

MÁQUINAS TÉRMICAS

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica: para um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual à integral cíclica do trabalho.

A primeira lei não impõe restrição quanto às direções dos fluxos de calor e trabalho.

Um ciclo, no qual uma determinada quantidade de calor é cedida pelo sistema e uma quantidade equivalente de trabalho é recebida pelo sistema, satisfaz a primeira lei, da mesma maneira que um ciclo onde estas transferências se dão em sentidos opostos.

Se um dado ciclo proposto não viola a primeira lei, não está assegurado que este ciclo possa realmente ocorrer.

Esse tipo de evidência levou à formulação da segunda lei da termodinâmica.

Um ciclo somente ocorrerá se tanto a primeira como a segunda lei da termodinâmica forem satisfeitas.

MÁQUINAS TÉRMICAS

A segunda lei envolve o fato de que processos ocorrem num dado sentido e não no oposto.

Consome-se gasolina quando um carro sobe uma colina, mas o nível de combustível do tanque de gasolina não pode ser restabelecido ao nível original na descida da colina.

Observações cotidianas como essas, juntamente com várias outras, são evidências da validade da segunda lei da termodinâmica.

Será considerado primeiramente a segunda lei para um sistema percorrendo um ciclo e, em seguida, estenderemos os conceitos para um sistema que sofre uma mudança de estado e depois para um volume de controle.

MÁQUINAS TÉRMICAS

MOTORES TÉRMICOS E REFRIGERADORES

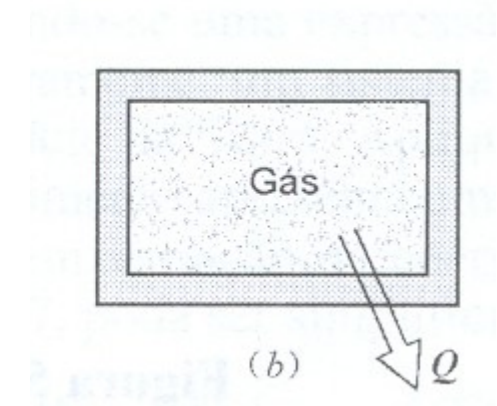
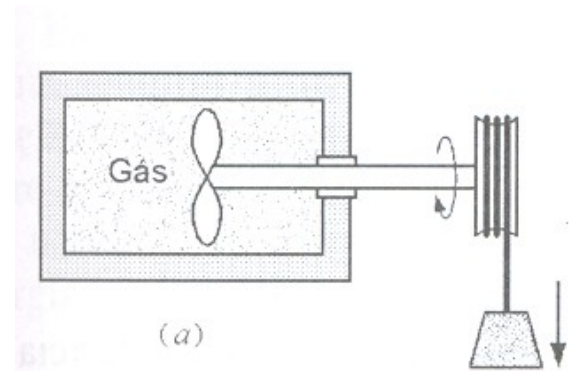
Consideremos o sistema e o meio mostrados na Figura.

Seja o sistema constituído pelo gás e que este sistema percorra um ciclo.

Primeiramente realiza-se trabalho sobre o sistema, mediante o abaixamento do peso e através das pás do agitador, e completemos o ciclo, transferindo-se calor para o meio.

Não podemos inverter este ciclo: se transferirmos calor ao gás a sua temperatura aumentará, mas a pá não girará e não levantará o peso.

Esse sistema só poderá operar num ciclo no qual calor e trabalho são negativos, não podendo operar em um ciclo no qual calor e trabalho são positivos, apesar de que isto não contraria a primeira lei.



