

## 2 BIMESTRE

A segunda lei da termodinâmica é essencialmente diferente da primeira lei, pois trata de uma questão sobre a qual a primeira lei nada diz, que **é a da direção tomada por um processo natural**. Nem toda mudança física que ocorre em um sistema e que é consistente com o princípio da conservação da energia satisfaz também a condição adicional imposta pela segunda lei. Em outras palavras, para que a termodinâmica possa fazer uma descrição única dos fenômenos naturais outra lei da natureza teve que ser descoberta para ser adicionada à primeira lei. Esta outra lei é a que foi cristalizada com o nome de segunda lei da termodinâmica e é sobre ela que trata esta aula.

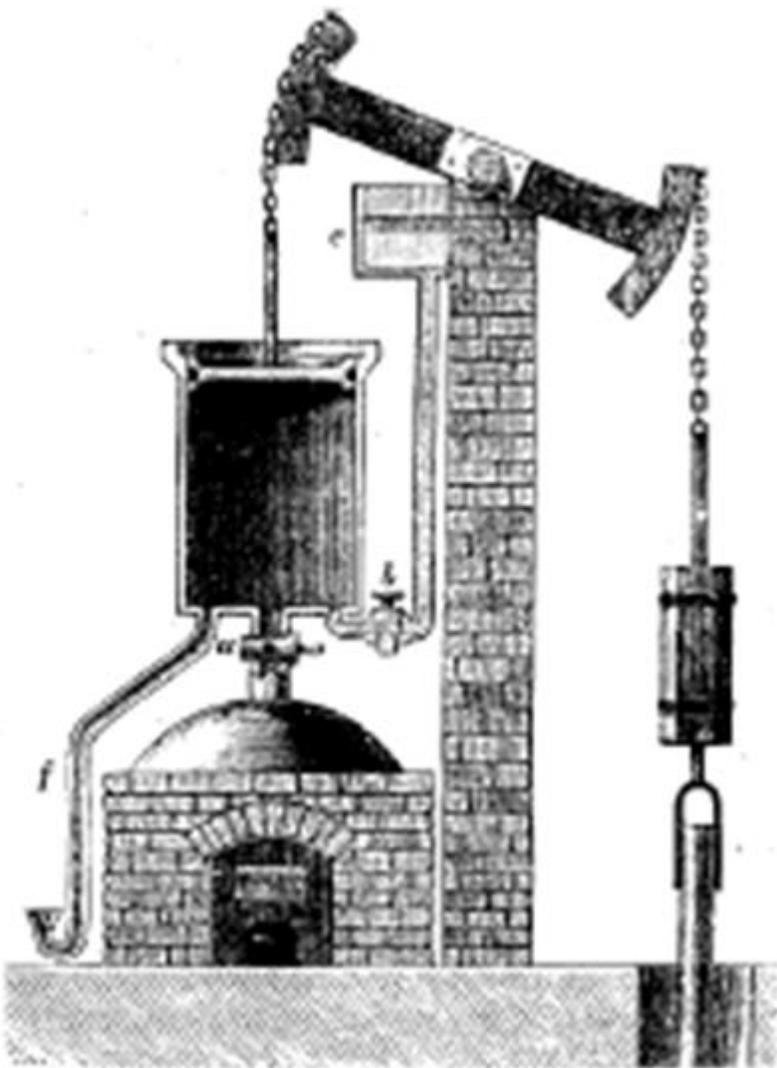


A segunda lei da termodinâmica foi formulada de diferentes maneiras por Clausius em 1850, por Kelvin em 1852 e, posteriormente, por outros cientistas. Mas as suas bases foram lançadas pelo menos 25 anos antes, em 1824, no livro do físico e engenheiro militar francês **Sadi Carnot** (1796-1832), intitulado “Reflexões sobre a força motriz do fogo e sobre as máquinas apropriadas para desenvolver essa força”.



O livro de Carnot era, em algumas passagens, muito confuso e difícil de ser lido. Por causa disso, poucas pessoas se interessaram por ele. Um dos poucos que o leram foi o também físico e engenheiro francês Benoît Clapeyron (1799-1864) que, em 1834, publicou um artigo no qual apresentou uma análise do ciclo de Carnot com o auxílio de representações gráficas<sup>1</sup> e de uma formulação matemática adequada. O artigo de Clapeyron foi importante porque foi através dele que Kelvin e Clausius tomaram conhecimento do trabalho de Carnot e puderam desenvolver a termodinâmica.

