

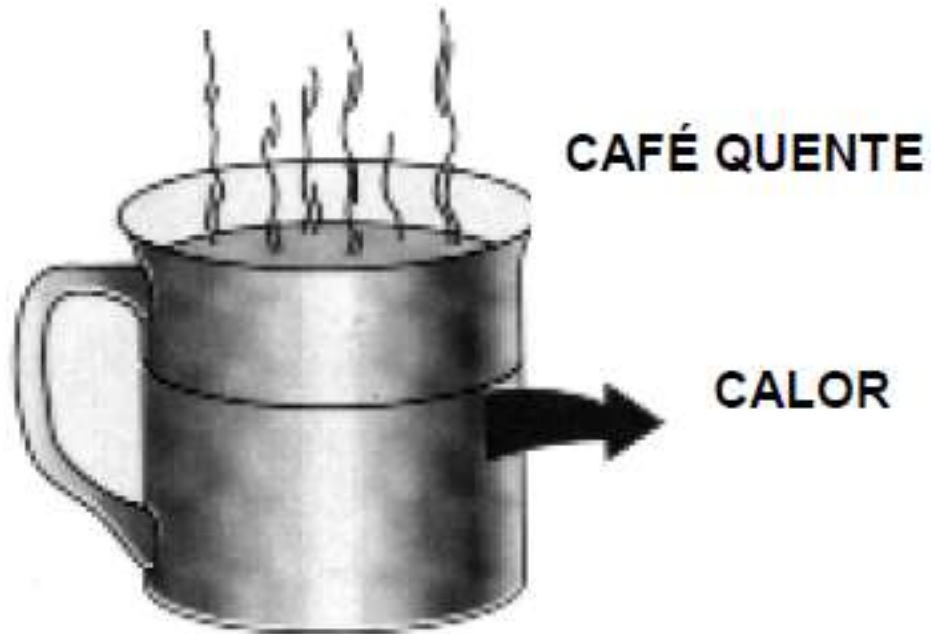
5. A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

TERMODINÂMICA APLICADA
ELIZABETH D'ALMEIDA DUARTE
2015-2016

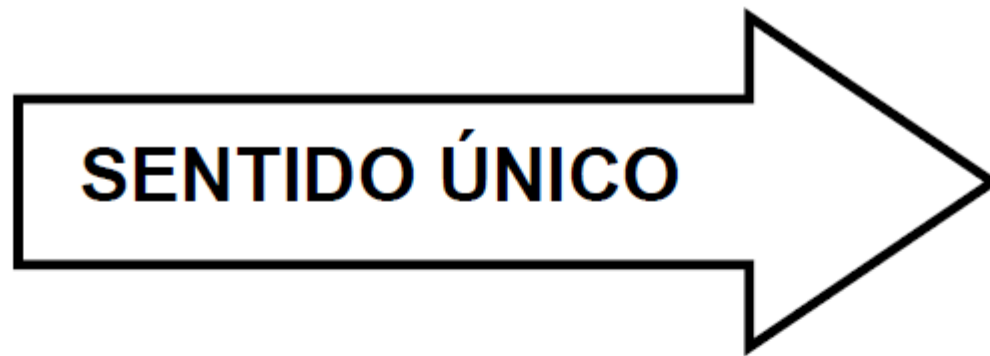
SUMÁRIO

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.

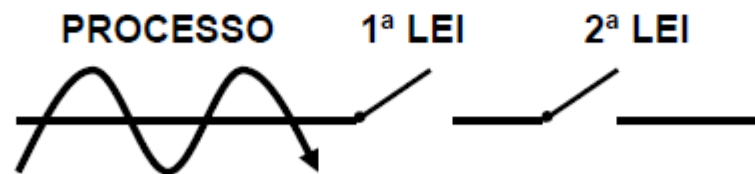
O Ciclo de Carnot será analisado bem como os Princípios de Carnot. Finalmente, serão discutidos os **Ciclos de Carnot Ideais, Frigoríficos e Bombas de Calor**.



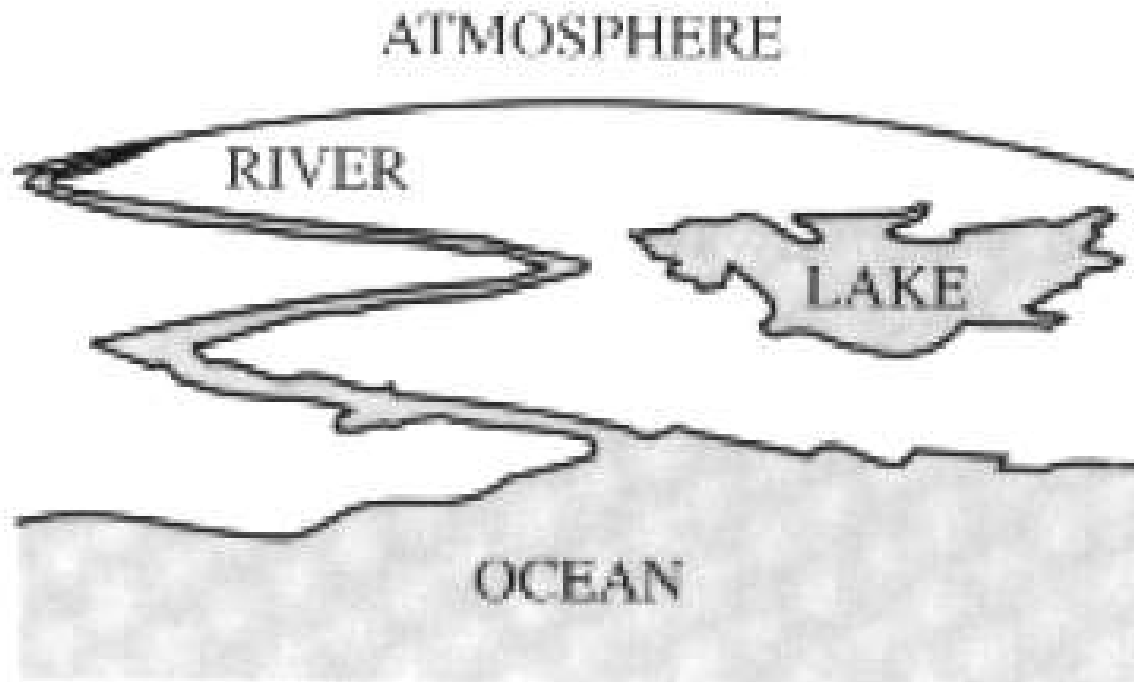
Uma caneca de café quente não fica mais quente se for colocada numa sala fria



