

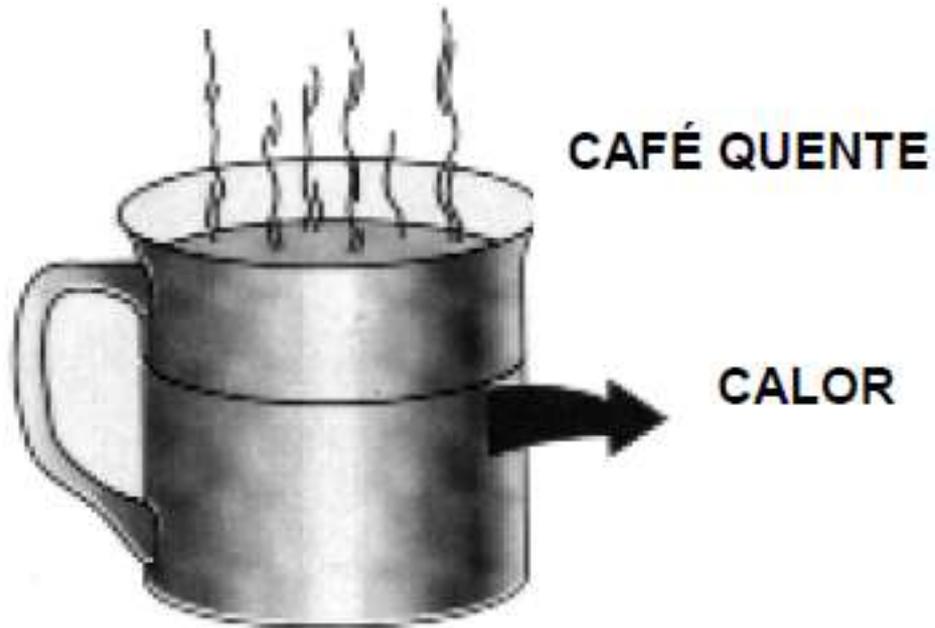
# 5. A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

TERMODINÂMICA APLICADA  
ELIZABETH D'ALMEIDA DUARTE  
2015-2016

# SUMÁRIO

Focámos, nos capítulos anteriores, a nossa atenção na **Primeira Lei da Termodinâmica**, que nos diz que a energia é conservada durante um processo. Neste capítulo abordaremos a **Segunda Lei da Termodinâmica**, que nos diz que um processo ocorre numa certa direção e que a energia tem **quantidade e qualidade**. Um processo não pode ocorrer a não ser que satisfaça a 1ª e a 2ª leis da termodinâmica. Neste capítulo, falaremos dos reservatórios de energia térmica, de processos reversíveis e irreversíveis, motores térmicos, frigoríficos e bombas de calor. Vários **enunciados da segunda lei** serão propostos, seguidos de discussão sobre máquinas de movimento perpétuo e a escala de temperatura absoluta será explicada.

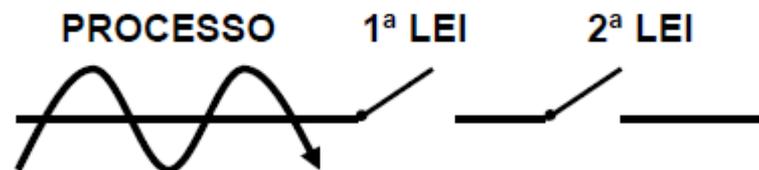
O Ciclo de Carnot será analisado bem como os Princípios de Carnot. Finalmente, serão discutidos os **Ciclos de Carnot Ideais, Frigoríficos e Bombas de Calor**.



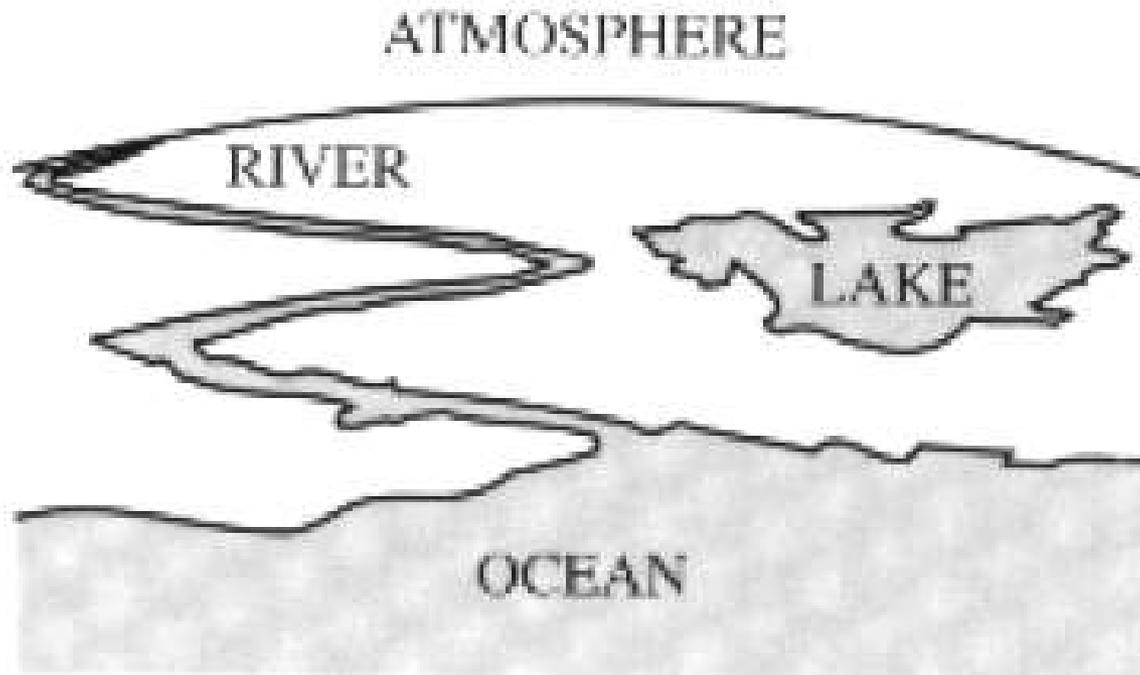
Uma caneca de café quente não fica mais quente se for colocada numa sala fria



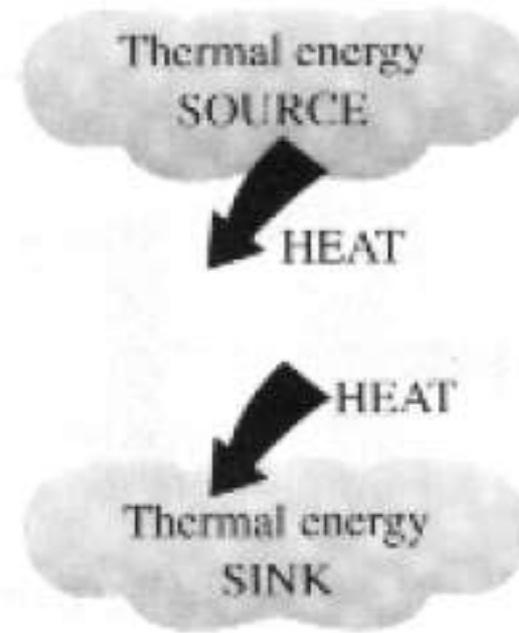
Os processos ocorrem numa determinada direcção e não na inversa