Carnot viveu em plena era da Revolução Industrial, fortemente impulsionada pela invenção da máquina a vapor. A primeira máquina a vapor foi inventada pelo serralheiro inglês Thomas Newcomen (1664-1729) em 1705 para mover bombas em minas de carvão (veja a figura abaixo).



O princípio de funcionamento da máquina de Newcomen é o seguinte: um cilindro recebe o vapor produzido pela queima do carvão por uma válvula. Na outra extremidade do cilindro há um pistão móvel que se movimenta para cima com a entrada do vapor quente. O movimento do pistão provoca o movimento da bomba. Após a expansão máxima, o vapor no interior do cilindro é resfriado pela entrada de água por outra válvula. O resfriamento do vapor diminui a pressão sobre o pistão, que começa a descer pelo efeito da pressão atmosférica.

A máquina de Newcomen foi aperfeiçoada pelo engenheiro escocês James Watt (1736-1819) que, em 1768, introduziu uma câmara condensadora, imersa em água fria, para onde o vapor era desviado após empurrar o pistão, sendo resfriado.



A máquina de Watt aumentou consideravelmente a eficiência da máquina de Newcomen, reduzindo a quantidade de carvão necessária para executar um dado trabalho e tornando a máquina a vapor viável economicamente. A partir daí a máquina a vapor se espalhou rapidamente pelo mundo, sendo usada em indústrias, estradas de ferro, agricultura e, mais tarde, para gerar eletricidade.

O conceito de termodinâmica nada mais é do que a relação entre o calor e o trabalho, ou o estudo de métodos para transformar a energia térmica em energia de movimento. A termodinâmica é composta por duas leis. Vamos a elas:

- Primeira lei: é o princípio da conservação da energia aplicada a sistemas termodinâmicos;
- Segunda lei: mostra as limitações impostas pela natureza quando se transforma calor em trabalho.

Essas leis podem parecer genéricas e um tanto complicadas de serem entendidas se antes não compreendermos os conceitos de trabalho e energia interna.

O trabalho é uma força e um conseqüente deslocamento como quando, por exemplo, você faz força para deslocar um móvel de um lugar para outro. Em um gráfico de pressão por volume, por exemplo, o trabalho é numericamente igual à área entre a curva do gráfico e o eixo do volume. Isso mostra que a energia interna e a temperatura estão relacionadas de maneira direta.



U é a energia interna;  
R é a constante dos gases perfeitos;  
T é a temperatura;  
n é o numero de mols.

Na segunda Lei da Termodinâmica estudaremos as restrições da transformação de calor em trabalho. Em outras palavras, é impossível construir uma máquina térmica com 100% de eficiência. (Lembrando que máquina térmica é um equipamento que pode transformar calor em trabalho. Ele funciona entre duas fontes, uma quente e uma fria, e com o fluxo de calor da fonte quente para a fonte fria).