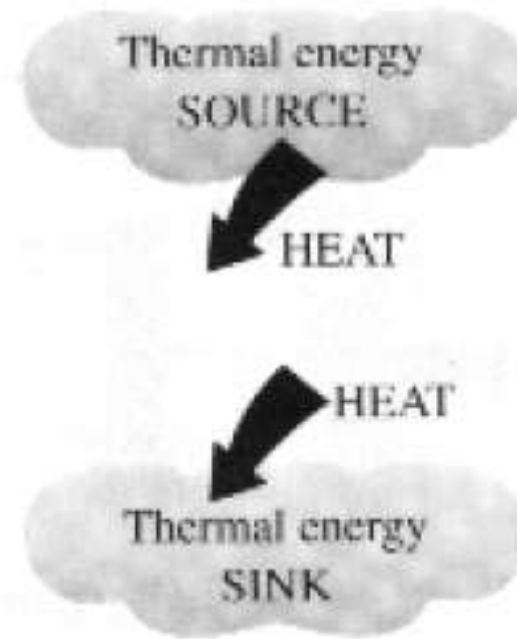
Os processos ocorrem numa determinada direcção e não na inversa



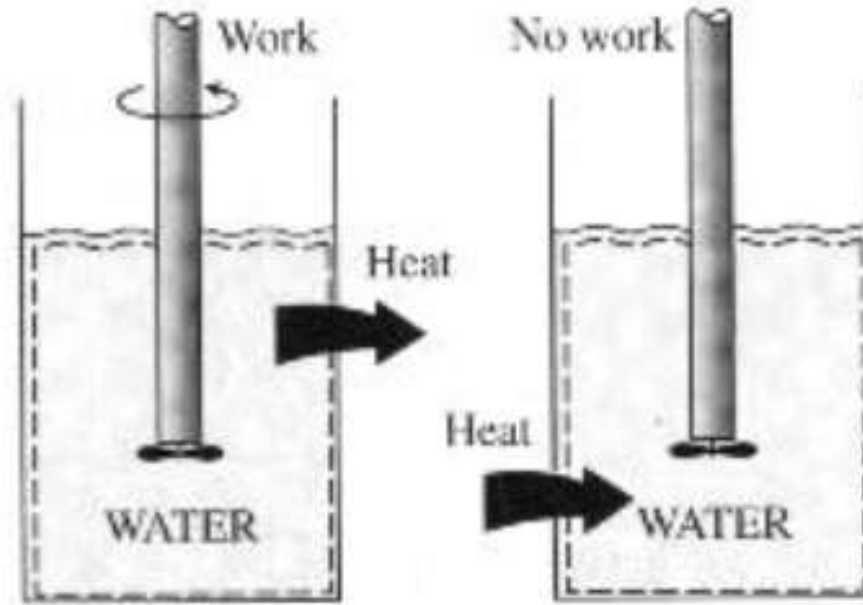
Um processo tem que satisfazer tanto a 1ª Lei como a 2ª Lei da termodinâmica para poder ocorrer



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

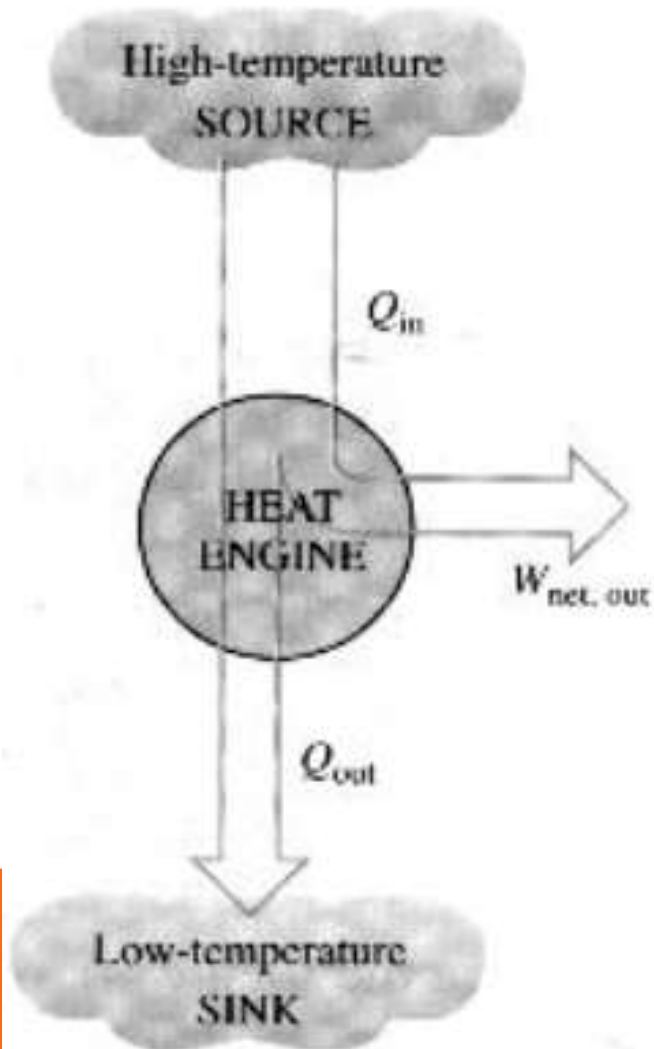


A fonte fornece energia na forma de calor e o recetor absorve-a.