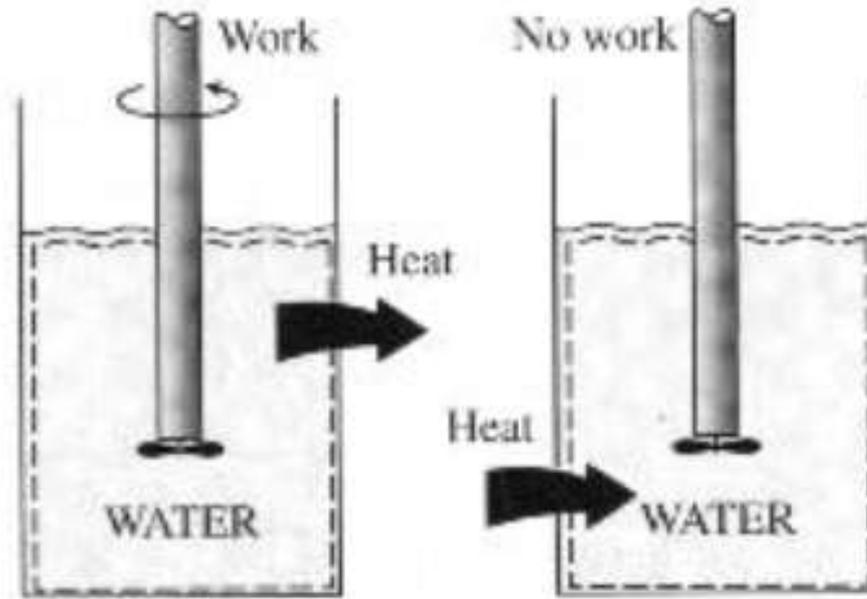
Um processo tem que satisfazer tanto a 1ª Lei como a 2ª Lei da termodinâmica para poder ocorrer



Corpos com massa elevada podem ser considerados como reservatórios de energia térmica

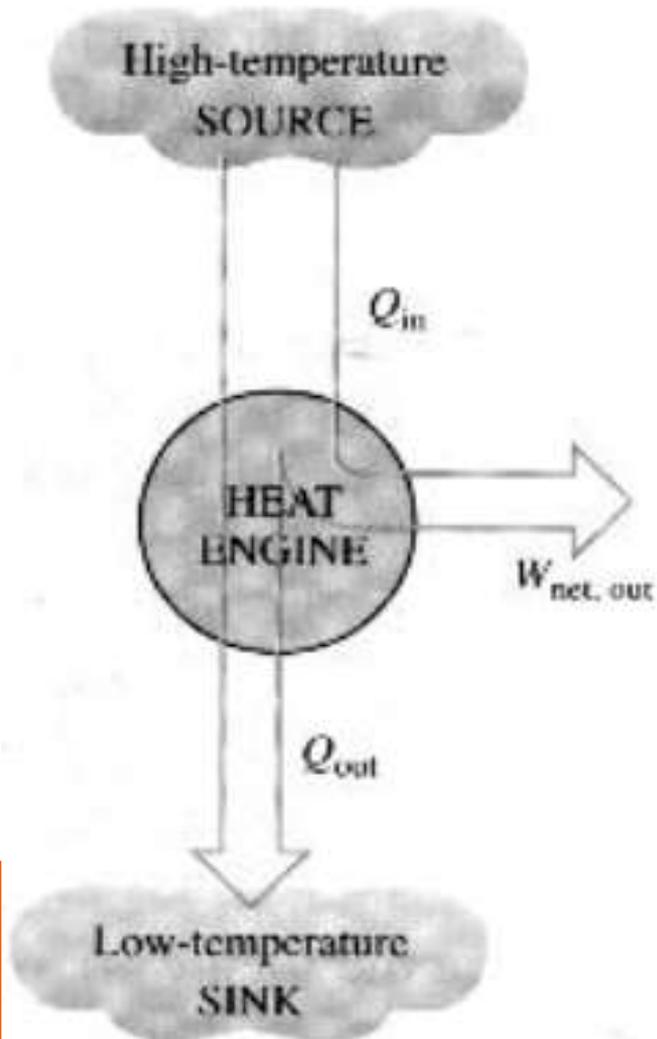


**A fonte fornece energia na forma de calor e o recetor absorve-a.**



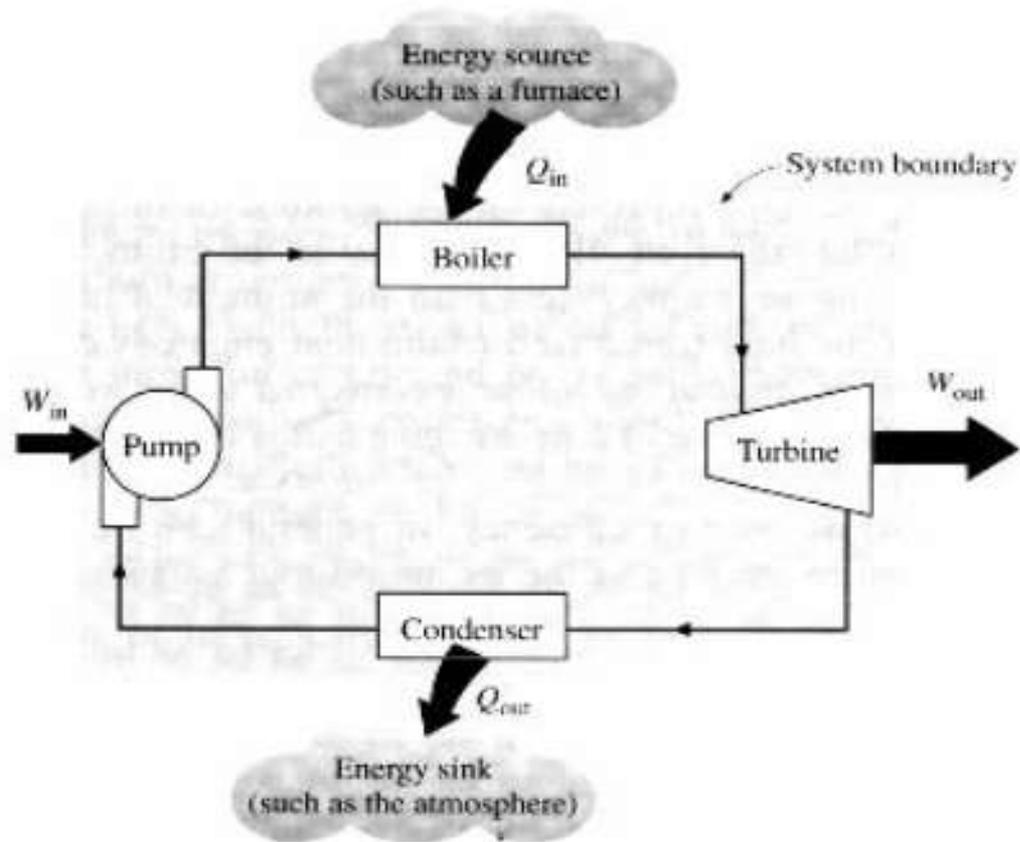
O Trabalho Mecânico pode ser sempre convertido diretamente e na sua totalidade em calor, não se verificando o inverso