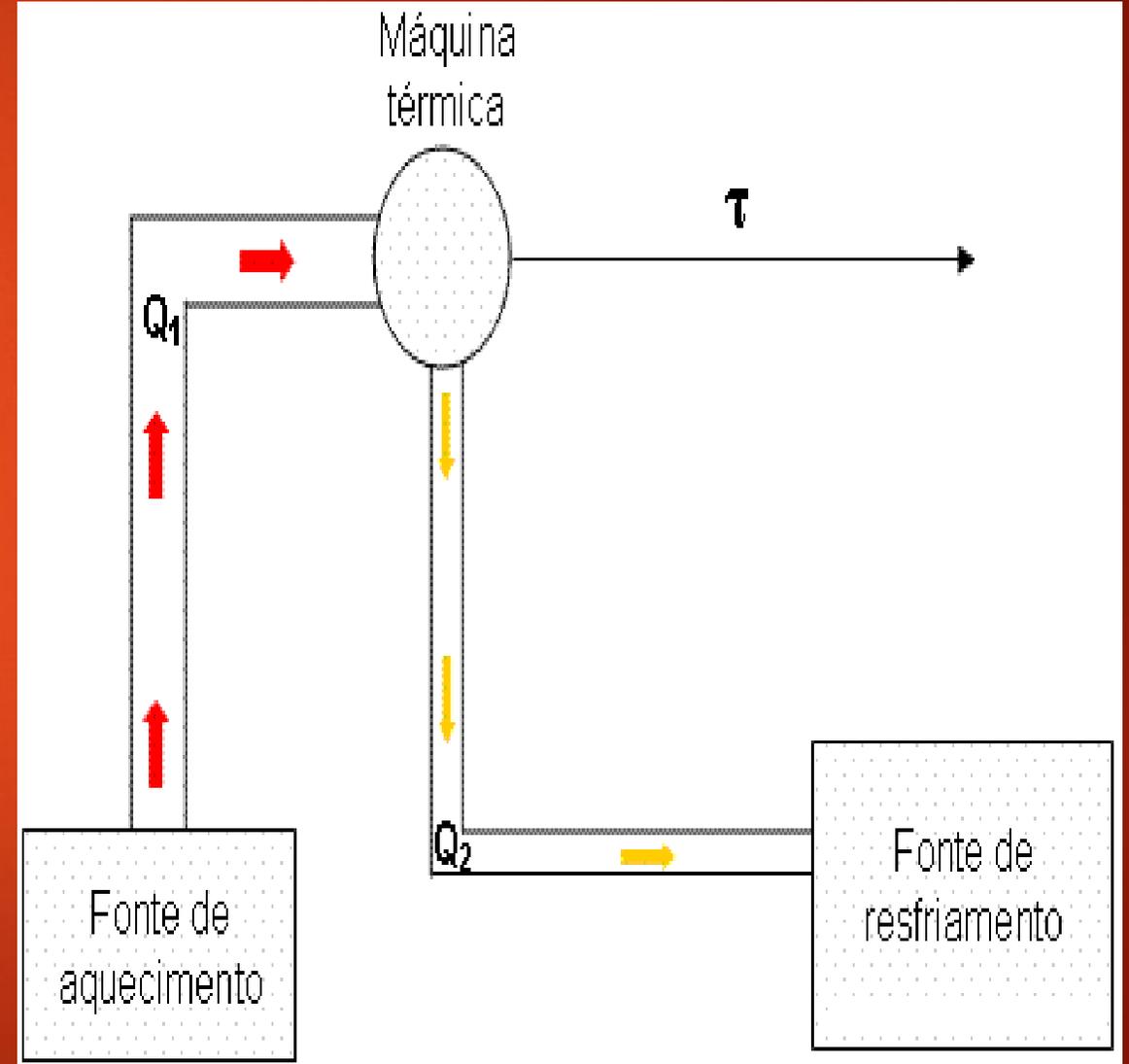