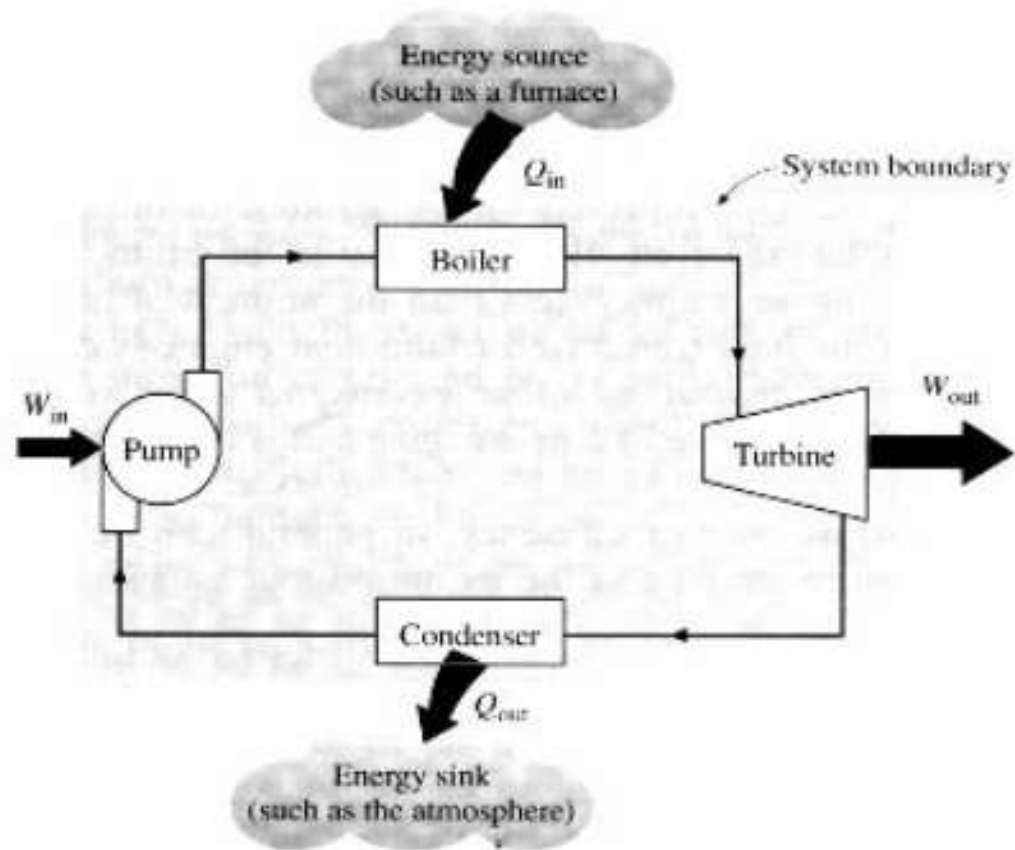
O Trabalho Mecânico pode ser sempre convertido diretamente e na sua totalidade em calor, não se verificando o inverso

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

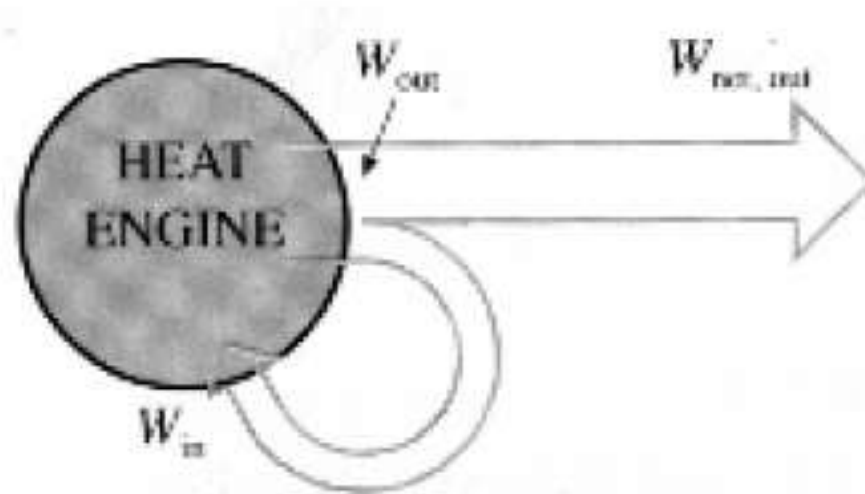
O trabalho líquido realizado numa estação de vapor é :

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

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

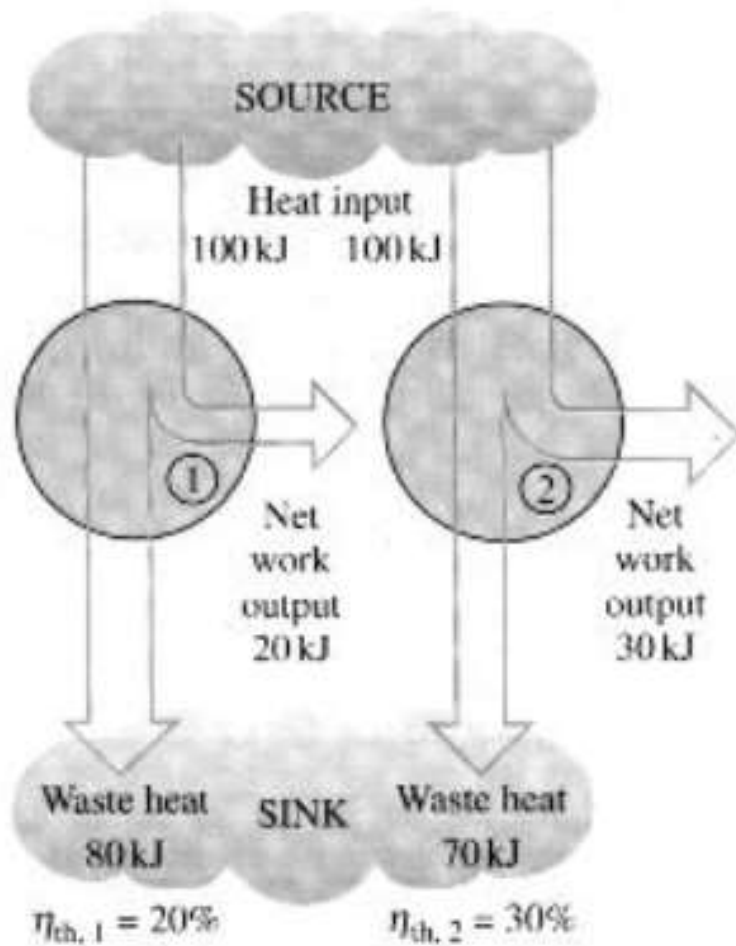
O trabalho líquido de saída de um sistema é igual ao calor líquido transferido para o sistema