# Motores Térmicos



Parte do calor recebido por um motor térmico é convertido em trabalho, enquanto que o restante se perde para o recetor

# Esquema de uma Estação de Vapor



# Estação de Vapor

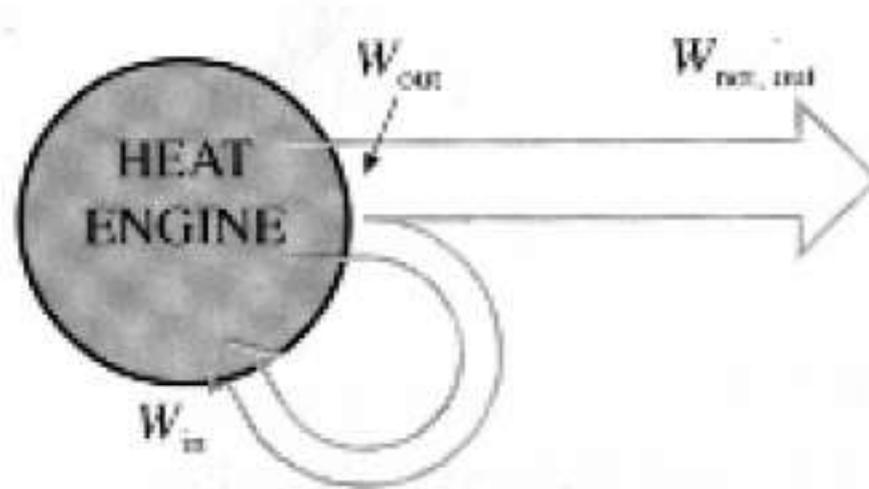
O trabalho líquido realizado numa estação de vapor é :

$$W_{liq,saída} = W_{saída} - W_{entrada} \quad (\text{kJ})$$

Durante um ciclo a variação de energia interna é:  $\Delta U = 0$

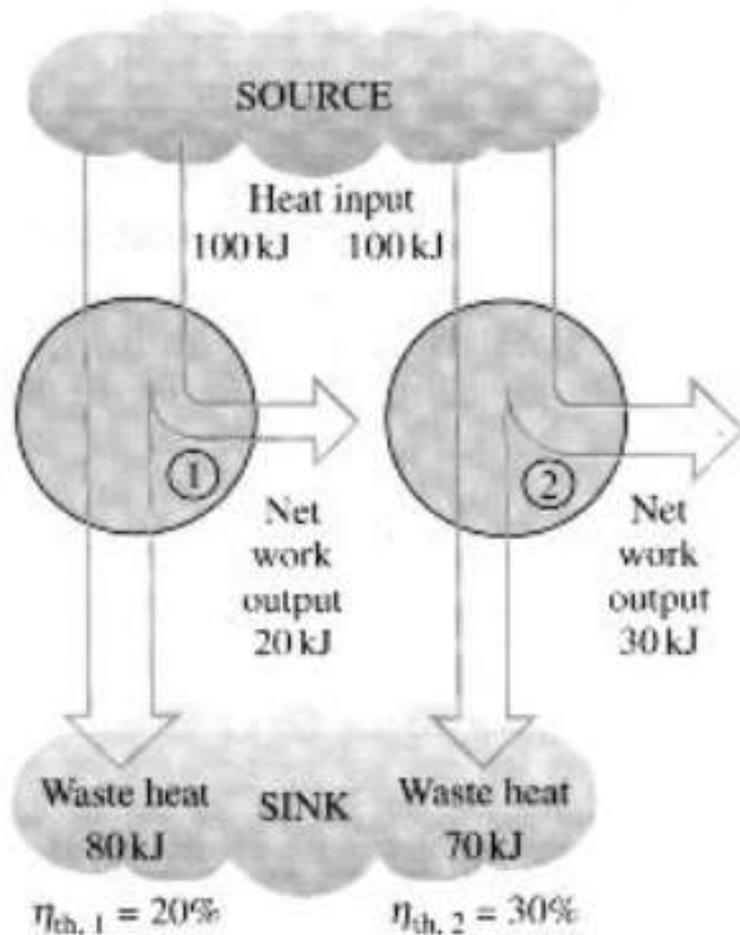
O trabalho líquido de saída de um sistema é igual ao calor líquido transferido para o sistema

$$W_{liq,saída} = Q_{entrada} - Q_{saída} \quad \text{kJ}$$



Parte do trabalho produzido por um motor térmico é consumido internamente para este se manter a operar

# Eficiência Térmica



Alguns motores térmicos são mais eficientes que outros, i.e., transformam mais calor em trabalho



A definição de eficiência não é limitada apenas à Termodinâmica

# Eficiência Térmica de um Motor Térmico

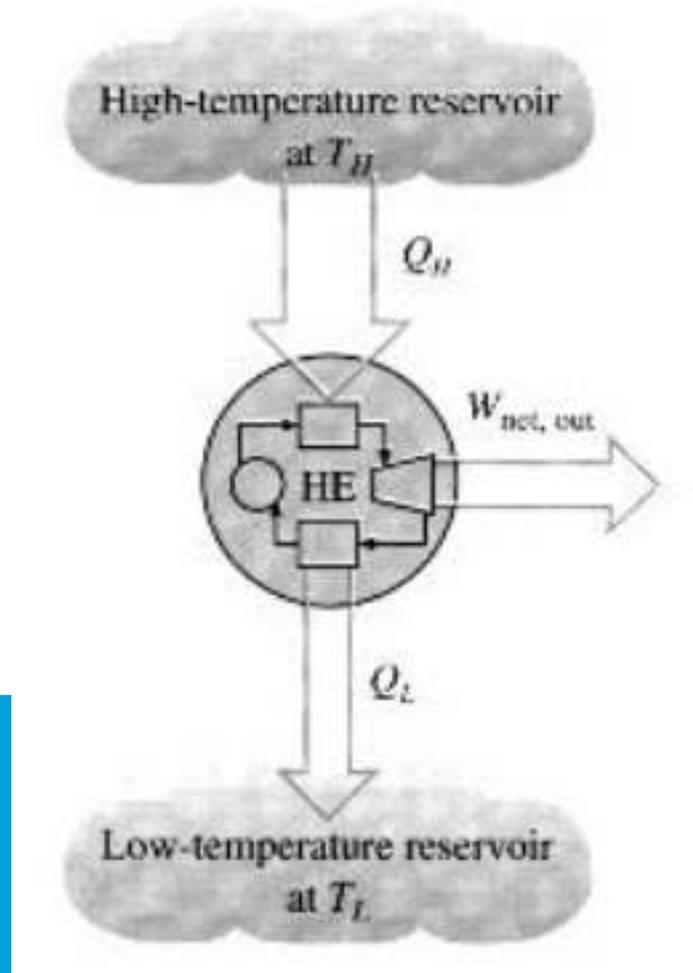
$$\text{Eficiência Térmica} = \frac{\textit{Trabalho}_{\textit{Líquido}}}{\textit{Calor}_{\textit{Fornecido}}}$$

