

Máquinas térmicas

Resumo

Máquinas Térmicas

Máquinas térmicas são dispositivos usados para converter energia térmica em energia mecânica.

Imagine duas fontes térmicas, uma “quente” (A) e outra “fria” (B), ou seja, a temperatura de A é maior que a de B: $T_A > T_B$. Então, coloca-se uma máquina térmica entre elas. Um fluido operante – por vezes chamado fluido de trabalho –, geralmente vapor d’água, serve de veículo para a energia térmica que sai da fonte quente, passa pelo dispositivo intermediário, que utiliza parte dessa energia na realização do trabalho, o restante dessa energia vai para a fonte fria.

Podemos chamar a quantidade de calor que chega à máquina térmica, vinda da fonte quente, de Q_A , e a quantidade de calor que é transmitida pela máquina térmica à fonte fria B de Q_B . Assim, o trabalho realizado pela máquina térmica, por conservação de energia, pode ser escrito como:

$$\tau = Q_A - Q_B$$

2ª Lei da Termodinâmica

Antes de enunciarmos a 2ª Lei da Termodinâmica, vamos definir o conceito de rendimento. Rendimento de uma máquina térmica nada mais é do que a fração de calor recebido da fonte quente que é usada para a realização de trabalho, assim:

$$\epsilon = \frac{\tau}{|Q_A|} = |Q_A| - \frac{|Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}$$

Portanto:

$$\epsilon = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}$$

Note que, para ter rendimento de 100% ($\epsilon=1$), o valor de Q_B deveria ser zero. No entanto, isso é impossível, pois a quantidade de calor Q_A sai de A devido à existência da fonte fria.

Enunciado de Kelvin-Planck:

“É impossível construir uma máquina que, operando em transformações cíclicas, tenha como único efeito transformar completamente em trabalho a energia térmica recebida de uma fonte quente”.

Se levarmos em consideração o fato de a energia térmica fluir da fonte quente para a fonte fria, podemos enunciar a 2ª Lei da Termodinâmica da seguinte forma:

Enunciado de Clausius:

“É impossível uma máquina, sem ajuda de um agente externo, conduzir calor de um sistema para outro que esteja a uma temperatura maior”.

Disso, concluímos que o calor só pode passar de um sistema de menor temperatura para outro de maior temperatura se um agente externo realizar um trabalho sobre esse sistema – que é o que acontece em máquinas frigoríficas e condicionadores de ar.

O ciclo de Carnot

Antes mesmo de a 1ª Lei da Termodinâmica ser enunciada, Leonard Sadi Carnot criou dois postulados referentes a uma máquina térmica ideal. São eles:

1º Postulado de Carnot:

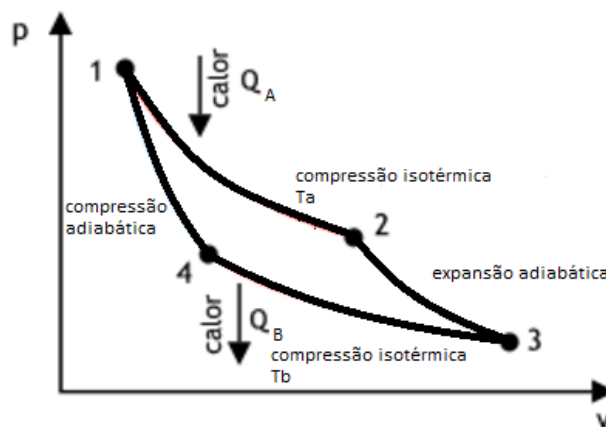
“Nenhuma máquina operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot, operando entre as mesmas temperaturas”.

2º Postulado de Carnot:

“Ao operar entre duas temperaturas, a máquina ideal de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante”.

Esses postulados garantem que o rendimento de uma máquina térmica é função das temperaturas das fontes frias e quentes.

Para o caso em que o fluido operante é um gás ideal, o ciclo de Carnot é composto por duas transformações isotérmicas e por duas transformações adiabáticas, alternadas. Desse modo, podemos desenhar o seguinte gráfico, da pressão em função do volume:



No ciclo de Carnot, podemos escrever:

$$\frac{|Q_B|}{|Q_A|} = \frac{T_B}{T_A}$$

Assim, o rendimento é dado por:

$$\epsilon = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Se o rendimento fosse de 100%, teríamos $\epsilon=1$ e $T_B=0$. Mas isso contraria a 2ª Lei, o que nos leva a concluir que nenhum sistema físico pode estar no zero absoluto, segundo a Termodinâmica clássica.