MÁQUINAS TÉRMICAS

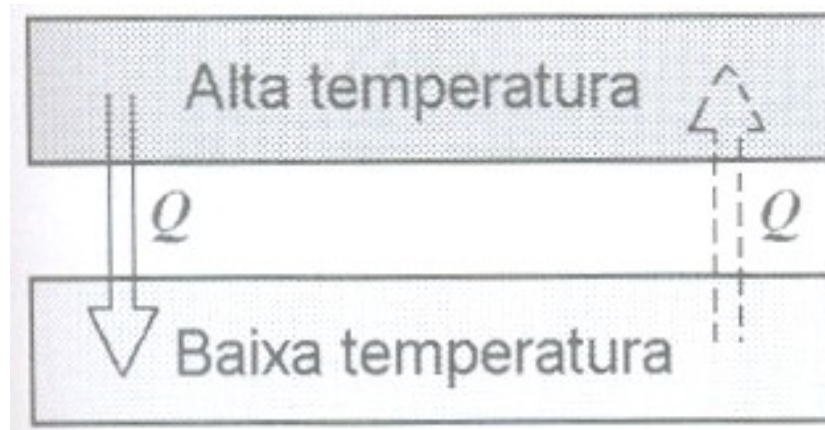
Considerando outro ciclo impossível de ser realizado.

Sejam dois sistemas, um a temperatura elevada e o outro a temperatura baixa.

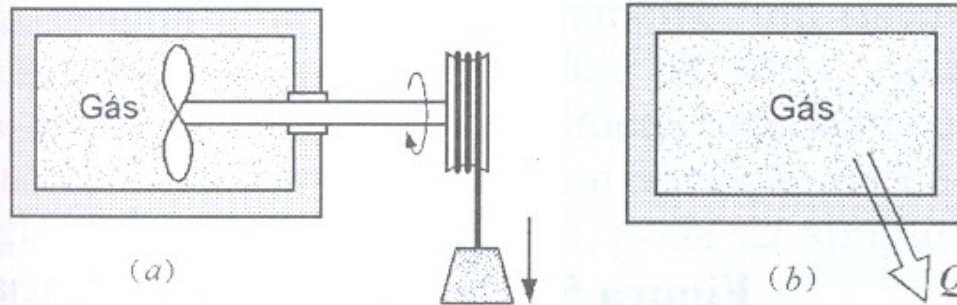
Suponha um processo no qual determinada quantidade de calor é transferida do sistema a alta para o de baixa temperatura.

Esse processo pode ocorrer.

O processo inverso: a passagem de calor do sistema à baixa para o de alta temperatura, não pode ocorrer e que é impossível completar o ciclo apenas pela transferência de calor.



MÁQUINAS TÉRMICAS



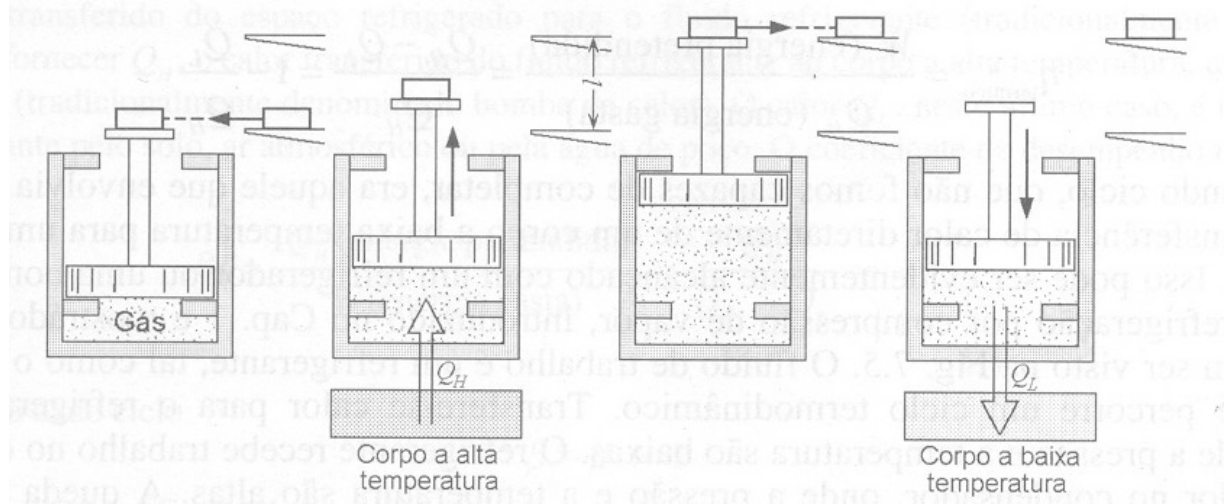
Essas duas ilustrações levam a considerar o motor térmico e o refrigerador (também é conhecido como bomba de calor).