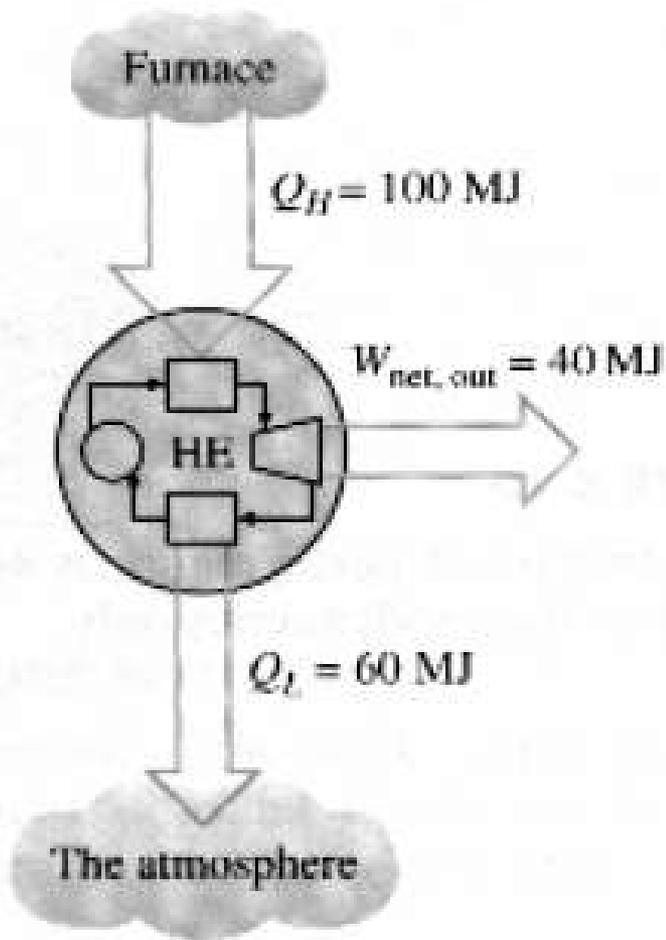
$$\eta_{th} = \frac{W_{liq,saída}}{Q_{entrada}}$$

# ESQUEMA DE UM MOTOR TÉRMICO

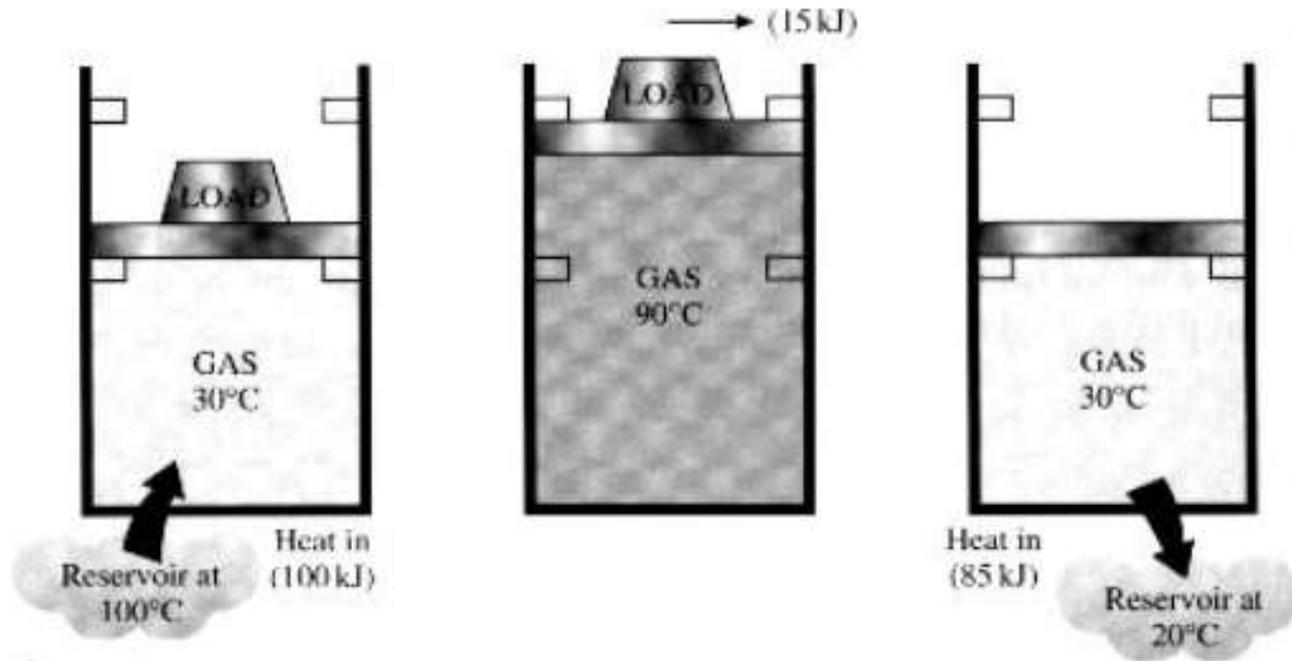
## Eficiência Térmica

$$\eta_{th} = \frac{W_{liq,saída}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$





Mesmo os motores térmicos mais eficientes perdem grande parte do calor que recebem



Um ciclo de um motor térmico não pode ser completo sem ser rejeitado calor para o recetor que se encontra a temperatura mais baixa

# Enunciado de Kelvin-Planck

## 2ª Lei da Termodinâmica

Nenhum Motor Térmico pode converter todo o Calor que recebe em Trabalho Útil

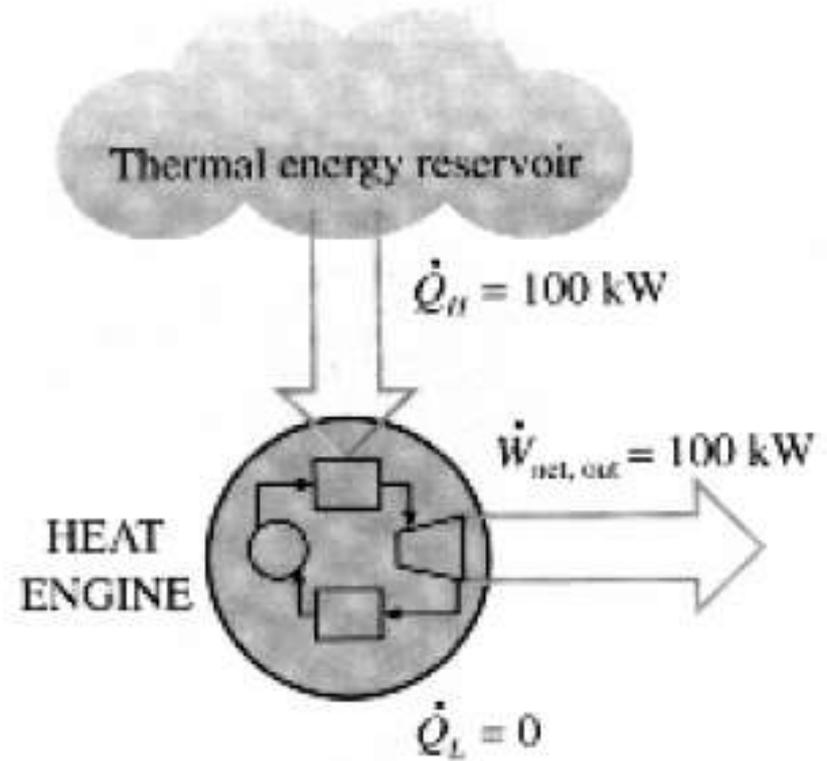
ou

*É impossível para qualquer equipamento que opere num Ciclo receber calor de um único reservatório e produzir trabalho útil.*