“O zero absoluto seria a temperatura da fonte fria de uma máquina ideal de Carnot que operasse com rendimento de 100%”.

Quer ver este material pelo Dex? Clique [aqui](#)

Exercícios

1. Durante cada ciclo, uma máquina térmica absorve 500 J de calor de um reservatório térmico, realiza trabalho e rejeita 420 J para um reservatório frio. Para cada ciclo, o trabalho realizado e o rendimento da máquina térmica são, respectivamente, iguais a
 - a) 80 J e 16%.
 - b) 420 J e 8%.
 - c) 420 J e 84%.
 - d) 80 J e 84%.
 - e) 80 J e 8%.

2. Uma máquina a vapor foi projetada para operar entre duas fontes térmicas, a fonte quente e a fonte fria, e para trabalhar segundo o ciclo de Carnot. Sabe-se que a temperatura da fonte quente é de 127 °C e que a máquina retira, a cada ciclo, 600 J desta fonte, alcançando um rendimento máximo igual a 0,25. O trabalho realizado pela máquina, por ciclo, e a temperatura da fonte fria são, respectivamente:
 - a) 240 J e 95 °C.
 - b) 150 J e 27 °C.
 - c) 15 J e 95 °C.
 - d) 90 J e 27 °C.
 - e) 24 J e 0 °C.

3. Uma das maneiras de se obter sal de cozinha é a sua extração a partir de sítios subterrâneos. Para a realização de muitas das tarefas de mineração, são utilizadas máquinas térmicas, que podem funcionar, por exemplo, como motores para locomotivas, bombas de água e ar e refrigeradores. A respeito das propriedades termodinâmicas das máquinas térmicas, qual das alternativas é INCORRETA?
 - a) O rendimento de uma máquina térmica funcionando como motor será máximo quando a maior parte da energia retirada da fonte quente for rejeitada, transferindo-se para a fonte fria.
 - b) Uma máquina térmica funcionando como refrigerador transfere energia de uma fonte fria para uma fonte quente mediante realização de trabalho.
 - c) Máquinas térmicas necessitam de duas fontes térmicas com temperaturas diferentes para operar.
 - d) Dentre as consequências da segunda lei da termodinâmica, está a impossibilidade de se construir uma máquina térmica com rendimento de 100%.
 - e) Todas as etapas de uma máquina térmica operando no ciclo de Carnot são reversíveis.

4. Um projeto propõe a construção de três máquinas térmicas, M_1 , M_2 e M_3 , que devem operar entre as temperaturas de 250 K e 500 K, ou seja, que tenham rendimento ideal igual a 50%. Em cada ciclo de funcionamento, o calor absorvido por todas é o mesmo: $Q = 20$ kJ, mas espera-se que cada uma delas realize o trabalho W mostrado na tabela abaixo.

Máquina	W
M_1	20 kJ
M_2	12 kJ
M_3	8 kJ

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, verifica-se que somente é possível a construção da(s) máquina(s)

- a) M_1 .
 - b) M_2 .
 - c) M_3 .
 - d) M_1 e M_2 .
 - e) M_2 e M_3 .
5. Podemos considerar como máquina térmica qualquer dispositivo que receba uma quantidade de calor Q_1 e converta parte da energia recebida dessa maneira em trabalho mecânico W . O calor não aproveitado, chamado $Q_2 = Q_1 - W$, é devolvido ao ambiente sem ser aproveitado. Em relação a essas trocas de calor, definimos como eficiência de uma máquina térmica a razão entre o trabalho mecânico W produzido e a quantidade de calor Q_1 entregue à máquina. Em particular, considere uma máquina térmica que opera entre as temperaturas 300 K e 1200 K. Sobre as informações acima descritas, assinale a alternativa INCORRETA.
- a) Todas as máquinas térmicas devem satisfazer igualmente a primeira e a segunda lei da termodinâmica.
 - b) A eficiência máxima de uma máquina térmica que opere entre as temperaturas citadas é de 75%.
 - c) Diminuindo pela metade as temperaturas citadas, o rendimento máximo de uma máquina térmica que opere entre essas temperaturas não é alterado.
 - d) Com a tecnologia moderna, é possível construir uma máquina térmica que opere entre as temperaturas citadas com rendimento superior a 75%.
 - e) Devido à segunda lei da termodinâmica, é impossível construir um dispositivo cujo único efeito seja converter calor integralmente em trabalho.

