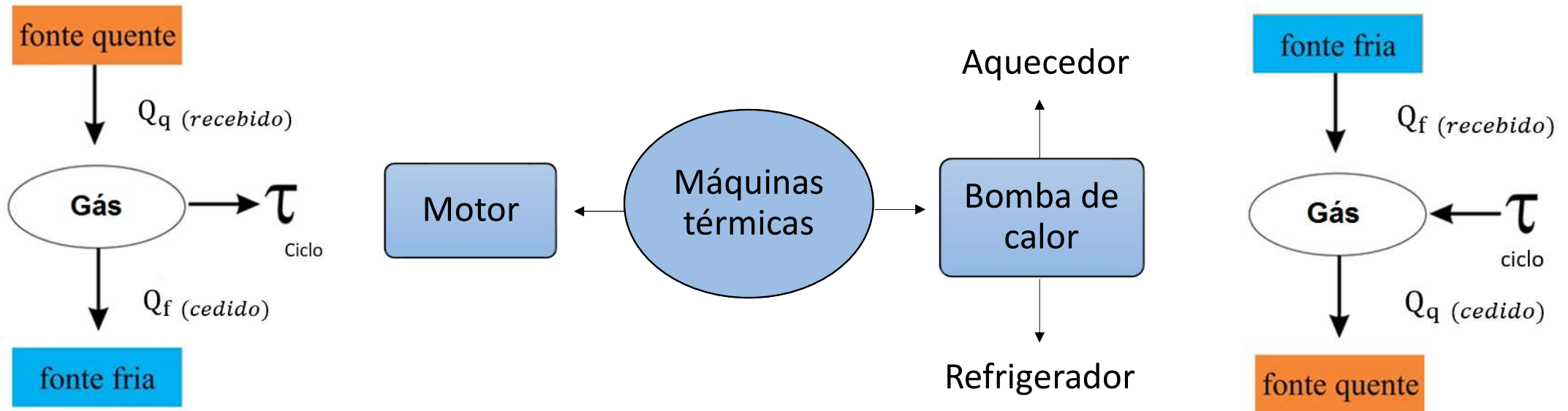


## Termodinâmica e máquinas térmicas

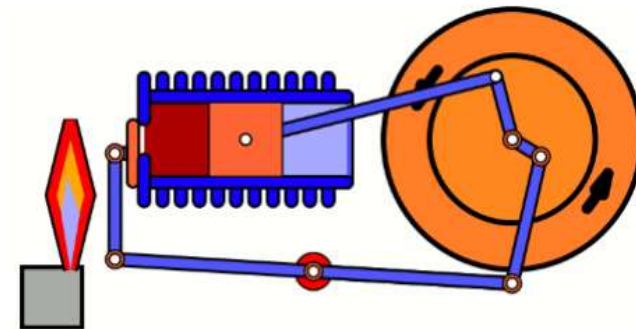
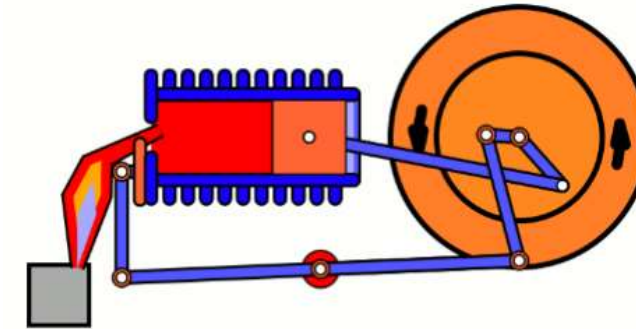
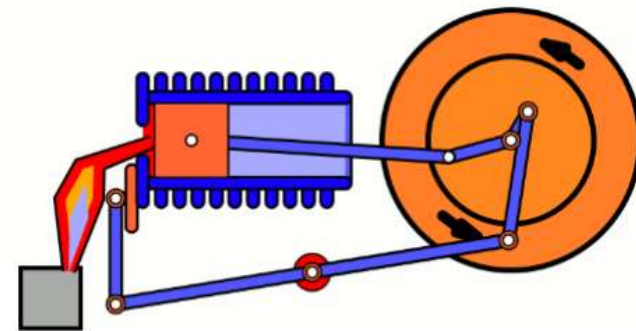
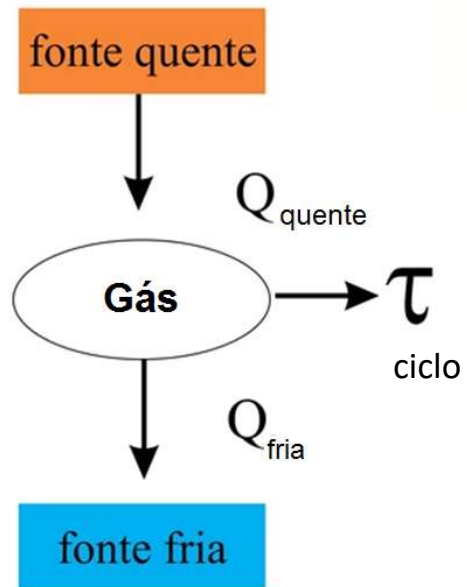
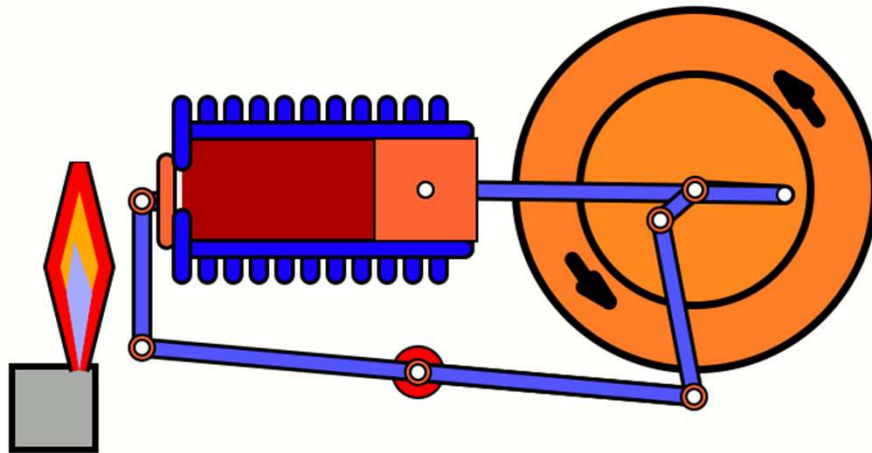
- Aula 10 / Apostila 2