O motor térmico pode ser um sistema que opera segundo um ciclo, realizando um trabalho líquido positivo e trocando calor líquido positivo.

A bomba de calor pode ser um sistema que opera segundo um ciclo, que recebe calor de um corpo a baixa temperatura e cede calor para um corpo a alta temperatura; sendo necessário, entretanto, trabalho para sua operação.

Vamos considerar motores térmicos simples e refrigeradores simples.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Motor térmico constituído por um cilindro, com limitadores de curso, e um êmbolo.

O gás contido no cilindro considerado como sistema.

Inicialmente, o êmbolo repousa sobre os limitadores inferiores e tem um peso sobre sua plataforma.

Calor é transferido de um corpo a alta temperatura para o gás, fazendo com ele se expanda e elevando o êmbolo até os limitadores superiores. Nesse ponto o peso é removido.

O sistema retorna ao estado inicial, por meio da transferência de calor do gás para um corpo a baixa temperatura, completando o ciclo.

O gás realizou trabalho durante o ciclo pois um peso foi elevado.

A partir da primeira lei, o calor líquido transferido é positivo e igual ao trabalho realizado.

Este dispositivo é denominado de máquina térmica e a substância para a qual e da qual calor é transferido é chamada fluido de trabalho.

MÁQUINAS TÉRMICAS

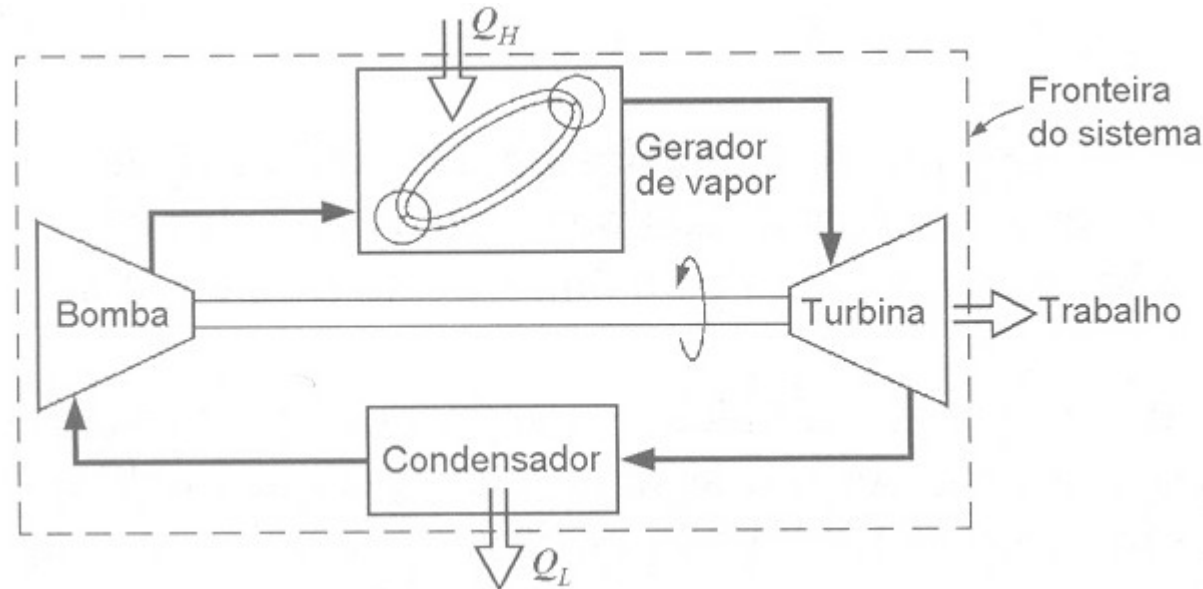
Uma máquina térmica pode ser definida como um dispositivo que, operando segundo um ciclo termodinâmico, realiza um trabalho líquido positivo a custa da transferência de calor de um corpo a temperatura elevada para um corpo a temperatura baixa.