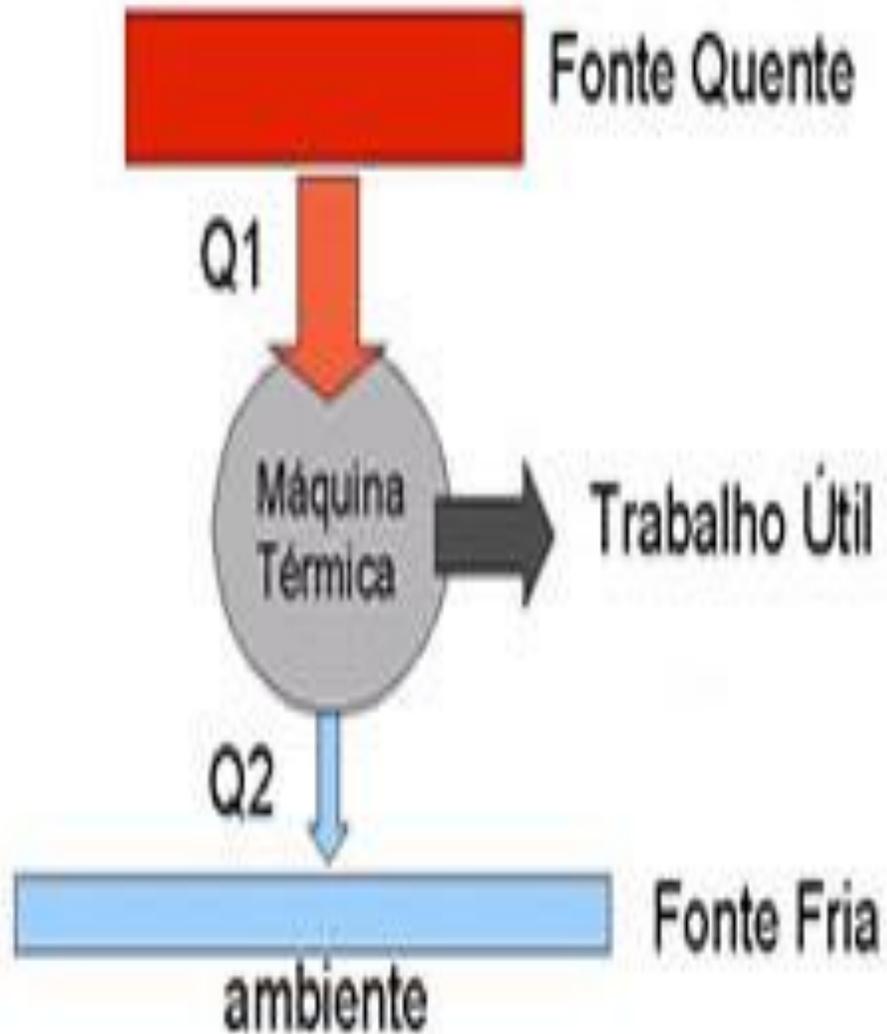