Apresentação e demais documentos: [fisicasp.com.br](http://fisicasp.com.br)

# 1. Máquinas térmicas



## 2. Motor

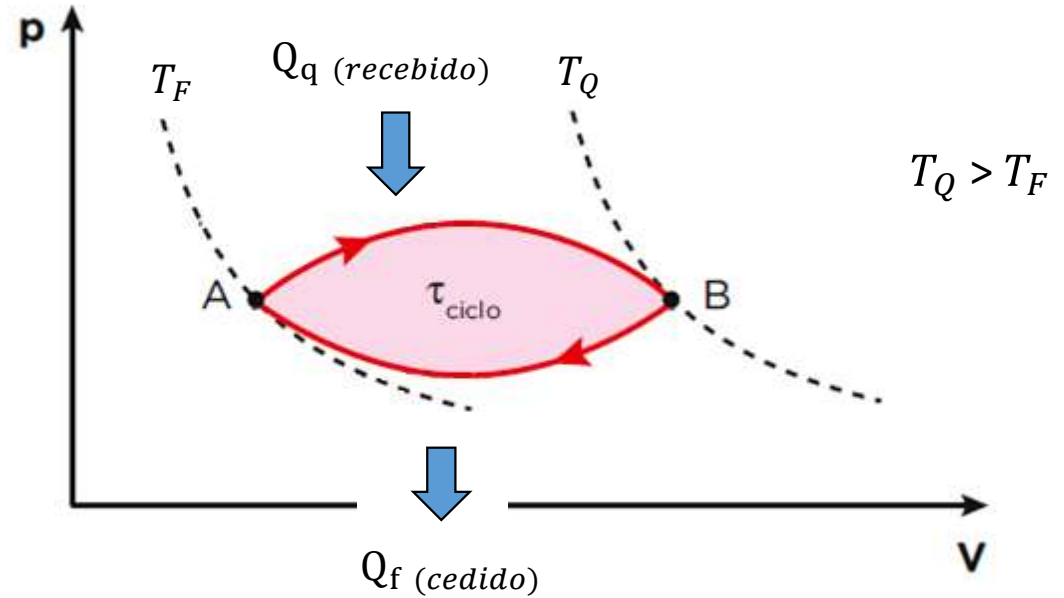
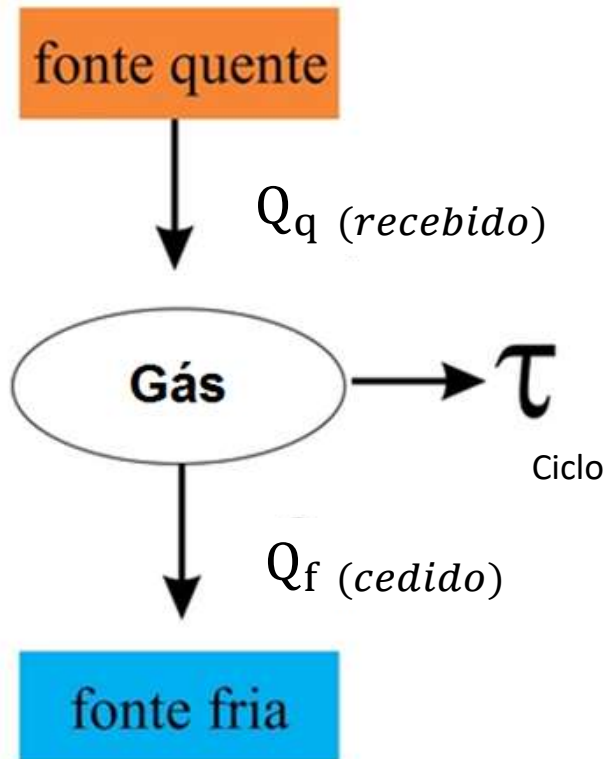


Expansão

Compressão

## 2. Motor

Conversão de parte da energia térmica em energia mecânica

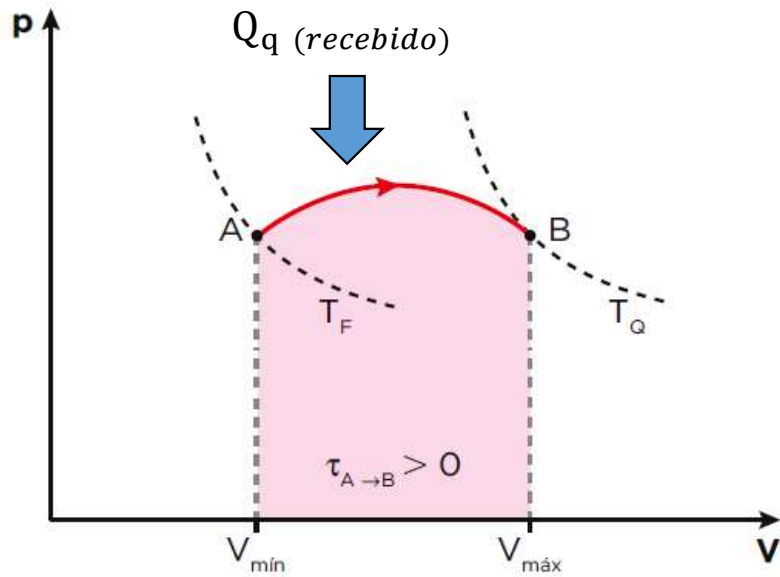


- Ciclo no sentido horário  $\rightarrow \tau > 0$
- $Q_{\text{ciclo}} = Q_q(\text{recebido}) - |Q_f(\text{cedido})|$