A denominação máquina térmica é utilizada num sentido mais amplo para designar todos os dispositivos que produzem trabalho, através da transferência de calor ou combustão, mesmo que o dispositivo não opere segundo um ciclo termodinâmico.

O motor de combustão interna e a turbina a gás são exemplos desse tipo de dispositivo e a denominação de motores térmicos é aceitável nesses casos.

Entretanto serão analisadas as máquinas térmicas que operam segundo um ciclo termodinâmico.

MÁQUINAS TÉRMICAS

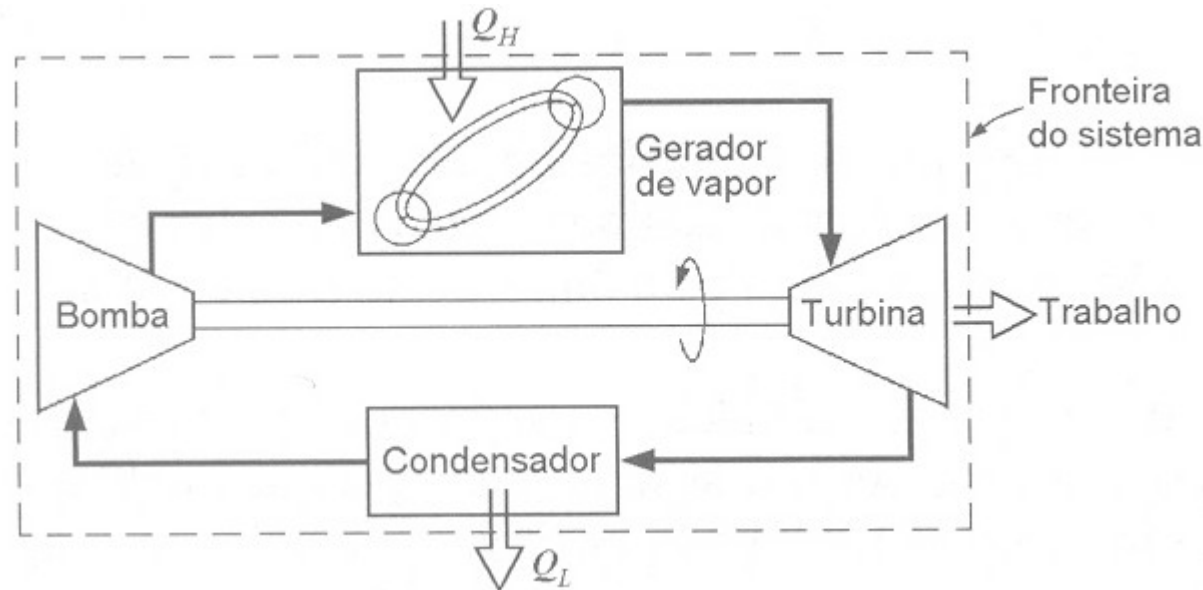


Uma instalação motora a vapor é uma máquina térmica no sentido estrito.

Cada componente é analisado separadamente, associando a cada um deles um processo em regime permanente, mas se a instalação é considerada como um todo, ela é uma máquina térmica na qual a água é o fluido de trabalho.

Uma quantidade de calor Q_H é transferida de um corpo a alta temperatura, que poderá ser os produtos da combustão numa câmara, um reator, ou um fluido secundário que por sua vez foi aquecido num reator.

MÁQUINAS TÉRMICAS



A turbina aciona a bomba e o trabalho líquido fornecido pelo motor térmico é a característica mais importante do ciclo.