*“O calor não pode passar de forma espontânea de um corpo de menor temperatura para outro de temperatura mais alta.”*

Sendo assim, as máquinas térmicas operam em ciclos, retirando uma quantidade calor ( $Q_1$ ) de uma fonte quente, convertendo parte desse calor em trabalho mecânico ( $T$ ) e rejeitando outra quantidade de calor para uma fonte fria ( $Q_2$ ).

Esse esquema de funcionamento pode ser observado na figura a seguir:

Chamamos máquina térmica o dispositivo que, utilizando duas fontes térmicas, faz com que a energia térmica se converta em energia mecânica (trabalho).

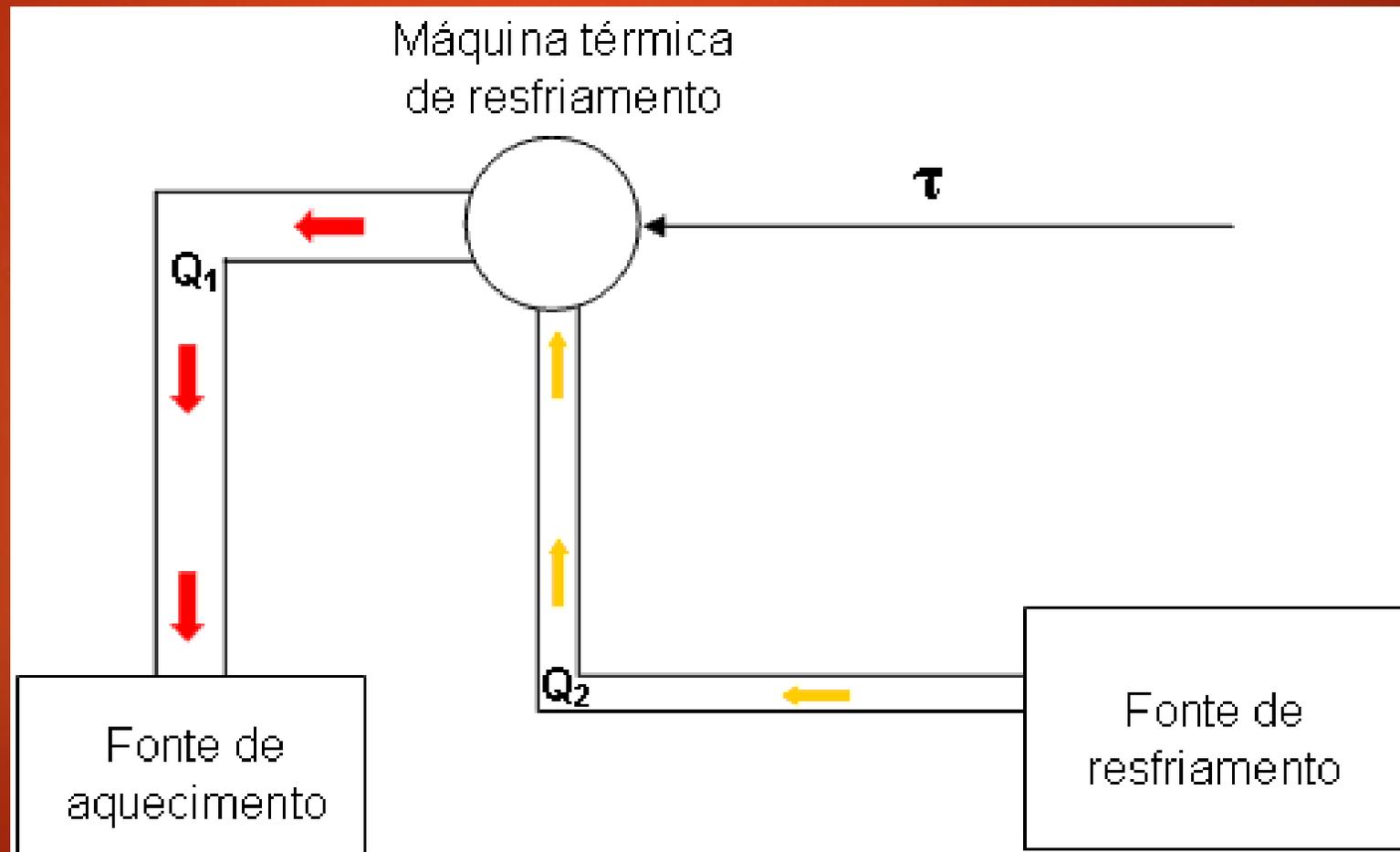


Assim é válido que:

$$\tau = |Q_1| - |Q_2|$$

Utiliza-se o valor absolutos das quantidade de calor pois, em uma máquina que tem como objetivo o resfriamento, por exemplo, estes valores serão negativos.

Neste caso, o fluxo de calor acontece da temperatura menor para o a maior. Mas conforme a 2ª Lei da Termodinâmica, este fluxo não acontece espontaneamente, logo é necessário que haja um trabalho externo, assim:



Podemos chamar de rendimento de uma máquina a relação entre a energia utilizada como forma de trabalho e a energia fornecida:

Considerando:

$\eta$  = rendimento;

$\tau$  = trabalho convertido através da energia térmica fornecida;

$Q_1$  = quantidade de calor fornecida pela fonte de aquecimento;

$Q_2$  = quantidade de calor não transformada em trabalho.

Podemos expressar o rendimento como:

$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|}$$

$$\eta = \frac{\tau}{Q_1} \text{ CICLO}$$

Para sabermos este rendimento em percentual, multiplica-se o resultado obtido por 100%.

O engenheiro Sadi Carnot foi o responsável, na época, por fazer demonstrações nas quais era impossível obter 100% de rendimento. Sadi propôs que uma máquina térmica teórica, ideal, funcionaria percorrendo um ciclo particular, hoje designado **Ciclo de Carnot**.

