

## **2ª Lei da Termodinâmica**

Dentre as duas leis da termodinâmica, a segunda é a que tem maior aplicação na construção de máquinas e utilização na indústria, pois trata diretamente do rendimento das máquinas térmicas.

Dois enunciados, ilustram a 2ª Lei da Termodinâmica, os enunciados de Clausius e Kelvin-Planck:

### **Enunciado de Clausius:**

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

Tendo como consequência que o sentido natural do fluxo de calor é da temperatura mais alta para a mais baixa, e que para que o fluxo seja inverso é necessário que um agente externo realize um trabalho sobre este sistema.

### **Enunciado de Kelvin-Planck:**

“É impossível a construção de uma máquina que, operando em um ciclo termodinâmico, converta toda a quantidade de calor recebido em trabalho.”

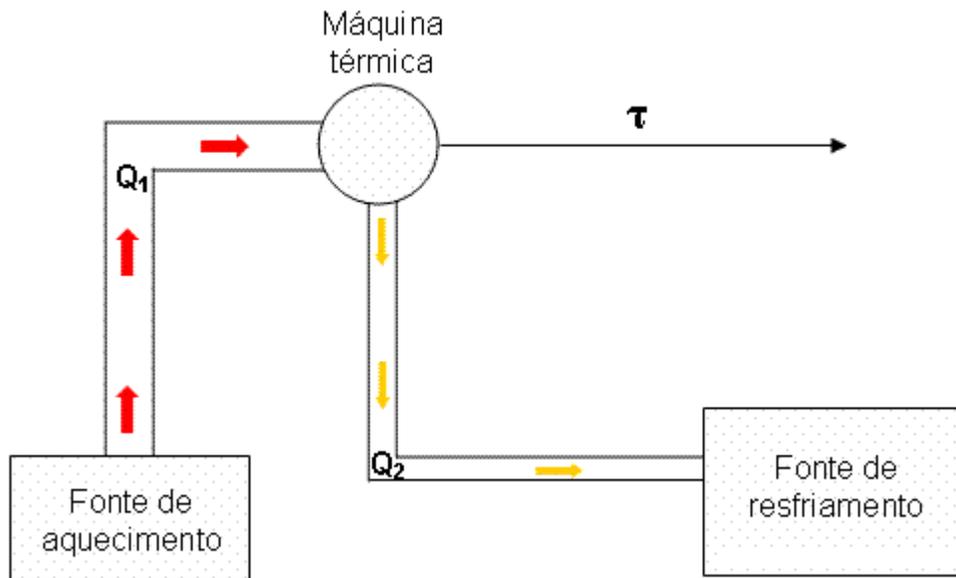
Este enunciado implica que, não é possível que um dispositivo térmico tenha um rendimento de 100%, ou seja, por menor que seja, sempre há uma quantidade de calor que não se transforma em trabalho efetivo.

## **Máquinas térmicas**

As máquinas térmicas foram os primeiros dispositivos mecânicos a serem utilizados em larga escala na indústria, por volta do século XVIII.

Na forma mais primitiva, era usado o aquecimento para transformar água em vapor, capaz de movimentar um pistão, que por sua vez, movimentava um eixo que tornava a energia mecânica utilizável para as indústrias da época.

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



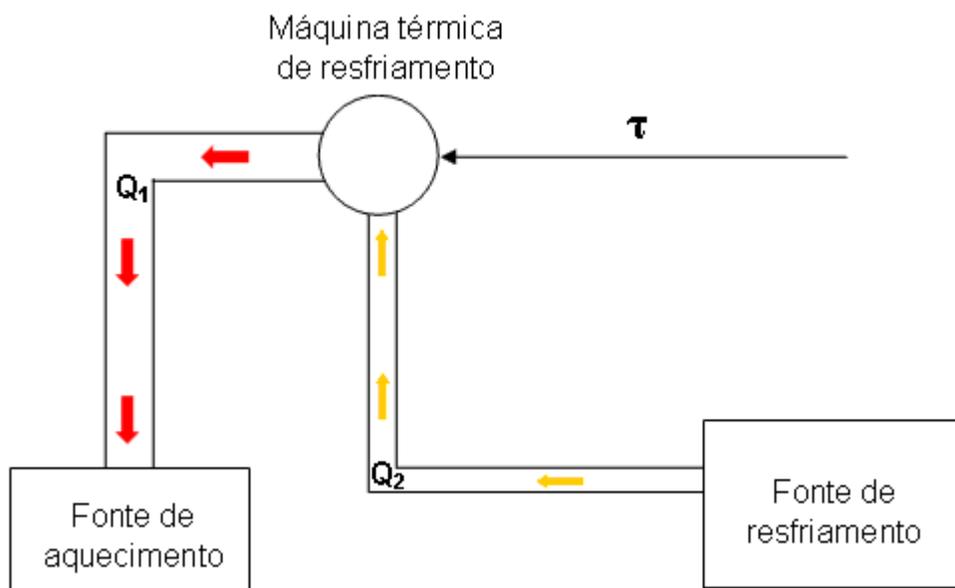
A fonte térmica fornece uma quantidade de calor,  $Q_1$ , que no dispositivo transforma-se em trabalho, mais uma quantidade de calor que não é capaz de ser utilizado como trabalho,  $Q_2$ .