A quantidade de calor Q_L é transferida para um corpo a baixa temperatura que, usualmente, é a água de resfriamento do condensador.

A instalação motora a vapor simples é uma máquina térmica no sentido estrito, pois tem um fluido de trabalho, para, ou do qual, calor é transferido e realiza uma determinada quantidade de trabalho, enquanto percorre o ciclo.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Por meio de um motor térmico, pode-se fazer um sistema percorrer um ciclo que apresenta tanto o trabalho líquido como a transferência de calor líquida positivos.

Ao utilizarmos os símbolos Q_H e Q_L afasta-se da convenção de sinal para o calor porque, para um motor térmico e quando se considera o fluido de trabalho como sistema, Q_L deve ser negativo.

Será vantajoso usar o símbolo Q_H para representar o calor transferido no corpo a alta temperatura e Q_L para o transferido no corpo a baixa temperatura.

O sentido da transferência de calor será evidente em cada caso pelo contexto.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Introduzindo o conceito de eficiência térmica para um motor térmico.

A eficiência é a razão entre o que é produzido (energia pretendida) e o que é usado (energia gasta).

Em um motor térmico a energia pretendida é o trabalho e a energia gasta é o calor transferido da fonte a alta temperatura (implica em custos e reflete os gastos com os combustíveis).

A eficiência térmica, ou rendimento térmico, é definida por:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

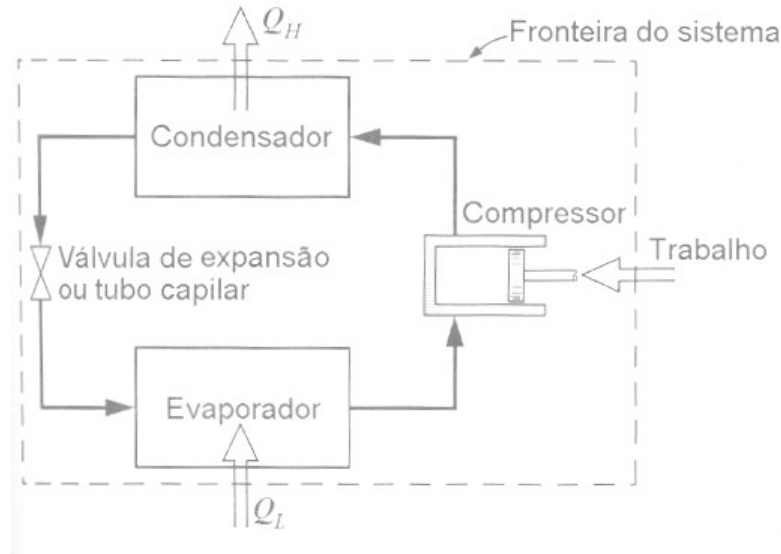
MÁQUINAS TÉRMICAS



Outro ciclo incapaz de ser realizado é aquele que envolve a transferência de calor diretamente de um corpo a baixa temperatura para um corpo a alta temperatura.

Essa possibilidade só pode ser alcançada com um refrigerador ou uma bomba de calor.

MÁQUINAS TÉRMICAS



O ciclo de refrigeração por compressão de vapor.