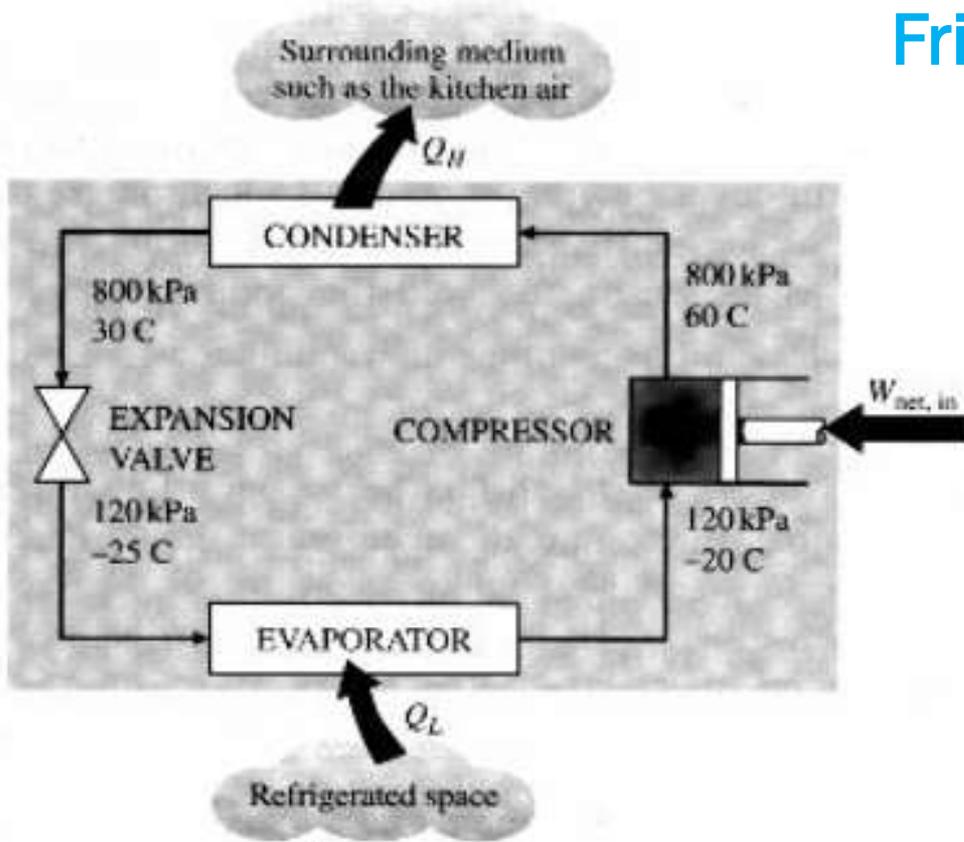
ou

*Nenhum Motor Térmico pode ter uma eficiência térmica de 100%*

Um motor térmico que não  
respeita o postulado de Kelvin  
Planck da 2ª Lei da  
Termodinâmica

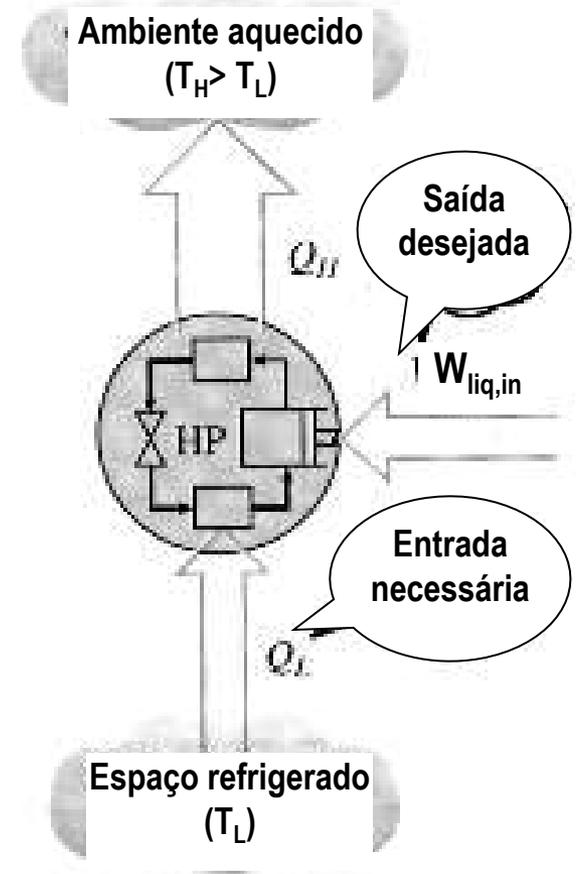


# Frigoríficos e Bombas de Calor



Componentes básicos de um ciclo de refrigeração e as suas condições típicas de operacionalidade

O objetivo de um refrigerador é remover calor  $Q$  de espaços arrefecidos



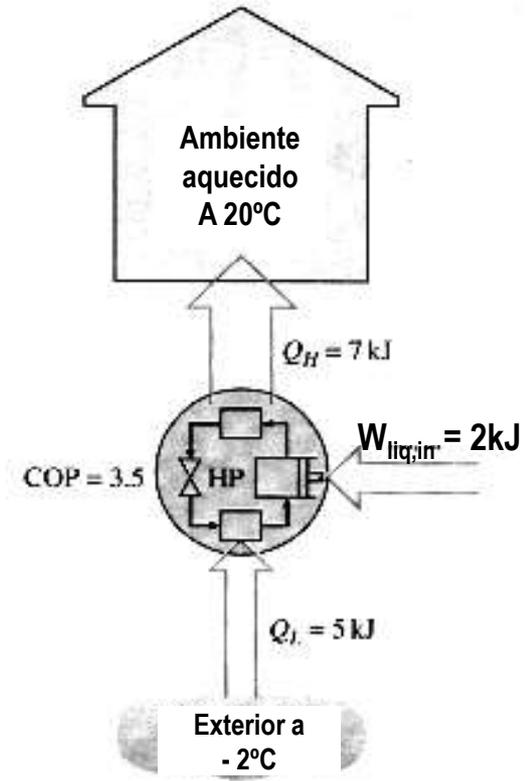
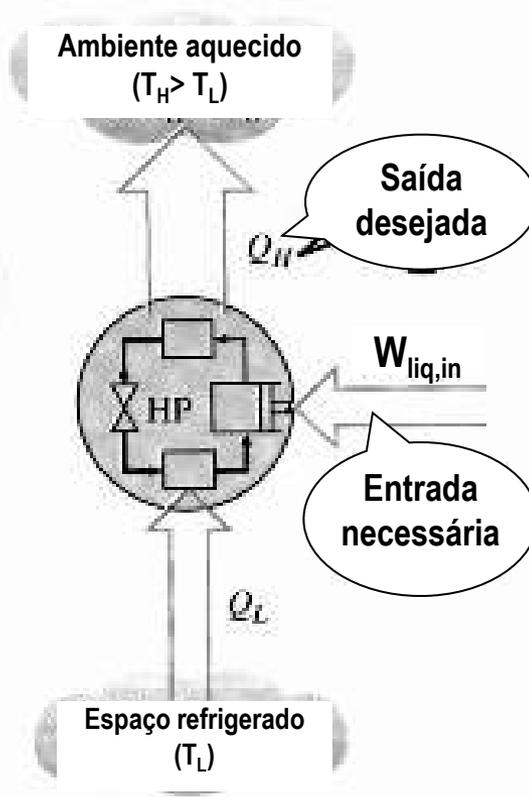
# Coeficiente de Performance de um Refrigerador

A eficiência de um refrigerador é expressa em termos de coeficiente de performance ( $COP_R$ )

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{liq, entrada}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

Nota: a  $COP_R$  pode ser maior do que 1 a quantidade de calor removida do espaço a remover pode ser superior à quantidade de trabalho útil fornecido.