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = 0 \Rightarrow \cancel{\Delta U_{\text{ciclo}}} = Q_{\text{ciclo}} - \tau_{\text{ciclo}} \Rightarrow Q_{\text{ciclo}} = \tau_{\text{ciclo}}$$

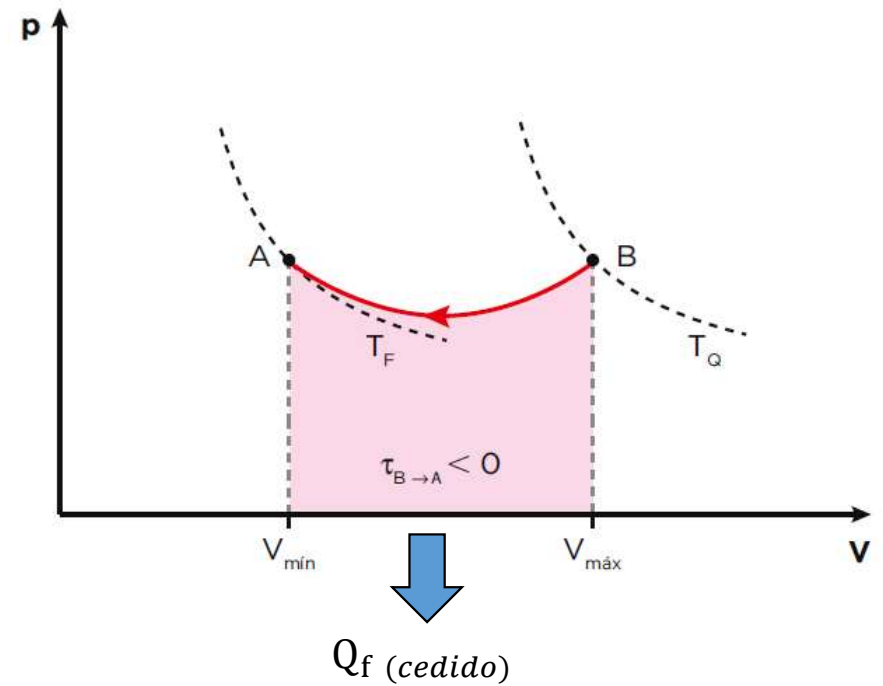
## 2. Motor

Expansão



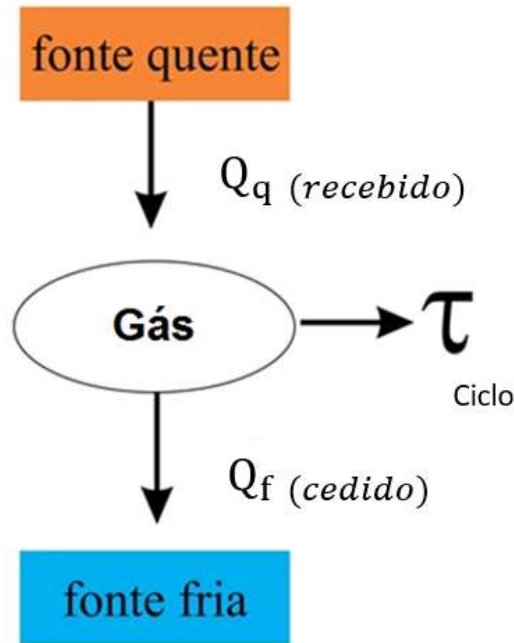
$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_{AB} > 0 \\ \tau_{AB} > 0 \\ Q_{AB} > 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_{AB} = \Delta U_{AB} + \tau_{AB} \\ (+) = (+) + (+) \end{array}$$

Compressão



$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_{BA} < 0 \\ \tau_{BA} < 0 \\ Q_{BA} < 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_{BA} = \Delta U_{BA} + \tau_{BA} \\ (-) = (-) + (-) \end{array}$$

## 2.2 Rendimento de um motor



- Avalia o percentual de calor absorvido pelo gás que é convertido em trabalho.

$$n = \frac{\tau_{\text{ciclo}}}{Q_q} = \frac{Q_q - |Q_f|}{Q_q} = 1 - \frac{|Q_f|}{Q_q}$$

$$0 \leq n < 1(100\%)$$

$$Q_q(\text{rec}) = \tau_{\text{ciclo}} + |Q_f(\text{ced})|$$

$$\tau_{\text{ciclo}} = Q_q(\text{rec}) - |Q_f(\text{ced})|$$

- Não existe máquina com rendimento 100%, ou seja, não existe máquina que converta todo o calor absorvido em trabalho útil! Parte do calor sempre é cedido à fonte fria.

## 2.2 Rendimento de um motor

- Avalia o percentual de calor absorvido pelo gás que é convertido em trabalho.

$$Q_q (rec) = \tau_{ciclo} + |Q_f (ced)|$$

$$\tau_{ciclo} = Q_q (rec) - |Q_f (ced)|$$

$$n = \frac{\tau_{ciclo}}{Q_q} = \frac{Q_q - |Q_f|}{Q_q} = 1 - \frac{|Q_f|}{Q_q}$$

$$0 \leq n < 1(100\%)$$

- Não existe máquina com rendimento 100%, ou seja, não existe máquina que converta todo o calor absorvido em trabalho útil! Parte do calor sempre é cedido à fonte fria.