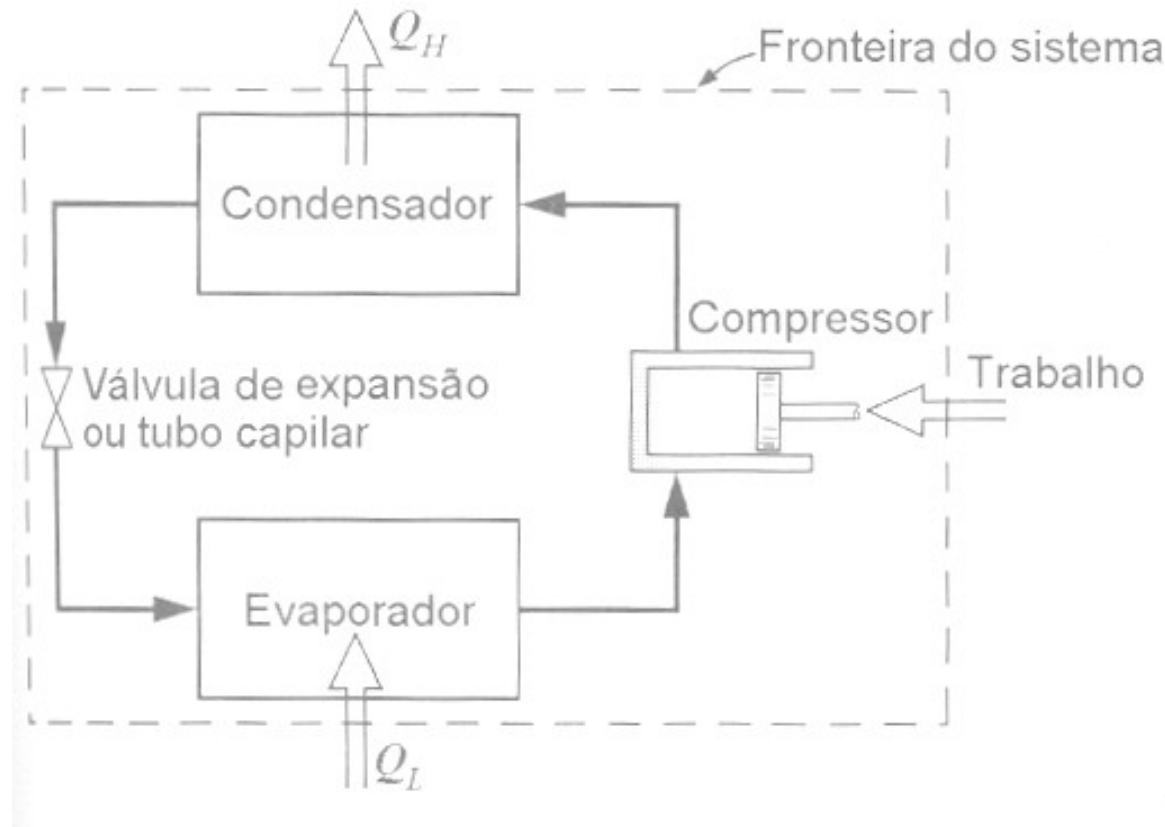
O fluido de trabalho é um refrigerante, tal como o R-134a ou a amônia,

Transfere-se calor para o refrigerante no evaporador, onde a pressão e a temperatura são baixas.

O refrigerante recebe trabalho no compressor e transfere calor no condensador, onde a pressão e a temperatura são altas.

A queda de pressão é provocada no fluido quando este escoar através da válvula de expansão ou do tubo capilar.

MÁQUINAS TÉRMICAS



O refrigerador, ou a bomba de calor, é um dispositivo que opera segundo um ciclo e que necessita de trabalho para que se obtenha a transferência de calor de um corpo a baixa temperatura para outro a alta temperatura.

MÁQUINAS TÉRMICAS

A "eficiência" de um refrigerador é expressa em termos do coeficiente de desempenho ou coeficiente de eficácia, que é designado pelo símbolo β .

No caso de um refrigerador, o objetivo (isto é, a energia pretendida) é Q_L , o calor transferido do espaço refrigerado, e a energia gasta é o trabalho, W .

O coeficiente de desempenho, β , é:

$$\beta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Um refrigerador ou uma bomba de calor pode ser utilizado com um destes objetivos:

1. retirar Q_L , o calor transferido do espaço refrigerado para o fluido refrigerante - denominado refrigerador;
2. fornecer Q_H , o calor transferido do fluido refrigerante ao corpo a alta temperatura, que é o espaço a ser aquecido - denominado bomba de calor.

O calor Q_L , neste último caso, é transferido ao fluido refrigerante pelo solo, ar atmosférico ou pela água de poço.