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



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

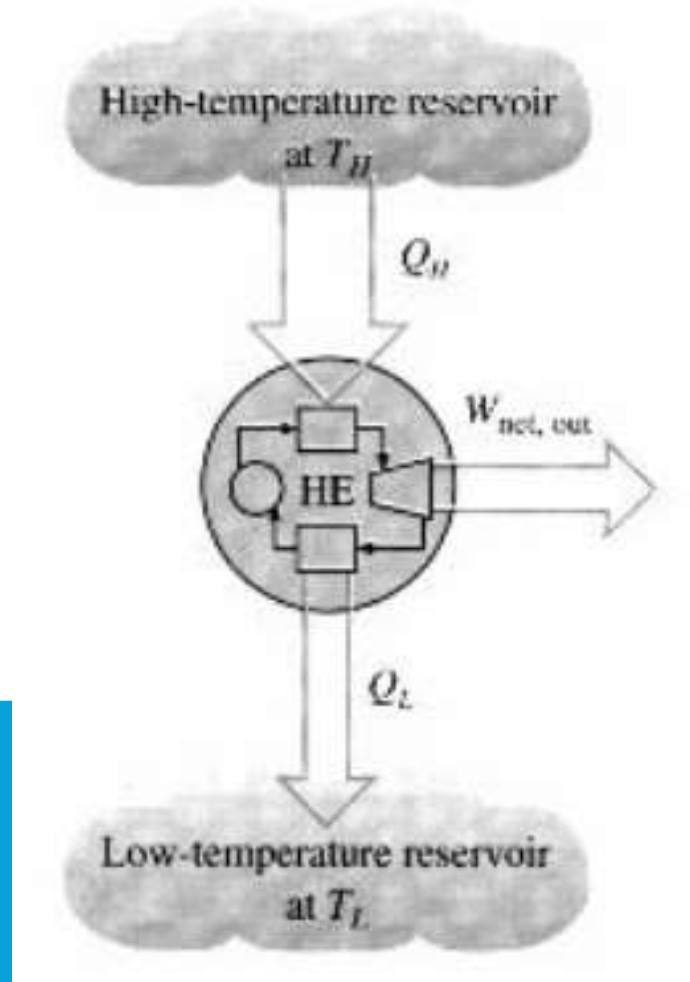
$$\text{Eficiência Térmica} = \frac{\textit{Trabalho}_{\textit{Líquido}}}{\textit{Calor}_{\textit{Fornecido}}}$$

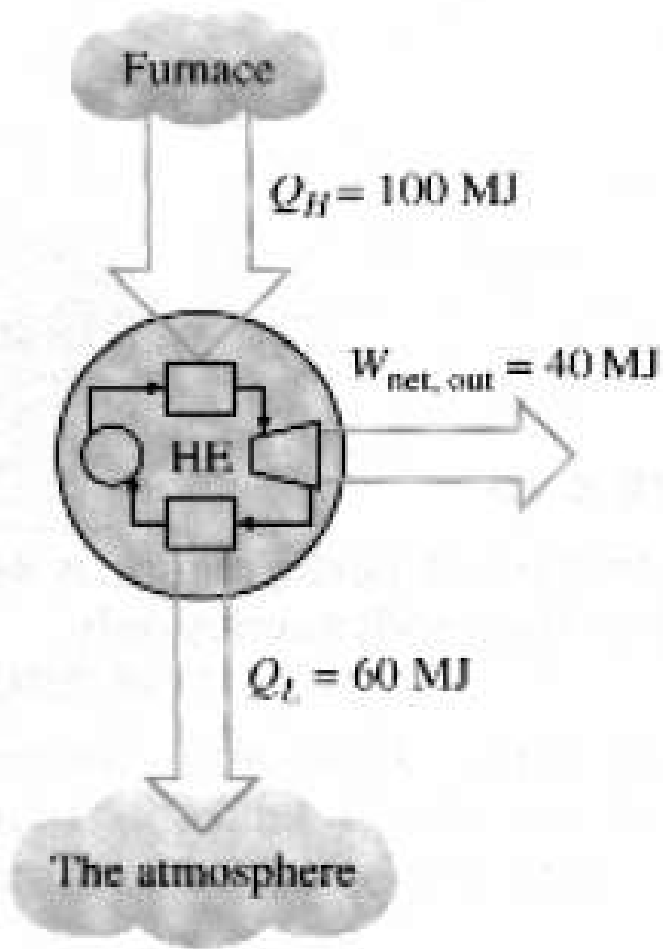
$$\eta_{th} = \frac{W_{liq,saída}}{Q_{entrada}}$$

