolina consome 16100 J de calor e realiza 3700 J de trabalho em cada ciclo. O calor é obtido pela queima de gasolina com calor de combustão igual a  $4,60 \times 10^4$  J/g.

a) Qual é a eficiência térmica?

**Solução:** Pelo enunciado, temos que o calor absorvido  $Q_H = 16100$  J e o trabalho  $W = 3700$  J. Diretamente da fórmula, temos que a eficiência será

$$e = \frac{W}{Q_H} = \frac{3700 \text{ J}}{16100 \text{ J}} = 0.23 = 23\%. \quad (20)$$

b) Qual é a quantidade de calor rejeitada em cada ciclo?

**Solução:** O calor total  $Q$  é a soma dos calores  $Q_H$  e  $Q_C$ . Em uma máquina térmica, vemos que  $W = Q$  (pela primeira lei da termodinâmica). Sendo assim,,

$$W = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C| \implies |Q_C| = |Q_H| - W = 16100 \text{ J} - 3700 \text{ J} = 12400 \text{ J}. \quad (21)$$

c) Qual é a massa de combustível queimada em cada ciclo?

**Solução:** Como a gasolina sofre transição de fase devido a combustão, temos

$$Q_H = mL_c \implies m = \frac{16100 \text{ J}}{4,60 \times 10^4 \text{ J/g}} = 0.350 \text{ g}. \quad (22)$$

d) Se o motor gira com 60,0 ciclos por segundo, qual é a potência fornecida pelo motor em quilowatts?

**Solução:** A potência é dada por  $pot = W/t$ . O motor realiza  $W = 3700$  J em cada ciclo. Logo, em em 1.00 segundo,  $W = (60)(3700 \text{ J})$ . Assim,

$$pot = \frac{(60)(3700 \text{ J})}{1.00 \text{ s}} = 222 \text{ KW}. \quad (23)$$

## Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick, and K. S. Krane. *Physics, Volume 2*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] H. M. Nussenzevig. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*, volume 2. Editora Blucher, 2018.
- [3] F. SEARS, M. ZEMANSKY, and I. Física. *Termodinâmica e Ondas. 12ª Edição*. Person, 2008.