6. Na cidade de Alto do Rodrigues, está sendo construída a TermoAçu, primeira usina termelétrica do estado com capacidade para produzir até 70% da energia elétrica total consumida no Rio Grande do Norte. O princípio básico de funcionamento dessa usina é a combustão de gás natural para aquecer água que, uma vez aquecida, se transformará em vapor e, finalmente, será utilizada para mover as pás giratórias de uma turbina. A produção da energia elétrica será feita acoplando-se ao eixo da turbina algumas bobinas imersas em um campo magnético.

Considere que, em cada ciclo dessa máquina termelétrica real, se tenha:

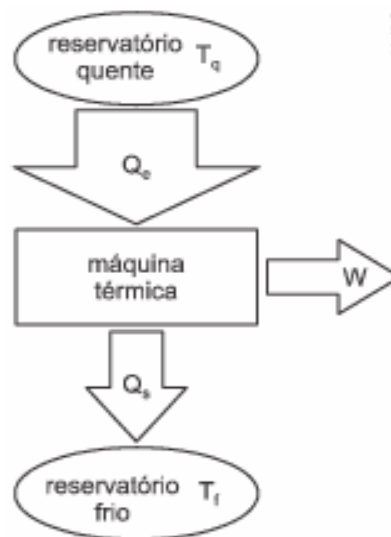
Q: o calor produzido na combustão do gás;

W: a energia mecânica nas turbinas obtida a partir da alta pressão do vapor acionando as pás giratórias;

E: a energia elétrica produzida e disponibilizada aos consumidores.

Para a situação descrita, é correto afirmar:

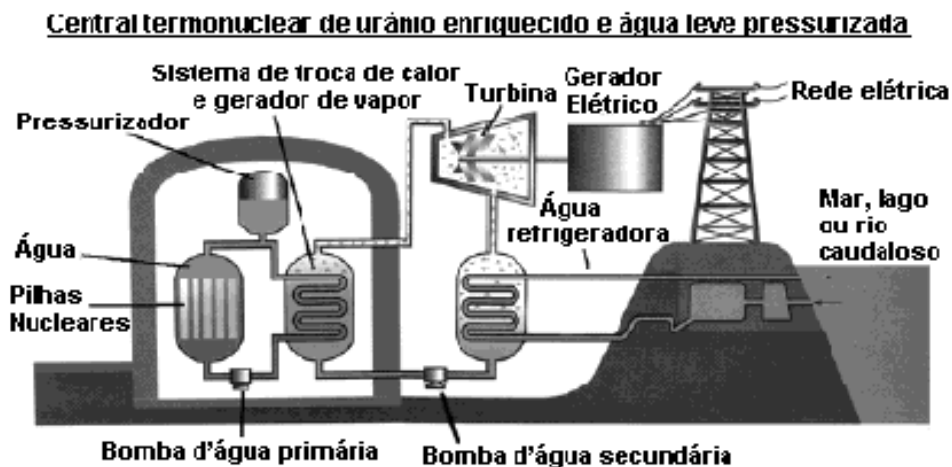
- a) $Q = W = E$
 - b) $Q > W > E$
 - c) $Q = W > E$
 - d) $Q < W < E$
 - e) $Q < W = E$
7. Uma máquina térmica, representada na figura abaixo, opera na sua máxima eficiência, extraíndo calor de um reservatório em temperatura $T_q = 527^\circ\text{C}$, e liberando calor para um reservatório em temperatura $T_f = 327^\circ\text{C}$.



Para realizar um trabalho (W) de 600 J, o calor absorvido deve ser de

- a) 2400 J.
- b) 1800 J.
- c) 1581 J.
- d) 967 J.
- e) 800 J.

8. Um refrigerador foi construído, utilizando-se uma máquina de Carnot cuja eficiência, na forma de máquina de calor, é igual a 0,1. Se esse refrigerador realiza um trabalho de 10 J, é correto afirmar que a quantidade de calor removida do reservatório de menor temperatura foi, em joules, de
- 100.
 - 99.
 - 90.
 - 10.
 - 1.
9. O reator utilizado na Usina Nuclear de Angra dos Reis - Angra II - é do tipo PWR (Pressurized Water Reactor). O sistema PWR é constituído de três circuitos: o primário, o secundário e o de água de refrigeração. No primeiro, a água é forçada a passar pelo núcleo do reator a pressões elevadas, 135 atm, e à temperatura de 320°C. Devido à alta pressão, a água não entra em ebulição e, ao sair do núcleo do reator, passa por um segundo estágio, constituído por um sistema de troca de calor, onde se produz vapor de água que vai acionar a turbina que transfere movimento ao gerador de eletricidade. Na figura estão indicados os vários circuitos do sistema PWR.