ESQUEMA DE UM MOTOR TÉRMICO

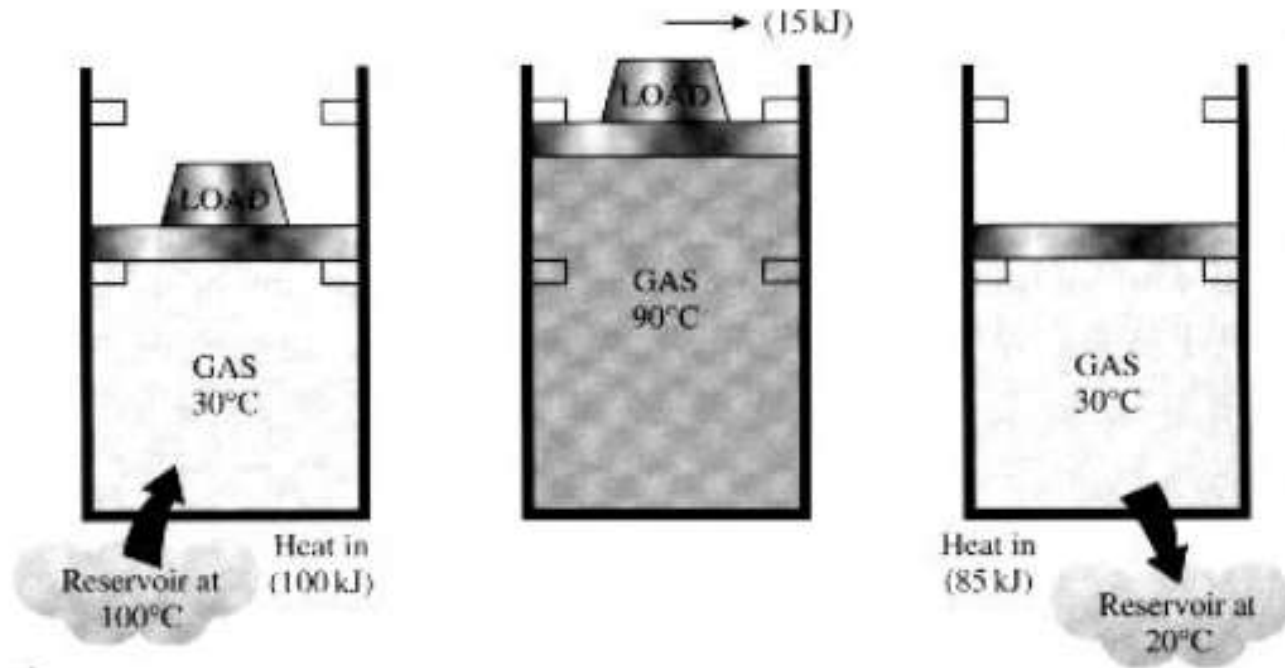
Eficiência Térmica

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





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

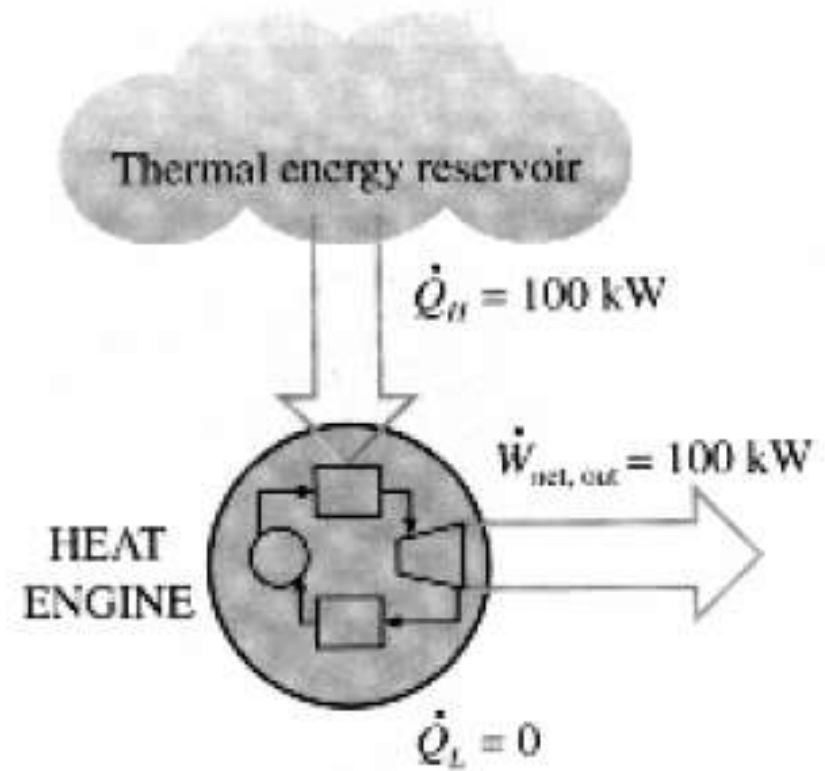
ou

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

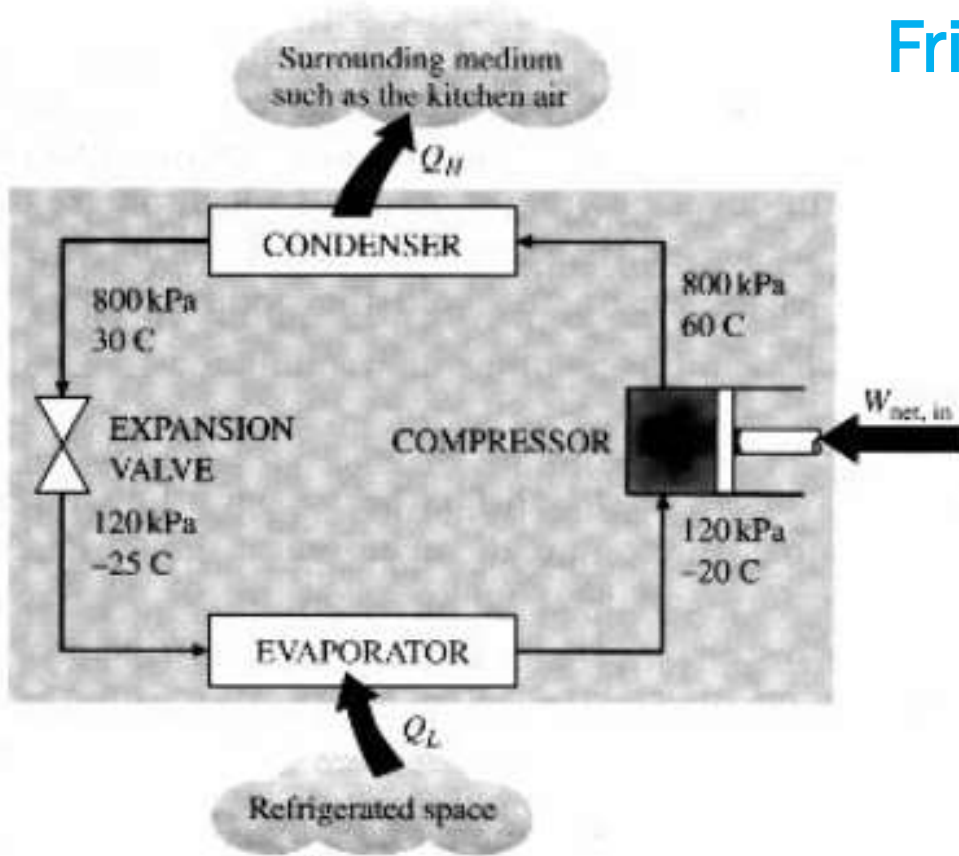
ou

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