# Bombas de Calor





**Quando instalado ao contrário,  
um ar condicionado funciona  
como uma bomba de calor**

# Coeficiente de Performance de uma Bomba de Calor

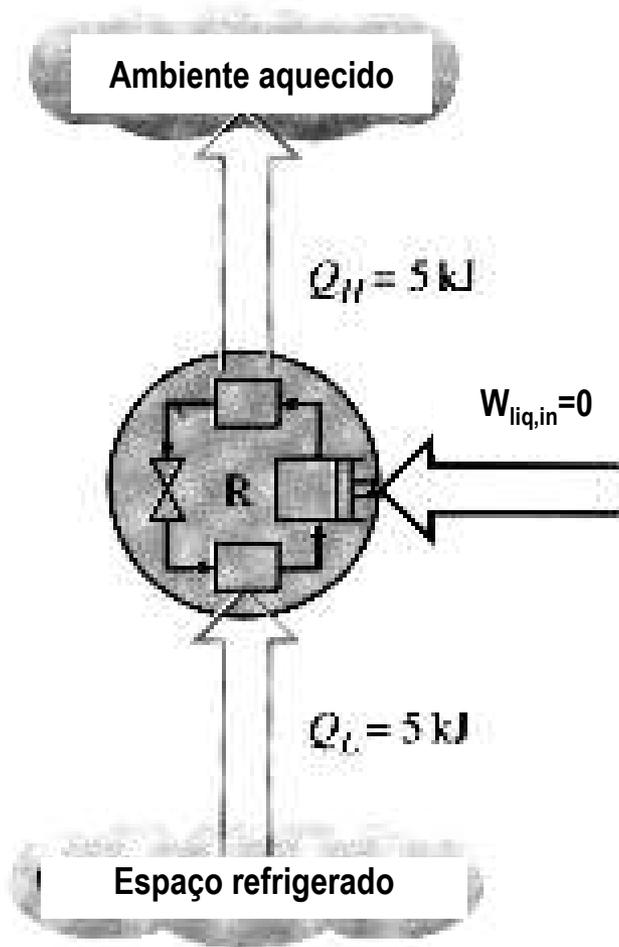
O coeficiente de performance de uma Bomba de Calor ( $COP_{HP}$ ) é dado por:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{liq,entrada}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

# Enunciado de Clausius – 2ª Lei da Termodinâmica

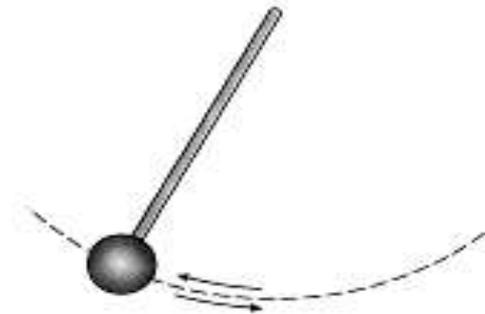
O Enunciado de Clausius está relacionado com os Frigoríficos e Bombas de Calor e diz que:

*É impossível construir um equipamento que opere num ciclo e produza não efeito para além de transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente*

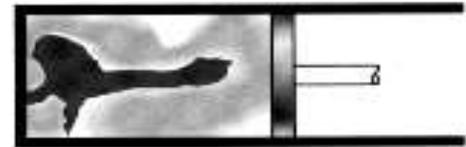


**Um refrigerador que viola o enunciado de Clausius da 2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica**

# PROCESSOS REVERSÍVEIS E IRREVERSÍVEIS



(a) Pêndulo



(b) Expansão e compressão de um gás *quasi-equilibrium*

Dois processos reversíveis e irreversíveis

# CICLO DE CARNOT

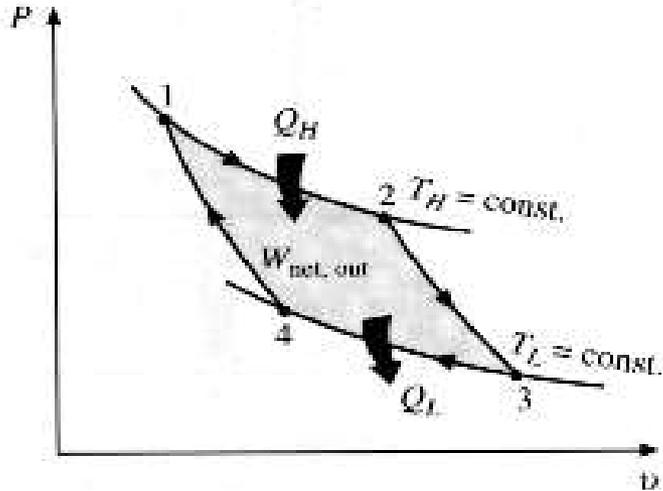
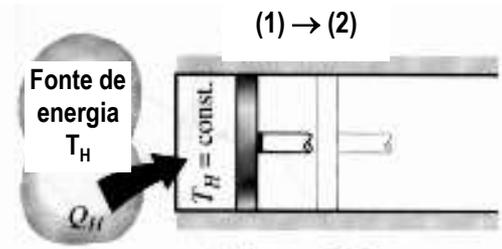
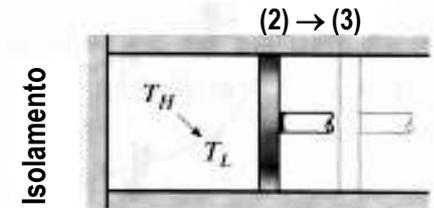


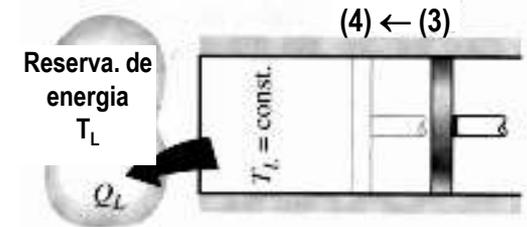
Diagrama P-v para o Ciclo de Carnot



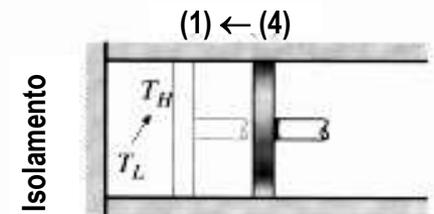
(a) Processo 1-2



(b) Processo 2-3



(c) Processo 3-4



(d) Processo 4-1

# Ciclo de Carnot

Os quatro processos reversíveis que constituem o Ciclo de Carnot são os seguintes:

Expansão isotérmica reversível (1-2)  $T_H = \text{constante}$

Expansão reversível adiabática (2-3), a temperatura desce de  $T_H$  para  $T_L$

Compressão isotérmica reversível (3-4)  $T_L = \text{constante}$

Compressão adiabática reversível (4-1) a temperatura aumenta de  $T_L$  para  $T_H$

# CICLO DE CARNOT INVERTIDO

O diagrama P-v do Ciclo de Carnot Invertido é o mesmo que o do Ciclo de Carnot, excepto que as direcções dos processos são invertidas.