## 2.3 - 2ª Lei da Termodinâmica

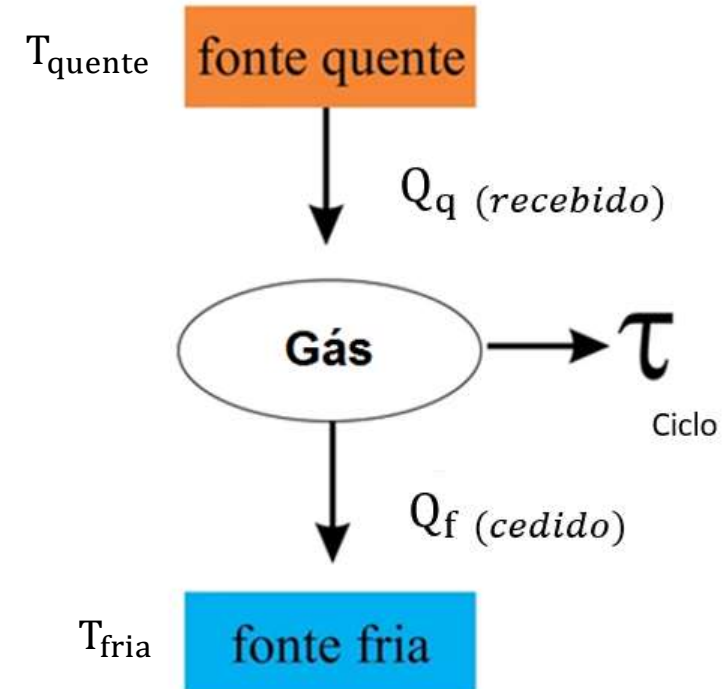
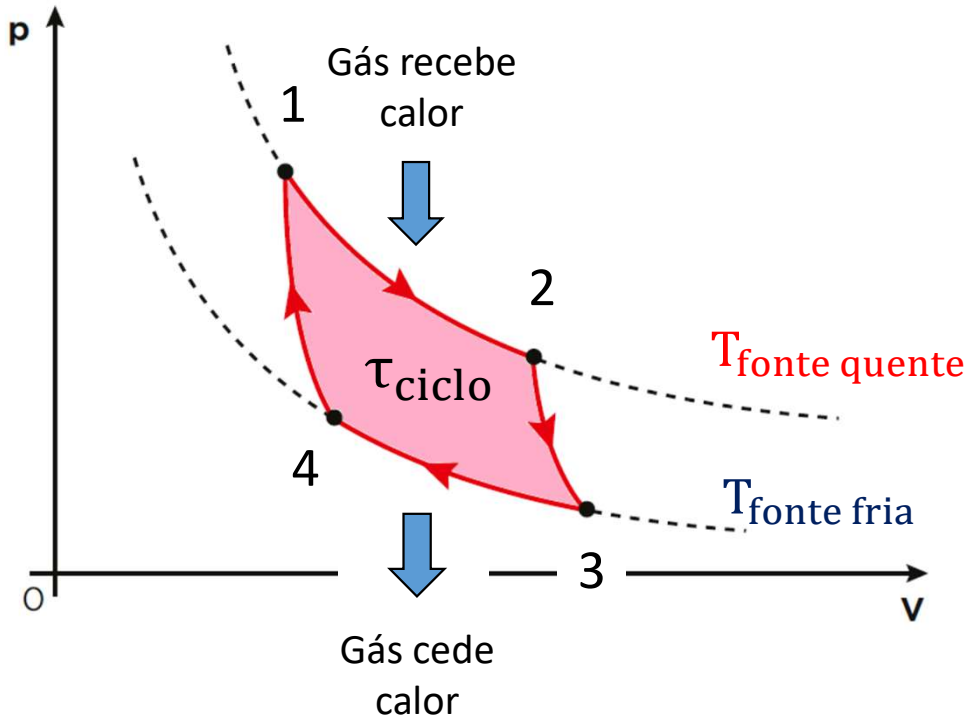
### Enunciado de Kelvin-Planck

Não existe máquina térmica que tenha como único efeito receber energia térmica de uma fonte quente e convertê-la integralmente energia mecânica.

**Interpretação:** não existe um motor com rendimento 100%.



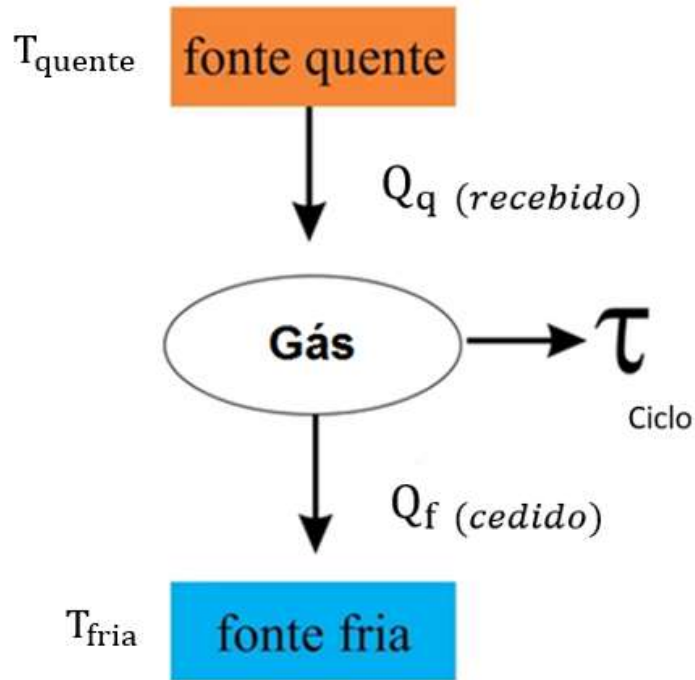
### 3.1 Motor – Ciclo de Carnot



- 1 → 2: expansão isotérmica
- 2 → 3: expansão adiabática
- 3 → 4: compressão isotérmica
- 4 → 1: compressão adiabática

- Ciclo de Carnot: máximo rendimento para uma máquina que opera entre duas temperaturas ( $T_{\text{quente}}$  e  $T_{\text{fria}}$ ).
- Cuidado! Mesmo sendo máximo, o rendimento nunca será igual a 100%.