Considerando as trocas de calor que ocorrem em uma usina nuclear como Angra II, é correto afirmar:

- O calor removido do núcleo do reator é utilizado integralmente para produzir trabalho na turbina.
- O calor do sistema de refrigeração é transferido ao núcleo do reator através do trabalho realizado pela turbina.
- Todo o calor fornecido pelo núcleo do reator é transformado em trabalho na turbina e, por isso, o reator nuclear tem eficiência total.
- O calor do sistema de refrigeração é transferido na forma de calor ao núcleo do reator e na forma de trabalho à turbina.
- Uma parte do calor fornecido pelo núcleo do reator realiza trabalho na turbina, e outra parte é cedida ao sistema de refrigeração.

- 10.** Até 1824 acreditava-se que as máquinas térmicas, cujos exemplos são as máquinas a vapor e os atuais motores a combustão, poderiam ter um funcionamento ideal. Sadi Carnot demonstrou a impossibilidade de uma máquina térmica, funcionando em ciclos entre duas fontes térmica (uma quente e outra fria), obter 100% de rendimento. Tal limitação ocorre porque essas máquinas
- a) realizam trabalho mecânico.
 - b) produzem aumento da entropia.
 - c) utilizam transformações adiabáticas.
 - d) contrariam a lei da conservação de energia.
 - e) funcionam com temperatura igual à da fonte quente.

Gabarito

1. A

Da 1ª Lei da Termodinâmica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trabalho: } W = Q_{\text{quente}} - Q_{\text{fria}} = 500 - 420 \Rightarrow \boxed{W = 80 \text{ J.}} \\ \text{Rendimento: } \eta = \frac{W}{Q_{\text{quente}}} = \frac{80}{500} = 0,16 \Rightarrow \boxed{\eta = 16\%.} \end{array} \right.$$

2. B

$$n = \frac{W}{Q} \Rightarrow 0,25 = \frac{W}{600} \Rightarrow W = 0,25 \cdot 600 \Rightarrow W = 150 \text{ J}$$

$$n = 1 - \frac{T_f}{T_0} \Rightarrow 0,25 = 1 - \frac{T_f}{400} \Rightarrow T_f = 300 \text{ K}$$

$$T_c = T_k - 273 \Rightarrow T_c = 300 - 273 \Rightarrow T_c = 27 \text{ °C}$$

3. A

O rendimento de uma máquina térmica é máximo quando a menor parte da energia térmica retirada da fonte quente for rejeitada para a fonte fria.

4. C

O rendimento de uma máquina térmica é a razão entre o trabalho realizado e o calor recebido. O trabalho máximo que cada uma das máquinas pode realizar é:

$$\eta = \frac{W_{\text{máx}}}{Q} \Rightarrow W_{\text{máx}} = \eta \cdot Q = 0,5 \cdot 20 \Rightarrow W_{\text{máx}} = 10 \text{ J.}$$

Somente é possível a construção da Máquina 3.

5. D

Analisando as alternativas,

[A] CORRETA. Toda máquina deve satisfazer as duas leis da termodinâmica. A primeira que é uma aplicação do princípio da conservação de energia e a segunda que trata diretamente de máquinas térmicas e seu rendimento.

[B] CORRETA. A eficiência máxima de uma máquina térmica é quando esta opera em um ciclo de Carnot. Desta forma,

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_0} = 1 - \frac{300}{1200}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{1}{4}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = 75 \%$$

[C] CORRETA. O rendimento do ciclo de Carnot depende da razão entre as duas temperaturas de operação da máquina. Se as duas forem reduzidas pela metade, logo o rendimento será o mesmo.