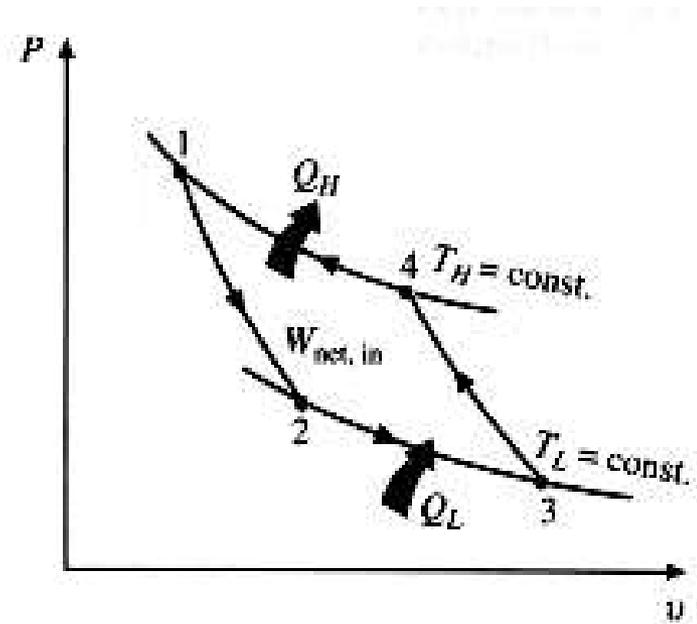
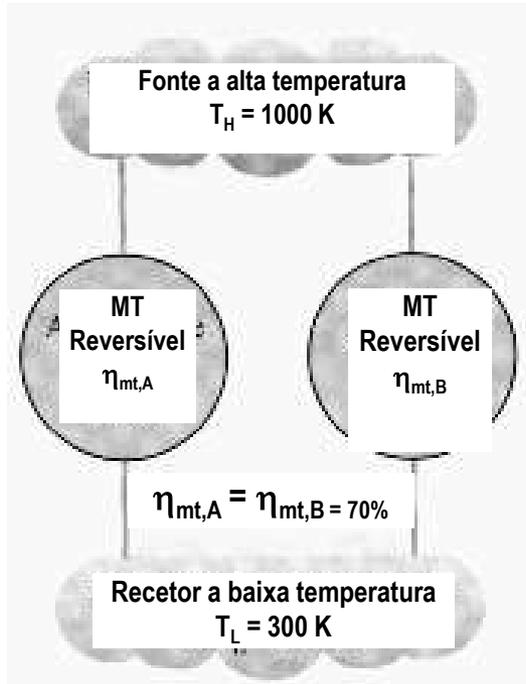


Diagrama P-v para o Ciclo de Carnot invertido

# PRINCÍPIOS DE CARNOT

1. A eficiência de um motor térmico irreversível é sempre menor que a eficiência de um reversível operando entre os dois mesmos reservatórios.
2. As eficiências de todos os motores térmicos reversíveis, operando entre os mesmos dois reservatórios são as mesmas.

# ESCALA DE TEMPERATURA TERMODINÂMICA



Todos os motores térmicos que operam entre dois reservatórios têm a mesma eficiência (2º Princípio de Carnot)

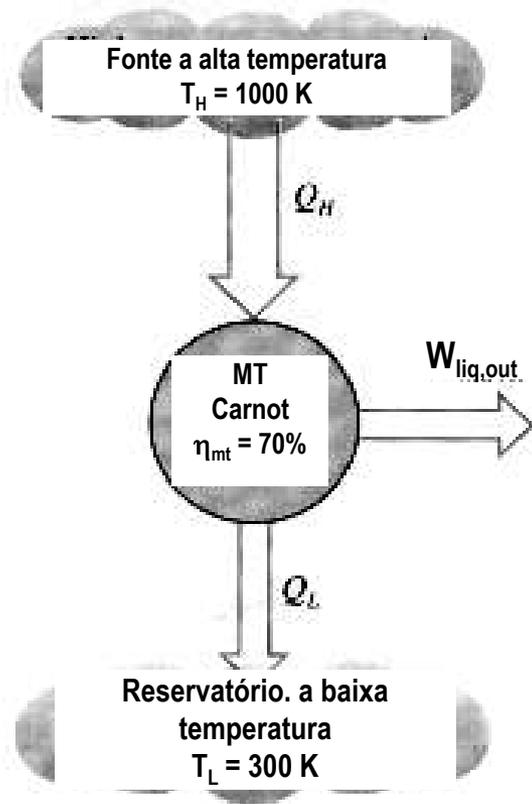
# O MOTOR TÉRMICO DE CARNOT

A eficiência térmica de qualquer motor térmico, reversível ou irreversível é dado por:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

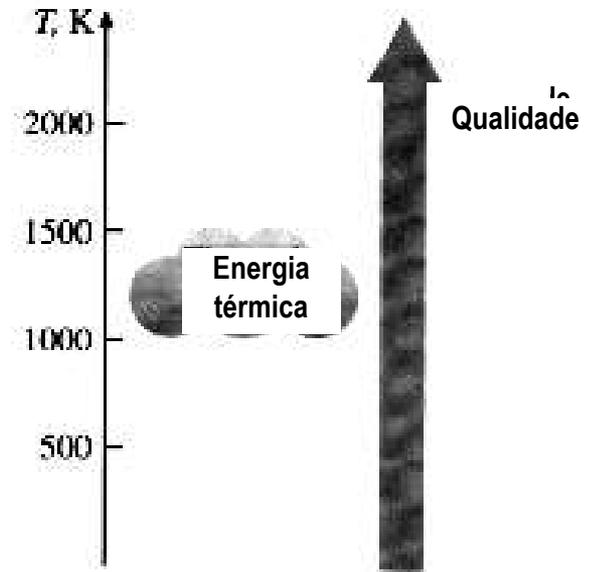
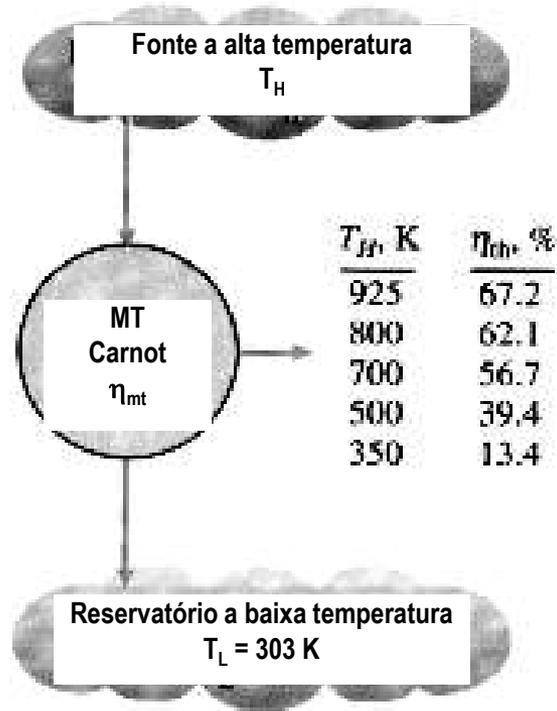
Para motores térmicos reversíveis a razão entre os calores pode ser substituída pela razão entre as temperaturas absolutas dos dois reservatórios. A eficiência de um motor de Carnot reversível pode ser expresso:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