### 3.2 Motor – Ciclo de Carnot: rendimento



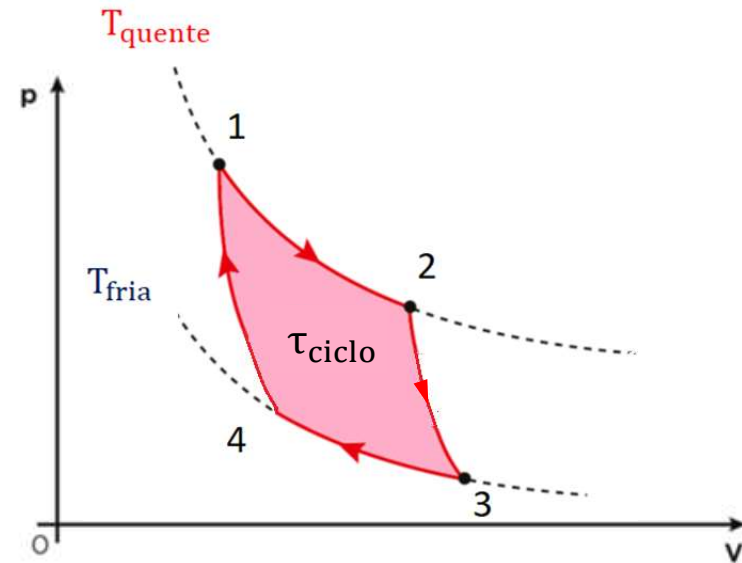
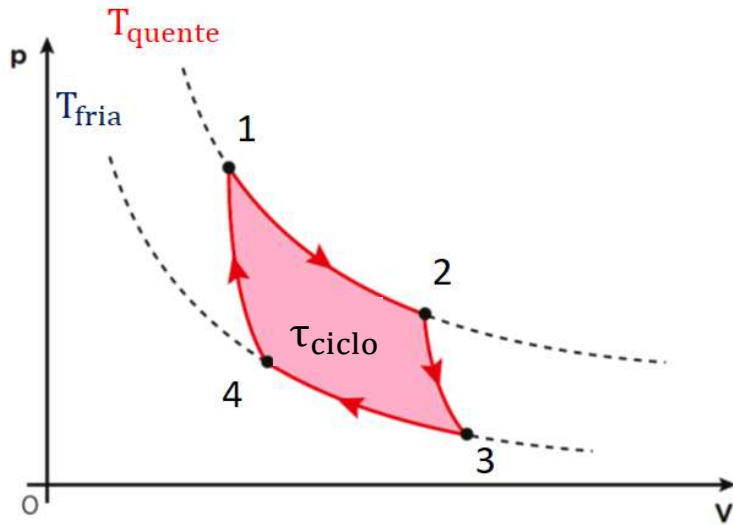
Expressões válidas para todos os casos de motores (inclusive para ciclo de Carnot)

Expressão válida apenas para o Ciclo de Carnot

$$\eta = \frac{\tau_{\text{ciclo}}}{Q_q} = \frac{Q_q - |Q_f|}{Q_q} = \frac{T_q - T_f}{T_q}$$

- As temperaturas das fontes fria e quente se mantêm constantes.
- Para os valores de temperatura utilizar a escala Kelvin.

### 3.2 Motor – Ciclo de Carnot: rendimento

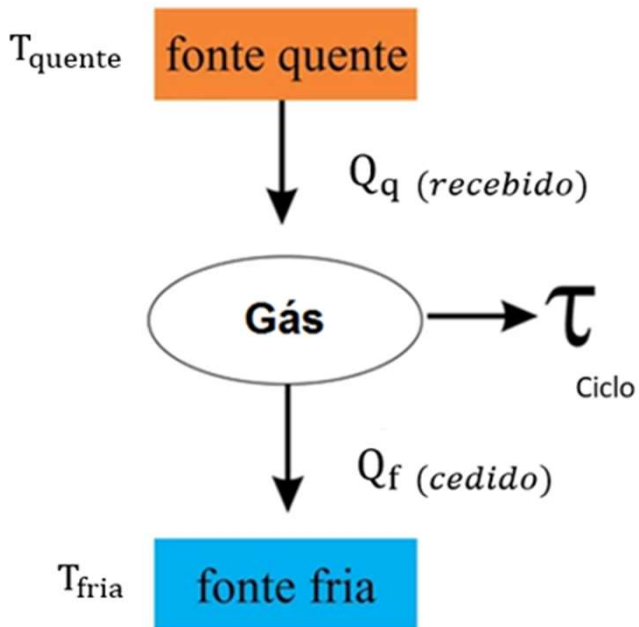


$$n \uparrow = \frac{\tau_{\text{ciclo}} \uparrow}{Q_q} = \frac{(T_q - T_f) \uparrow}{T_q}$$

### 3º Princípio da Termodinâmica

É impossível levar um sistema ao zero absoluto através de um número finito de operações.

Exemplo:

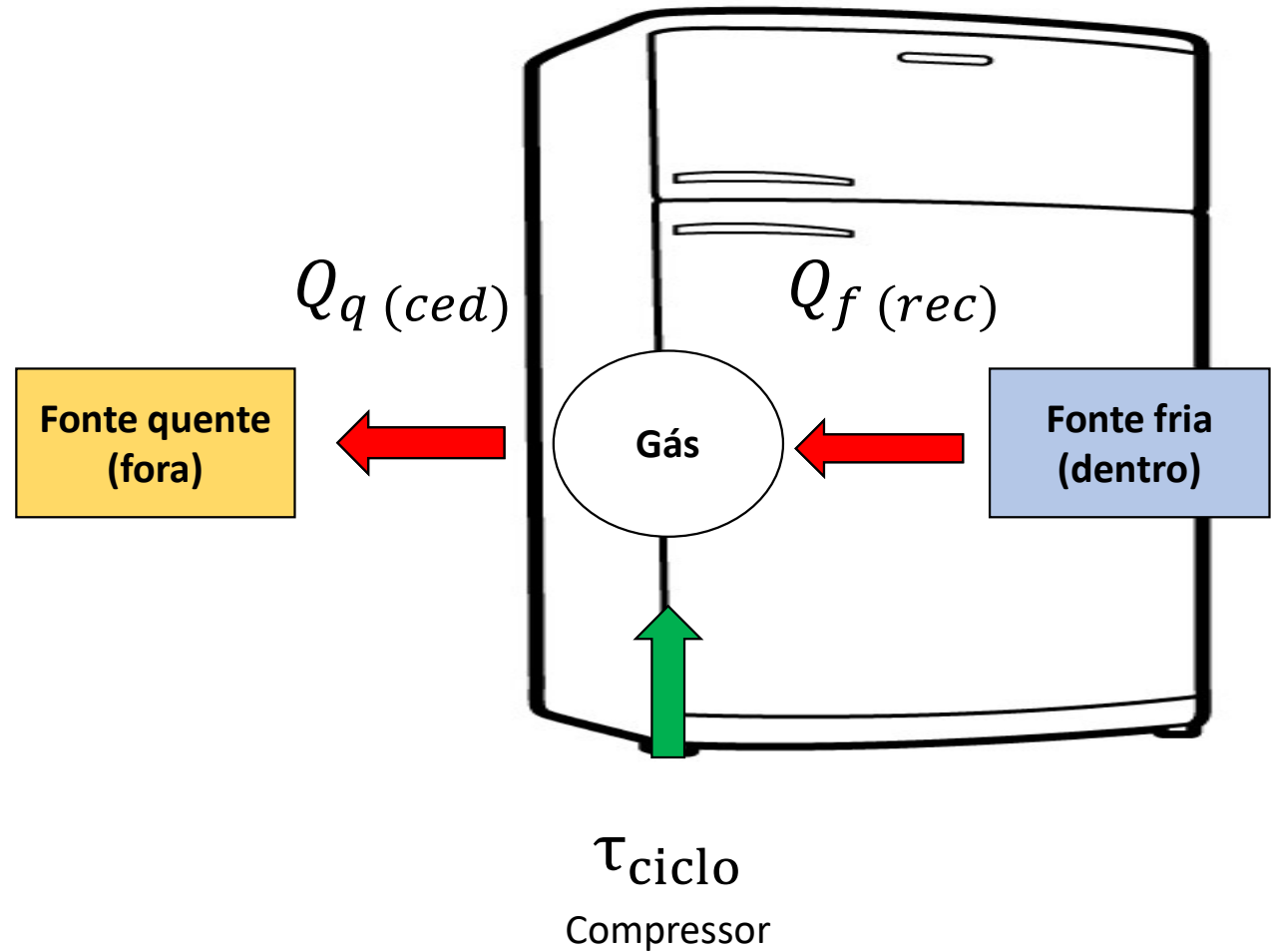
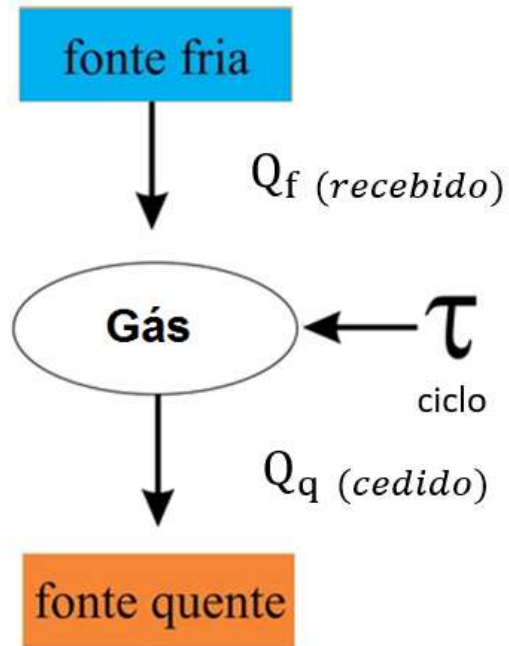


$$\eta = \frac{\tau_{\text{ciclo}}}{Q_q} = \frac{Q_q - |Q_f|}{Q_q} = \frac{T_q - T_f}{T_q}$$

Se  $T_f = 0 \rightarrow \eta = 100\%$  (impossível!)