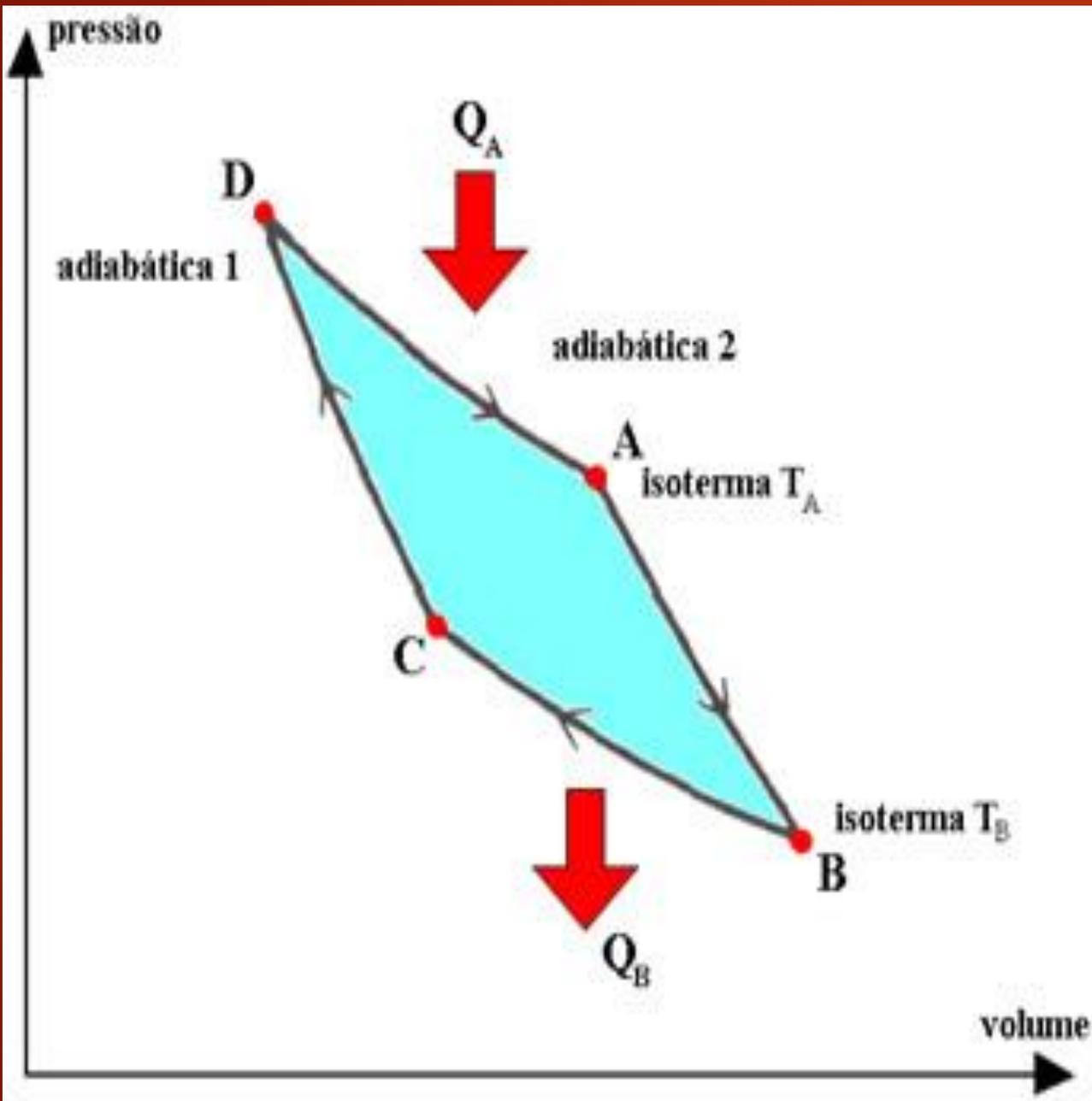
Em sua demonstração, Carnot conceituou dois postulados, que foram propostos antes mesmo de enunciada a primeira lei da termodinâmica. Veja o que os postulados de Carnot enunciam:

### **1º postulado de Carnot**

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

### **2º postulado de Carnot**

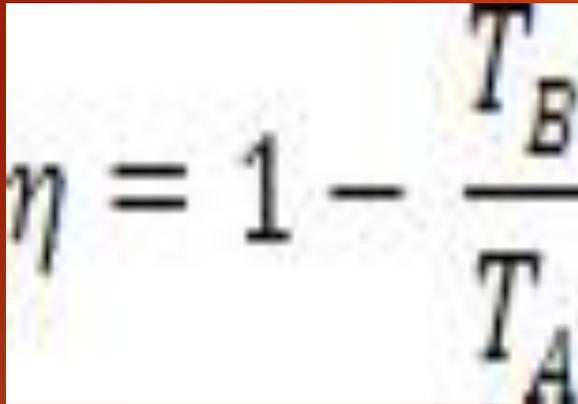
Ao operar entre duas temperaturas, a máquina *ideal* de Carnot tem o mesmo rendimento, qualquer que seja o fluido operante, e é completamente *reversível*, sem adição de energia.



No ciclo de Carnot, os calores trocados ( $Q_A$  e  $Q_B$ ) e as temperaturas termodinâmicas ( $T_A$  e  $T_B$ ) das fontes quente e fria são proporcionais, valendo a relação:

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

Substituindo na equação do rendimento de uma máquina térmica, obtemos, para a máquina de Carnot:


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

Considerando a temperatura da fonte fria ( $T_B$ ) igual a zero kelvin (zero absoluto), temos  $\eta = 1$  ou  $\eta = 100\%$ . Entretanto, esse fato contraria a segunda lei da termodinâmica, que garante ser impossível um rendimento de 100%, o que nos leva a concluir que nenhum sistema físico pode se apresentar com temperatura igual a zero absoluto (K).