Assim é válido que:

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

Utiliza-se o valor absoluto das quantidades 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 a maior, mas este fluxo não acontece espontaneamente, logo é necessário que haja um trabalho externo, assim:



## Rendimento das máquinas térmicas

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.

$$\eta = \frac{\tau}{|Q_1|}$$

Mas como constatado:

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

logo, podemos expressar o rendimento como:

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

O valor mínimo para o rendimento é ZERO se a máquina não realizar nenhum trabalho, e o máximo, 1, se fosse possível que a máquina transformasse todo o calor recebido em trabalho, mas como visto, isto não é possível.

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

### Exemplo:

Um motor a vapor realiza um trabalho de 12kJ quando lhe é fornecido uma quantidade de calor igual a 23kJ. Qual a capacidade percentual que o motor tem de transformar energia térmica em trabalho?

$$\eta = \frac{\tau}{Q_1} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{12000}{23000} \cdot 100\%$$

$$\eta = 0,5217 \cdot 100\%$$

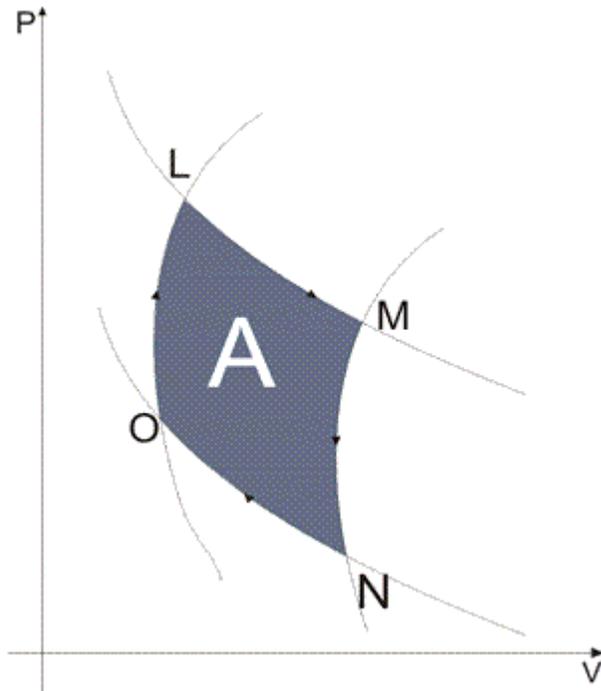
$$\eta = 52,17\%$$

## **Ciclo de Carnot**

Até meados do século XIX, acreditava-se ser possível a construção de uma máquina térmica ideal, que seria capaz de transformar toda a energia fornecida em trabalho, obtendo um rendimento total (100%).

Para demonstrar que não seria possível, o engenheiro francês Nicolas Carnot (1796-1832) propôs uma máquina térmica teórica que se comportava como uma máquina de rendimento total, estabelecendo um ciclo de rendimento máximo, que mais tarde passou a ser chamado Ciclo de Carnot.

Este ciclo seria composto de quatro processos, independente da substância:



L – M: uma **expansão isotérmica reversível**, o sistema recebe uma quantidade de calor da fonte de aquecimento

M – N: uma **expansão adiabática reversível**, o sistema não troca calor com as fontes térmicas

N – O: uma **compressão isotérmica reversível**, o sistema cede calor para a fonte de resfriamento

O – L: uma **compressão adiabática reversível**, o sistema não troca calor com as fontes térmicas

Numa máquina de Carnot, a quantidade de calor que é fornecida pela fonte de aquecimento e a quantidade cedida à fonte de resfriamento são proporcionais às suas temperaturas absolutas,

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1}$$

Assim, o rendimento de uma máquina de Carnot é:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1}$$

Logo:

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

Sendo:

$T_2$  = temperatura absoluta da fonte de resfriamento

$T_1$  = temperatura absoluta da fonte de aquecimento

Com isto se conclui que para que haja 100% de rendimento, todo o calor vindo da fonte de aquecimento deverá ser transformado em trabalho, pois a temperatura absoluta da fonte de resfriamento deverá ser 0K.

Partindo daí conclui-se que o zero absoluto não é possível para um sistema físico.

Exemplo:

Qual o rendimento máximo teórico de uma máquina à vapor, cujo fluido entra a 560°C e abandona o ciclo a 200°C?

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$
$$\eta = 1 - \frac{(200 + 273)\text{K}}{(560 + 273)\text{K}}$$
$$\eta = 1 - 0,567$$
$$\eta = 0,432 \Rightarrow 43,2\%$$

## Entropia (S)

Em termodinâmica, entropia é a medida de desordem das partículas em um sistema físico.

Assim, podemos concluir que:

sistema recebe calor sua entropia aumenta;

sistema cede calor sua entropia diminui;

sistema não troca calor  $Q=0$ , sua entropia constante.

Segundo Rudolf Clausius, que utilizou a idéia de entropia pela primeira vez em 1865, para o estudo da entropia como grandeza física é mais útil conhecer sua variação do que seu valor absoluto.

Assim, Clausius definiu que a variação de entropia ( $\Delta S$ ) em um sistema como:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Para processos onde as temperaturas absolutas (T) são constantes.

Observando a natureza como um sistema, podemos dizer que o Universo está constantemente recebendo energia, mas não tem capacidade de cedê-la, concluindo então que a entropia do Universo está aumentando com o passar do tempo.