## 4. Bombas de calor - refrigerador

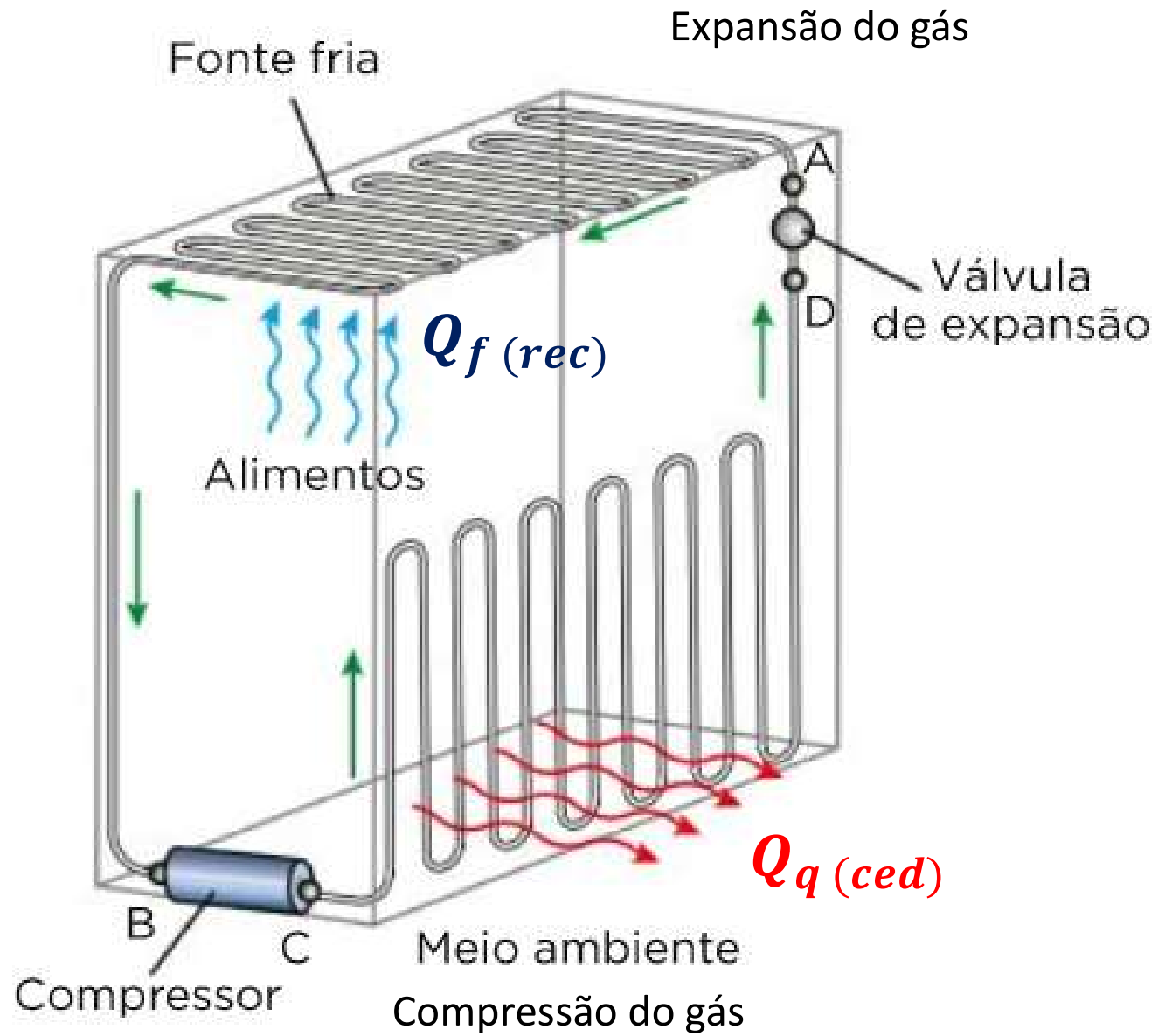
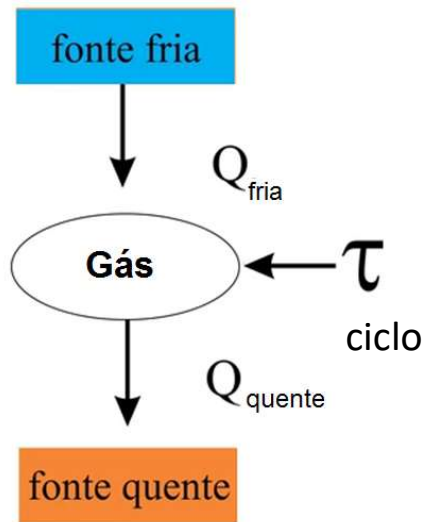
Conversão de Energia Mecânica em Energia Térmica



$$|Q_{q(ced)}| = |\tau_{\text{ciclo}}| + Q_{f(rec)}$$

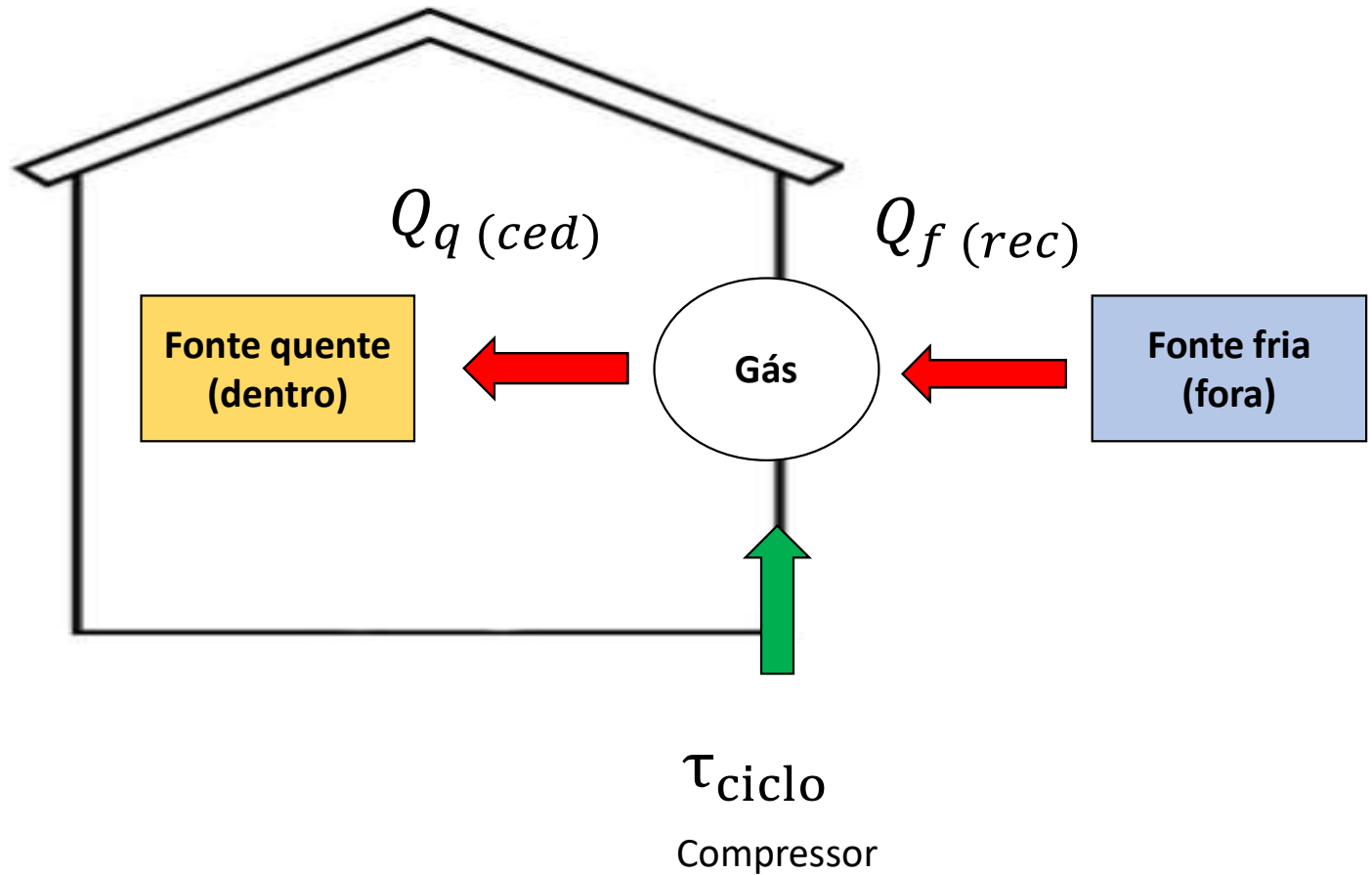
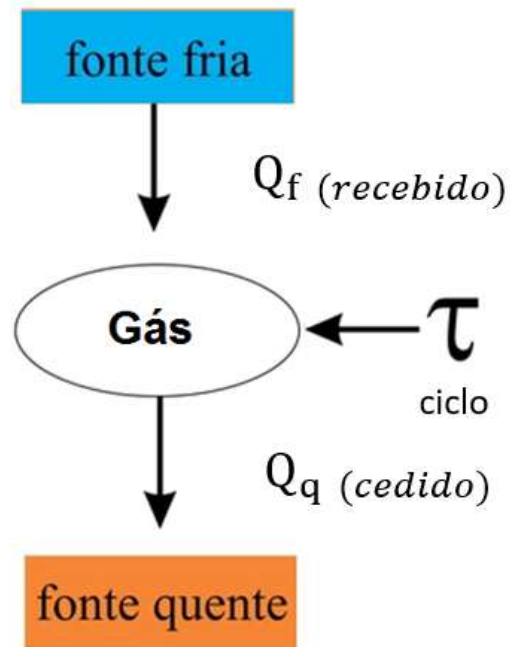
## Refrigerador