O coeficiente de desempenho neste caso, β' , é.

$$\beta' = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

Observar que, para um dado ciclo:

$$\beta' - \beta = 1$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Conceito de reservatório térmico:

Reservatório térmico é um corpo que nunca apresenta variação de temperatura mesmo estando sujeito a transferências de calor.

Um reservatório térmico permanece sempre a temperatura constante.

O oceano e a atmosfera satisfazem, com boa aproximação, essa definição.

É útil indicar um reservatório a alta temperatura e outro a baixa temperatura.

As vezes, um reservatório do qual se transfere calor, é chamado de fonte e um reservatório para o qual se transfere calor é chamado de sorvedouro.

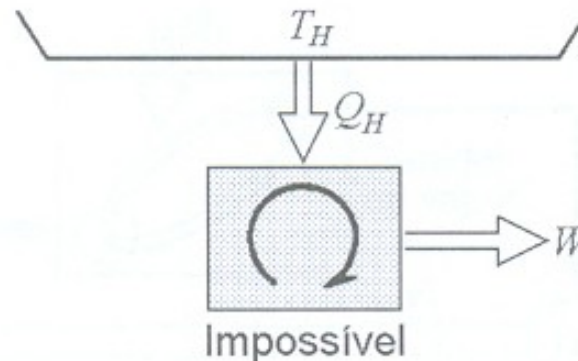
MÁQUINAS TÉRMICAS

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

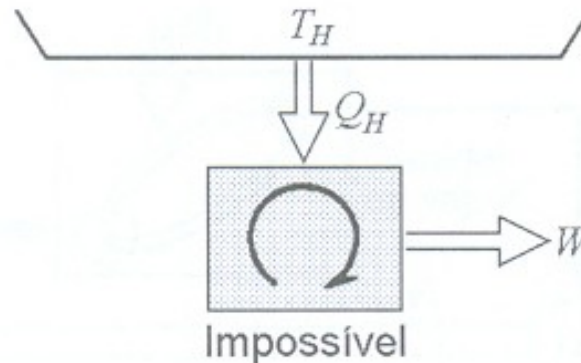
Existem dois enunciados clássicos da segunda lei, conhecidos como enunciado de Kelvin - Planck e enunciado de Clausius.

Enunciado de Kelvin - Planck:

É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico.



MÁQUINAS TÉRMICAS



Enunciado vinculado a discussão sobre o motor térmico. É impossível construir um motor térmico que opere segundo um ciclo que receba uma determinada quantidade de calor de um corpo a alta temperatura e produza uma igual quantidade de trabalho.

A única alternativa é que alguma quantidade de calor deve ser transferida do fluido de trabalho a baixa temperatura para um corpo a baixa temperatura.

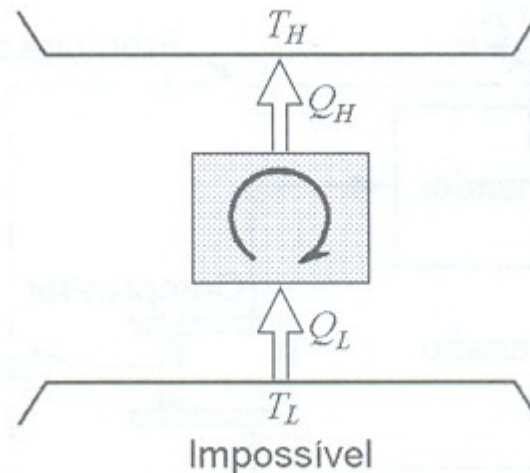
Um ciclo só pode produzir trabalho se estiverem envolvidos dois níveis de temperatura e o calor ser transferido do corpo a alta temperatura para o motor térmico e também do motor térmico para o corpo a baixa temperatura.

É impossível construir um motor térmico que tenha uma eficiência térmica de 100%.