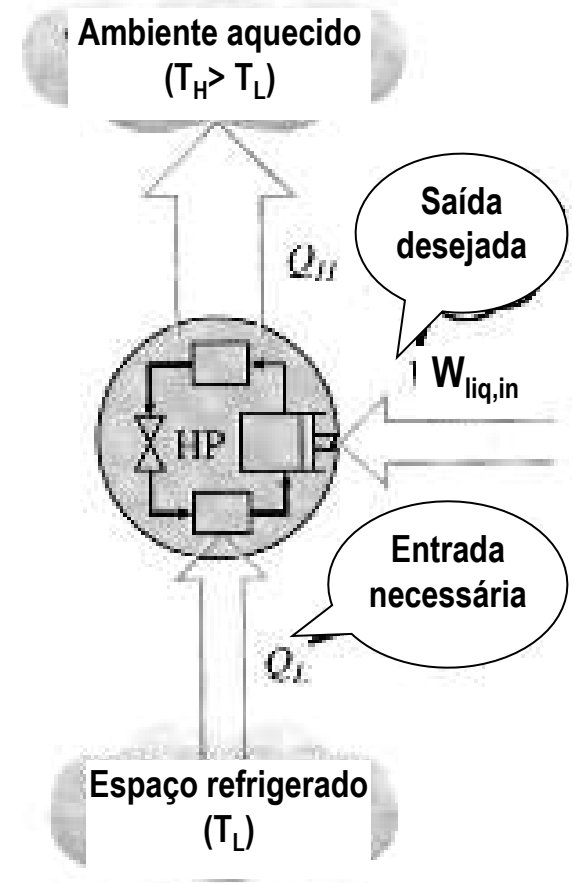


Frigoríficos e Bombas de Calor



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



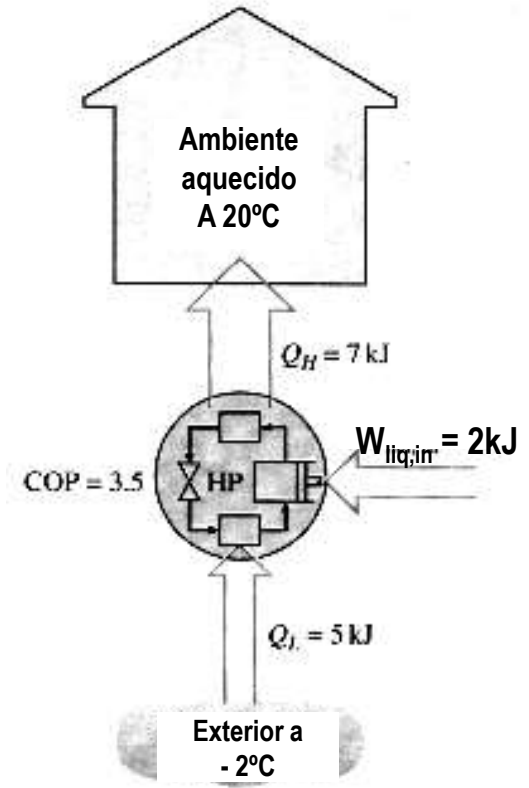
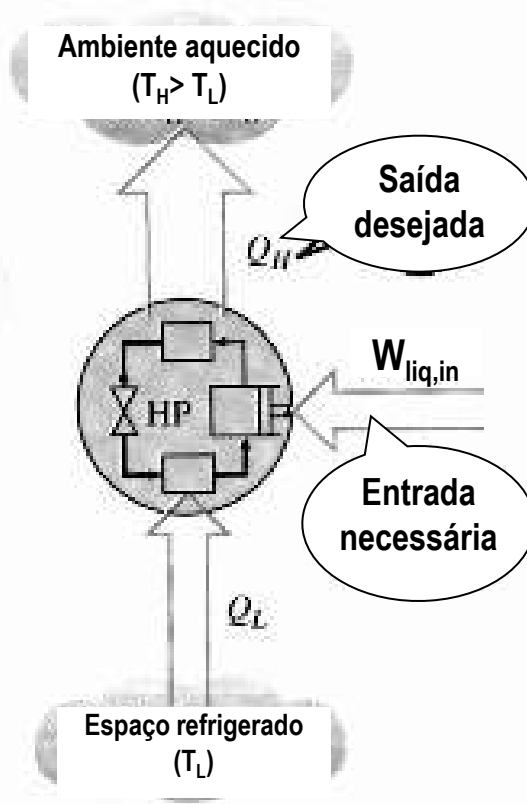
Coeficiente de Performance de um Refrigerador

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

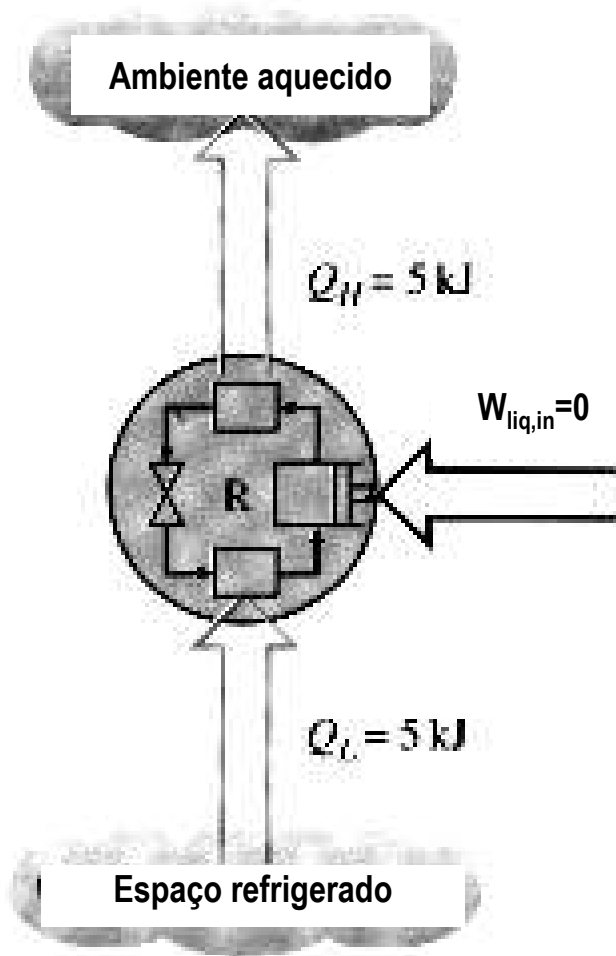
O coeficiente de performance de uma Bomba de Calor (COP_{HP}) é dado por:

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

Enunciado de Clausius – 2ª Lei da Termodinâmica

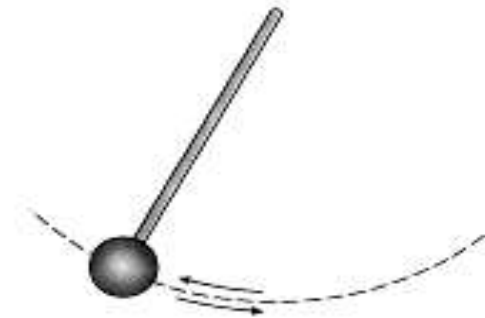
O Enunciado de Clausius está relacionado com os Frigoríficos e Bombas de Calor e diz que:

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^a 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

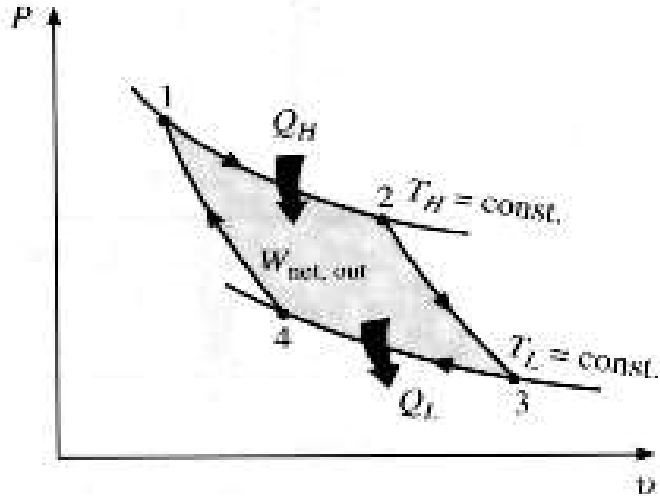
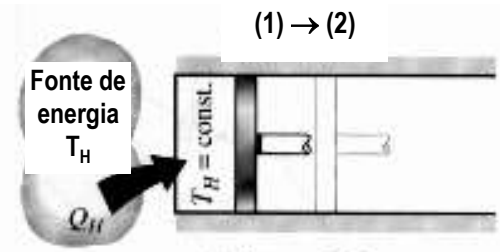
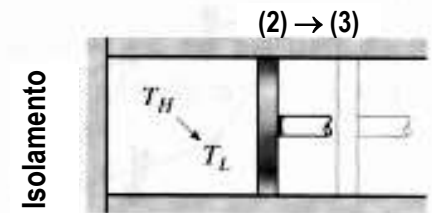


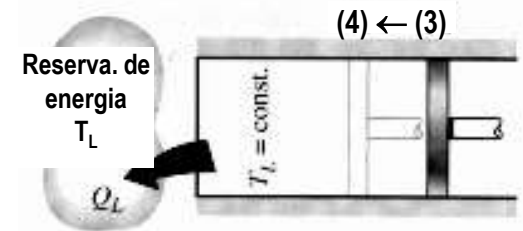
Diagrama P-v para o Ciclo de Carnot



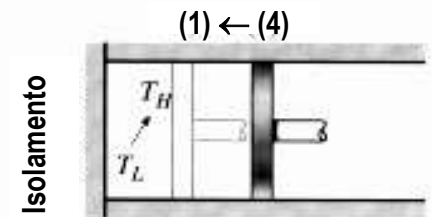
(a) Processo 1-2



(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.

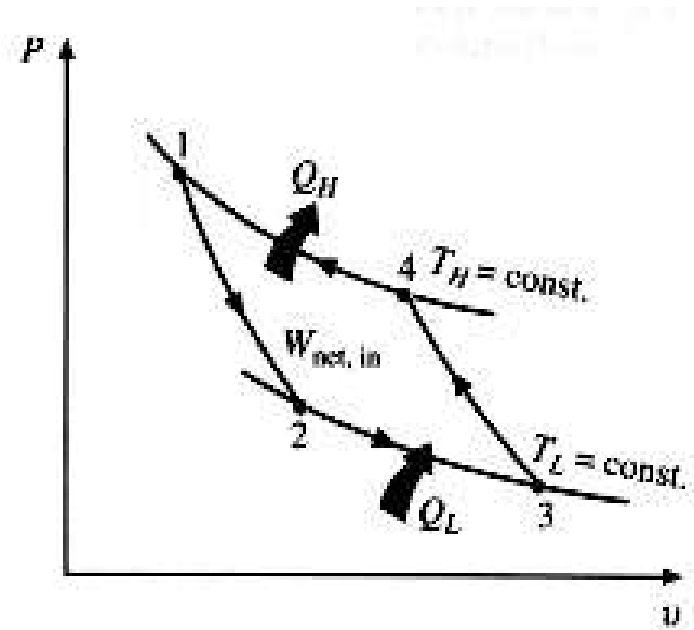
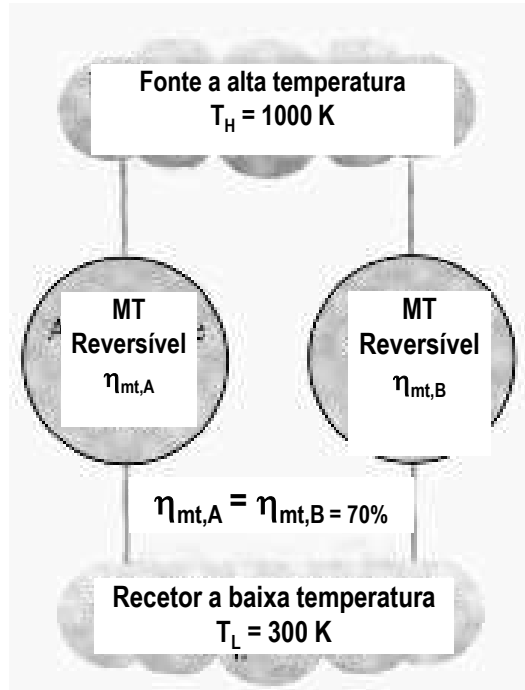