- O gás retira calor ( $Q_f(rec)$ ) parte interna (fonte fria) e despeja calor ( $Q_q(ced)$ ) na parte externa (fonte quente).



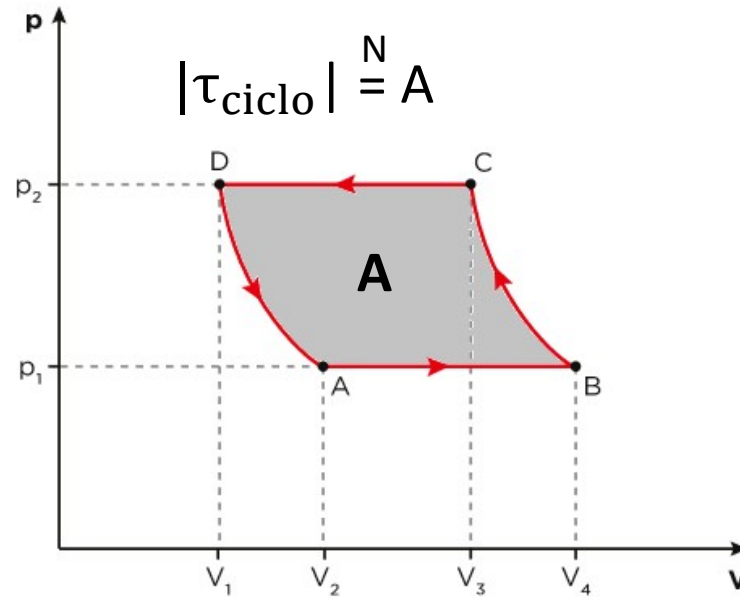
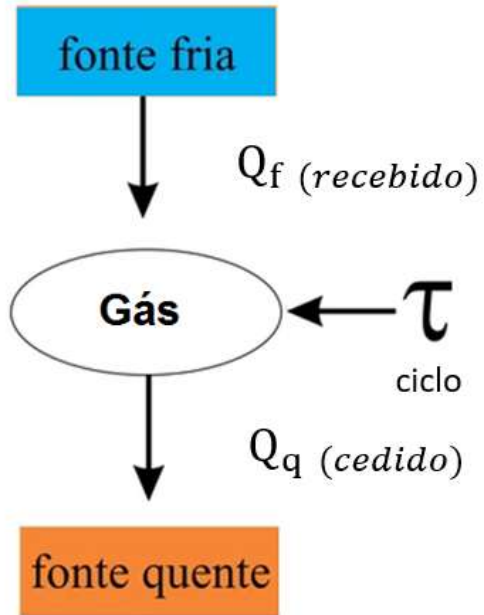
#### 4. Bombas de calor - Aquecedor

Conversão de Energia Mecânica em Energia Térmica



$$|Q_{q(ced)}| = |\tau_{ciclo}| + Q_{f(rec)}$$

#### 4. Aquecedor e refrigerador - detalhamento



**Eficiência térmica**

$$e = \frac{Q_{fria}}{|\tau_{ciclo}|}$$

e pode ser maior do que 1

- $\tau_{ciclo} < 0$  (sentido anti-horário)

$$|Q_{q(ced)}| = |\tau_{ciclo}| + Q_f(rec)$$



## 2ª Lei da Termodinâmica - refrigerador

### Enunciado de Clausius

É impossível a construção de um dispositivo que, por si só, isto é, sem a intervenção do meio externo, consiga transferir calor de um corpo para outro de temperatura mais elevada.

**Interpretação:** não existe um refrigerador que consiga transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente sem a intervenção de um agente externo. No caso de uma geladeira, para que o calor possa ser absorvido da parte interna (fonte fria) e despejado na parte de trás (fonte quente), é preciso que o compressor dessa geladeira realize um trabalho sobre o gás.