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_0} = 1 - \frac{150}{600}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{1}{4}$$

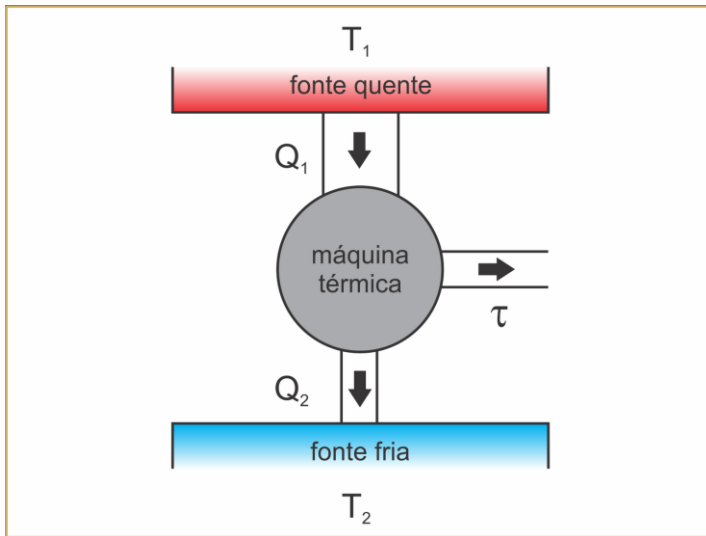
$$\eta_{\text{Carnot}} = 75 \%$$

[D] INCORRETA. O Rendimento da máquina térmica operando no ciclo de Carnot é o máximo rendimento que esta pode ter.

[E] CORRETA. A afirmação desta alternativa é a própria segunda lei da termodinâmica, que diz que "Nenhum motor térmico consegue transformar integralmente calor em trabalho".

6. B

Segue o diagrama que representa o funcionamento de uma máquina térmica:



Pelo enunciado, interpretamos que:

- $Q_1 = Q$, pois o calor produzido na combustão do gás provém da fonte quente.
- $\tau = W$, pois nessa etapa temos o trabalho útil, onde ocorre a conversão de energia química da combustão do gás em energia mecânica para girar as pás.
- $Q_2 = E$, pois é a parte que vai ser disponibilizada aos consumidores.

Pela 1ª da termodinâmica, temos que:

$$Q_2 = Q_1 - W \rightarrow E = Q - W$$

$$Q_1 = Q_2 + W \rightarrow Q = E + W$$

$$W = Q_1 - Q_2 \rightarrow W = E - Q$$

Vamos assumir alguns valores para Q , W e E , a fim de exemplificar:

$Q = 100 \text{ J}$ (fonte quente),

$W = 70 \text{ J}$ (trabalho para girar as pás), e

$E = 30 \text{ J}$ (o que sobrou para os consumidores).

$$Q_2 = Q_1 - W \rightarrow E = Q - W \rightarrow 30 = 100 - 70$$

$$Q_1 = Q_2 + W \rightarrow Q = E + W \rightarrow 100 = 30 + 70$$

$$W = Q_1 - Q_2 \rightarrow W = E - Q \rightarrow 70 = 100 - 30$$

Portanto, $Q > W > E$

7. A

Para calcular o rendimento de uma máquina térmica ideal usa-se a equação:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{fria}}}{T_{\text{quente}}},$$

com as temperaturas expressas na escala Kelvin

$$\eta = 1 - \frac{327 + 273}{527 + 273} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{600}{800} \therefore \eta = 0,25 \text{ ou } 25\%$$

Mas o rendimento se relaciona com o trabalho e a fonte quente:

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{quente}}} \Rightarrow Q_{\text{quente}} = \frac{W}{\eta} \Rightarrow Q_{\text{quente}} = \frac{600 \text{ J}}{0,25} \therefore Q_{\text{quente}} = 2400 \text{ J}$$

8. C

A eficiência de um refrigerador é dada pela relação entre a quantidade de calor retirada do congelador (Q_{frio}) que é a fonte fria e o trabalho (W) recebido do sistema motor-compressor. No caso, como o enunciado refere-se a uma máquina de calor, deve-se inverter a relação, como uma máquina térmica motora.

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{quente}}} \Rightarrow Q_{\text{quente}} = \frac{10}{0,1} \Rightarrow Q_{\text{quente}} = 100 \text{ J.}$$

Mas, na máquina motora:

$$Q_{\text{quente}} = W + Q_{\text{frio}} \Rightarrow 100 = 10 + Q_{\text{frio}} \Rightarrow Q_{\text{frio}} = 100 - 10 \Rightarrow Q_{\text{frio}} = 90 \text{ J.}$$

9. E

O calor produzido pelo núcleo tem um longo caminho até que o vapor gerado acione as turbinas. Neste caminho, há perdas expressivas de energia.

10. B

As transformações ocorridas nas máquinas térmicas a vapor são irreversíveis, produzindo aumento da entropia.