O motor térmico de Carnot é o mais eficiente de todos os motores térmicos operando entre os mesmos reservatórios de altas e baixas temperaturas

# A QUALIDADE DA ENERGIA



Quanto maior a temperatura da energia térmica, maior é a sua qualidade

A fração de calor que pode ser convertido em calor em função da temperatura da fonte (para  $T = 303 K$ )

# CICLO DE REFRIGERAÇÃO DE CARNOT E BOMBAS DE CALOR

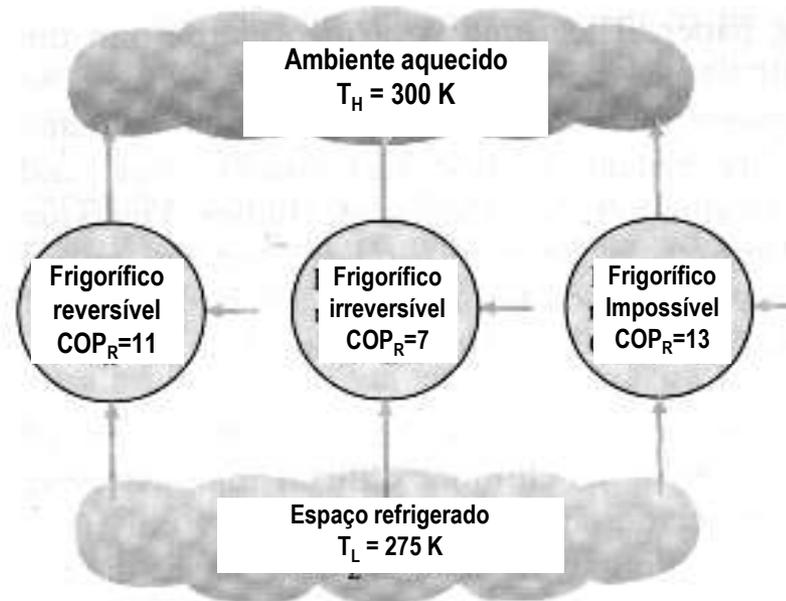
Um frigorífico ou uma bomba de calor operam de acordo com um ciclo de Carnot invertido e são designados por frigorífico de Carnot ou bomba de calor de Carnot. O coeficiente de performance de um frigorífico ou de uma bomba de calor, reversível ou irreversível, é dado por:

$$COP_R = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{e} \quad COP_{HP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

A COP para os frigoríficos e bombas de calor reversíveis é:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad \text{e} \quad COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

# CICLO DE REFRIGERAÇÃO DE CARNOT E BOMBAS DE CALOR



Nenhum refrigerador consegue alcançar maiores coeficientes de performance que um refrigerador reversível operando dentro dos mesmos limites de temperatura

# RESUMO

A 2ª lei da termodinâmica diz-nos que um processo ocorre numa certa direcção, não em qualquer direcção.

Um processo só ocorrerá se satisfizer a 1ª e a 2ª lei da termodinâmica. Corpos que possam absorver ou rejeitar quantidades finitas de calor isotermicamente são designados por reservatórios de energia térmica, ou simplesmente reservatórios térmicos.

O trabalho pode ser convertido directamente em calor, mas calor só pode ser convertido em trabalho através de certos equipamentos designados por motores térmicos. A eficiência térmica de um motor térmico é definida por:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

onde  $Q_{net,out}$  é a quantidade de trabalho líquido à saída do motor térmico,  $Q_H$  é a quantidade de calor fornecido ao motor, e  $Q_L$  é a quantidade de calor rejeitado pelo motor.

## RESUMO (CONT.)

Frigoríficos e bombas de calor são equipamento que absorvem calor de um meio a baixa temperatura e rejeitam para um meio a alta temperatura. A performance de um frigorífico ou de uma bomba de calor é expresso por:

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1}$$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H}$$

O enunciado de Kelvin-Planck da 2ª lei da termodinâmica diz-nos que um motor térmico não pode produzir uma quantidade líquida de trabalho enquanto troca calor com um único reservatório.

## RESUMO (CONT.)

O enunciado de Clausius da 2ª lei da termodinâmica, diz-nos que nenhum equipamento pode transferir calor de uma fonte mais fria para uma fonte mais quente sem produzir efeitos nos arredores.

Qualquer equipamento que viole a 1ª ou a 2ª lei da termodinâmica é designada por máquina de movimento perpétuo.

Um processo diz-se reversível se ambos o sistema e os arredores podem restabelecer as suas condições originais. Qualquer outro processo é irreversível. Os efeitos da fricção, expansão ou compressão de não quase equilíbrio e a transferência de calor através de uma diferença de temperatura, conduzem a um processo irreversível e são chamadas irreversibilidades.

## RESUMO (CONT.)

O ciclo de Carnot é um ciclo reversível que é composto de quatro processos reversíveis dois isotérmicos e dois adiabáticos. Os princípios de Carnot estabelecem que as eficiências térmicas de todos os motores reversíveis operando entre os mesmos reservatórios são as mesmas; e que nenhum motor térmico é mais eficiente que um reversível operando entre os mesmos dois reservatórios. Este enunciado estabelece a escala termodinâmica de temperaturas também designada por escala de Kelvin, que relaciona as transferências de calor entre um equipamento reversível e os reservatórios a alta e a baixa temperatura por:

$$\left( \frac{Q_H}{Q_L} \right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L}$$

# RESUMO (CONT.)

Portanto, a razão  $Q_H/Q_L$  pode ser substituída por  $T_H/T_L$  para equipamentos reversíveis onde  $T_H$  e  $T_L$  são as temperaturas absolutas dos reservatórios a alta e a baixa temperatura, respectivamente.

Um motor térmico que opera num ciclo de Carnot reversível é designado por motor térmico de Carnot. A eficiência térmica de um motor térmico de Carnot, bem como todos os outros motores térmicos reversíveis é dada por:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

# RESUMO (CONT.)

Esta é a eficiência máxima de um motor térmico operando entre dois reservatórios à temperatura  $T_H$  e  $T_L$ .

Os COP's (coeficientes de performance) do frigorífico e bomba de calor são dados por:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{T_H / T_L - 1}$$

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - T_L / T_H}$$

Estes são os COP's mais elevados de um frigorífico e bombas de calor podem ter operando entre as temperaturas limites de  $T_H$  e  $T_L$ .