## QUESTAO – 20

Um motor só poderá realizar trabalho se receber uma quantidade de energia de outro sistema. No caso, a energia armazenada no combustível é, em parte, liberada durante a combustão para que o aparelho possa funcionar. Quando o motor funciona, parte da energia convertida ou transformada na combustão não pode ser utilizada para a realização de trabalho. Isso significa dizer que há vazamento da energia em outra forma. De acordo com o texto, as transformações de energia que ocorrem durante o funcionamento do motor são decorrentes de a :

- a) liberação de calor dentro do motor ser impossível.
- b) realização de trabalho pelo motor ser incontrolável.
- c) conversão integral de calor em trabalho ser impossível.
- d) transformação de energia térmica em cinética ser impossível.
- e) utilização de energia potencial do combustível ser incontrolável.



De acordo com a segunda lei da termodinâmica. “È impossível uma máquina térmica, operando em ciclos, converter integralmente calor em trabalho. **LETRA C**

## QUESTAO – 21

Com relação às máquinas térmicas e a Segunda Lei da Termodinâmica, analise as proposições a seguir.

- I. Máquinas térmicas são dispositivos usados para converter energia mecânica em energia térmica com conseqüente realização de trabalho.
- II. O enunciado da Segunda Lei da Termodinâmica, proposto por Clausius, afirma que o calor não passa espontaneamente de um corpo frio para um corpo mais quente, a não ser forçado por um agente externo como é o caso do refrigerador.
- III. É possível construir uma máquina térmica que, operando em transformações cíclicas, tenha como único efeito transformar completamente em trabalho a energia térmica de uma fonte quente.
- IV. Nenhuma máquina térmica operando entre duas temperaturas fixadas pode ter rendimento maior que a máquina ideal de Carnot, operando entre essas mesmas temperaturas.

São corretas apenas

a) I e II

b) II e III

c) I, III e IV

d) II e IV

## Resposta da questão: [D]

- I. Falsa. Máquinas térmicas são dispositivos usados para converter energia térmica em energia mecânica com conseqüente realização de trabalho.

## II. Verdadeira. Idem enunciado.

- III. Falsa. De acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, nenhuma máquina térmica, operando em ciclos, pode retirar calor de uma fonte e transformá-lo integralmente em trabalho.

## IV. Verdadeira. Idem enunciado

## QUESTAO – 22

Os estudos científicos desenvolvidos pelo engenheiro francês Nicolas Sadi Carnot (1796-1832) na tentativa de melhorar o rendimento de máquinas térmicas serviram de base para a formulação da segunda lei da termodinâmica. Acerca do tema, considere as seguintes afirmativas:

- 1) O rendimento de uma máquina térmica é a razão entre o trabalho realizado pela máquina num ciclo e o calor retirado do reservatório quente nesse ciclo.
- 2) Os refrigeradores são máquinas térmicas que transferem calor de um sistema de menor temperatura para outro a uma temperatura mais elevada.
- 3) É possível construir uma máquina, que opera em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e transformá-lo integralmente em trabalho



Assinale a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas 1 e 3 são verdadeiras.
- b) Somente a afirmativa 1 é verdadeira.
- c) Somente a afirmativa 2 é verdadeira.
- d) Somente as afirmativas 1 e 2 são verdadeiras.
- e) Somente as afirmativas 2 e 3 são verdadeiras.



Resposta da questão: [D]

## QUESTAO – 23

Sobre as transformações termodinâmicas que podem ocorrer com um gás ideal confinado em um cilindro com pistão, assinale o que for correto.

a) 20   b) 7   c) 25   d) 24

(01) Um gás ideal realiza trabalho ao se expandir, empurrando o pistão contra uma pressão externa.

(02) Em uma transformação adiabática ocorre troca de calor com a vizinhança.

(04) A energia interna de uma amostra de gás ideal não varia, quando este sofre uma transformação isovolumétrica.

(08) Quando o gás ideal sofre uma compressão, o trabalho é realizado por um agente externo sobre o gás ideal.

(16) O gás ideal não realiza trabalho em uma transformação isovolumétrica.