Diagrama P-v para o Ciclo de Carnot invertido

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)

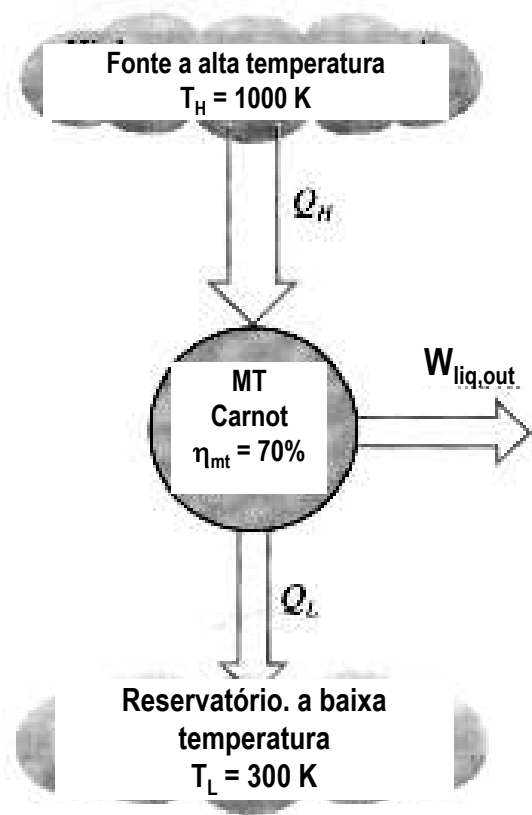
O MOTOR TÉRMICO DE CARNOT

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

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

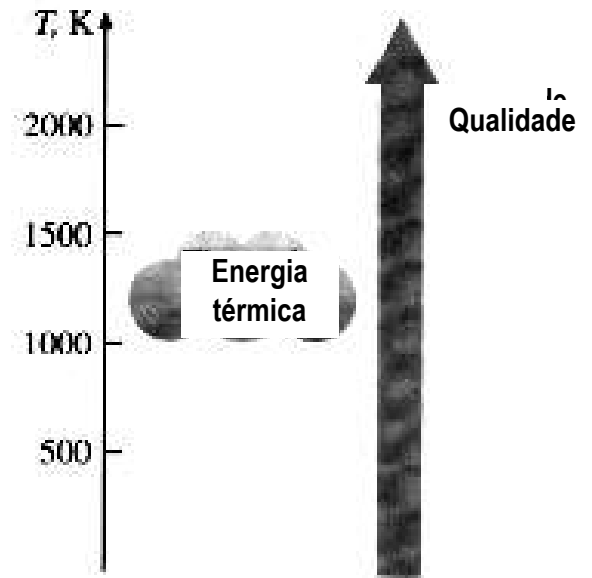
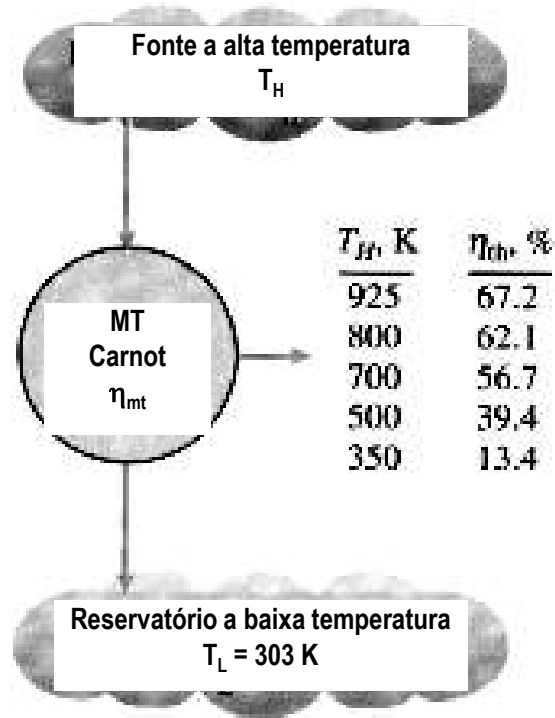
Para motores térmicos reversíveis a razão entre os calores pode ser substituída pela razão entre as temperaturas absolutas dos dois reservatórios. A eficiência de um motor de Carnot reversível pode ser expresso:

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



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

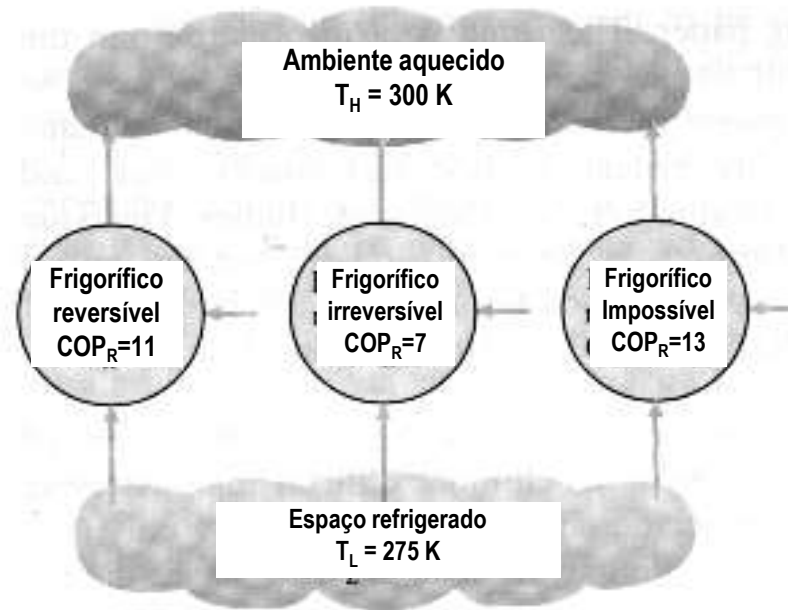
Um frigorífico ou uma bomba de calor operam de acordo com um ciclo de Carnot invertido e são designados por frigorífico de Carnot ou bomba de calor de Carnot. O coeficiente de performance de um frigorífico ou de uma bomba de calor, reversível ou irreversível, é dado por:

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

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 .