## Resposta da questão:

$$01 + 08 + 16 = 25.$$

**(01) Correta.** Devido à pressão, o gás exerce força sobre o êmbolo, empurrando o pistão, realizando trabalho positivo.

(02) Incorreta. Transformação adiabática é aquela em que o gás não troca calor com a vizinhança.

(04) Incorreta. A energia interna de um gás ideal depende exclusivamente da sua temperatura absoluta.

Portanto, somente não ocorre variação da energia interna, quando a transformação é isotérmica.

**(08) Correta.** Na compressão o gás recebe trabalho de um agente externo.

**(16) Correta.** Se a transformação é isovolumétrica, não ocorre deslocamento do pistão, não havendo realização de trabalho.

## QUESTAO – 24

O rendimento de uma máquina térmica de Carnot é de 25% e a fonte fria é a própria atmosfera a  $27^{\circ}\text{C}$ . Determinar a temperatura da fonte quente em ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$0,25 = 1 - \frac{300}{T_1}$$

$$\frac{300}{T_1} = 1 - 0,25$$

$$\frac{300}{T_1} = 0,75$$

$$T_1 = \frac{300}{0,75}$$

$$T_1 = 400 K$$

Convertendo para Celsius,

$$400 K = 400 - 273 = 127^\circ C$$

## QUESTAO – 25

Uma máquina térmica recebe de uma fonte quente 100 cal e transfere para uma fonte fria 70 cal. Qual o rendimento desta máquina ( %)?

**Solução:**

Sabemos que :  $h = 1 - Q_2 / Q_1$

Então,

$$h = 1 - 70 / 100 \quad \text{è} \quad h = 1 - 0,7 = 0,3 = 30\%$$

## QUESTAO – 26

Uma máquina térmica de Carnot recebe de uma fonte quente 1000 cal por ciclo. Sendo as temperaturas das fontes quente e fria, respectivamente, 127 °C e 427 °C, determinar

- a) o rendimento da máquina
- b) o trabalho, em joules, realizado pela máquina em cada ciclo
- c) a quantidade de calor, em joules, rejeitada para a fonte fria

Usar como equivalência  $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$

## Solução:

Convertendo as medidas, temos:

$$T_1 = 427 + 273 = 700 \text{ K}$$

$$T_2 = 127 + 273 = 400 \text{ K}$$

$$Q_1 = 1000 \text{ cal} = 1000 \cdot 4,2 = 4200 \text{ J}$$

a) cálculo do rendimento

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \eta = 1 - \frac{400}{700}$$

$$\eta = 1 - 0,57 = 0,43\%$$

b) Cálculo do trabalho em cada ciclo

Sabemos que:  $h = T / Q_1$        $0,43 = T / 4200$        $T = 4200 \cdot 0,43 = 1806 \text{ J}$

c) Cálculo da quantidade de calor rejeitada.

Sabemos que

$$\tau = |Q_1| - |Q_2|$$

$$1806 = 4200 - |Q_2|$$

$$|Q_2| = 4200 - 1806 = 2394 \text{ J}$$

## QUESTAO – 27

Uma máquina térmica de Carnot recebe de uma fonte quente 1000 cal por ciclo. Sendo as temperaturas das fontes quente e fria, respectivamente, 127 °C e 427 °C, determinar

- a) o rendimento da máquina
- b) o trabalho, em joules, realizado pela máquina em cada ciclo
- c) a quantidade de calor, em joules, rejeitada para a fonte fria

Usar como equivalência  $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$

## Solução:

Convertendo as medidas, temos:

$$T_1 = 427 + 273 = 700 \text{ K}$$

$$T_2 = 127 + 273 = 400 \text{ K}$$

$$Q_1 = 1000 \text{ cal} = 1000 \cdot 4,2 = 4200 \text{ J}$$

a) cálculo do rendimento

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \eta = 1 - \frac{400}{700}$$

$$\eta = 1 - 0,57 = 0,43\%$$

b) Cálculo do trabalho em cada ciclo

Sabemos que:  $h = T / Q_1$        $0,43 = T / 4200$        $T = 4200 \cdot 0,43 = 1806 \text{ J}$

c) Cálculo da quantidade de calor rejeitada.

Sabemos que

$$\tau = |Q_1| - |Q_2|$$

$$1806 = 4200 - |Q_2|$$

$$|Q_2| = 4200 - 1806 = 2394 \text{ J}$$