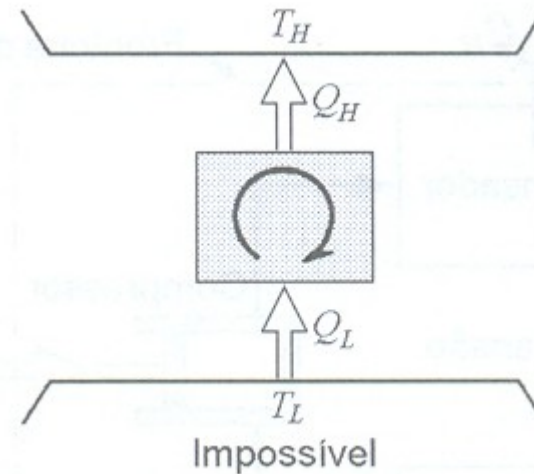
MÁQUINAS TÉRMICAS

Enunciado de Clausius:

É impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.



MÁQUINAS TÉRMICAS



Este enunciado está relacionado com o refrigerador ou a bomba de calor e, com efeito, estabelece que é impossível construir um refrigerador que opera sem receber trabalho.

Isso também significa que o coeficiente de desempenho é sempre menor do que infinito.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Três observações relativas aos dois enunciados.

A primeira:

Ambos são enunciados negativos.

- É impossível "provar" um enunciado negativo.

A segunda lei da termodinâmica (como qualquer outra lei da natureza) se fundamenta na evidência experimental.

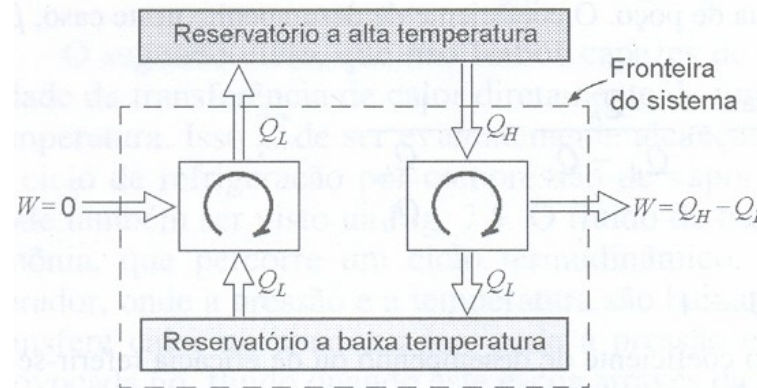
Todas as experiências já realizadas têm, direta ou indiretamente, confirmado a segunda lei da termodinâmica.

A segunda:

Os dois enunciados da segunda lei são equivalentes.

Dois enunciados são equivalentes se a verdade de cada um implicar na verdade do outro, ou se a violação de cada um implicar na violação do outro.

MÁQUINAS TÉRMICAS



O dispositivo esquerdo da Figura é um refrigerador que não requer trabalho e, portanto, viola o enunciado de Clausius. Uma quantidade de calor Q_L é transferida do reservatório a baixa temperatura para o refrigerador e a mesma quantidade de calor Q_L é transferida para o reservatório a alta temperatura.

Uma quantidade de calor Q_H , que é maior do que Q_L , é transferida do reservatório a alta temperatura para o motor térmico e o motor rejeita o calor Q_L , realizando um trabalho W (que é igual a $Q_H - Q_L$).

Como não há uma troca líquida de calor com o reservatório a baixa temperatura, este reservatório, o motor térmico e o refrigerador podem constituir um conjunto.

Este conjunto, então, pode ser considerado como um dispositivo que opera segundo um ciclo e não produz outro efeito além do levantamento de um peso (trabalho) e a troca de calor com um único reservatório térmico.

A violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kelvin-Planck.

MÁQUINAS TÉRMICAS

A completa equivalência desses dois enunciados é estabelecida quando se demonstra que a violação do enunciado de Kelvin - Planck implica na violação do enunciado de Clausius.

Isso fica como exercício..

MÁQUINAS TÉRMICAS

A terceira:

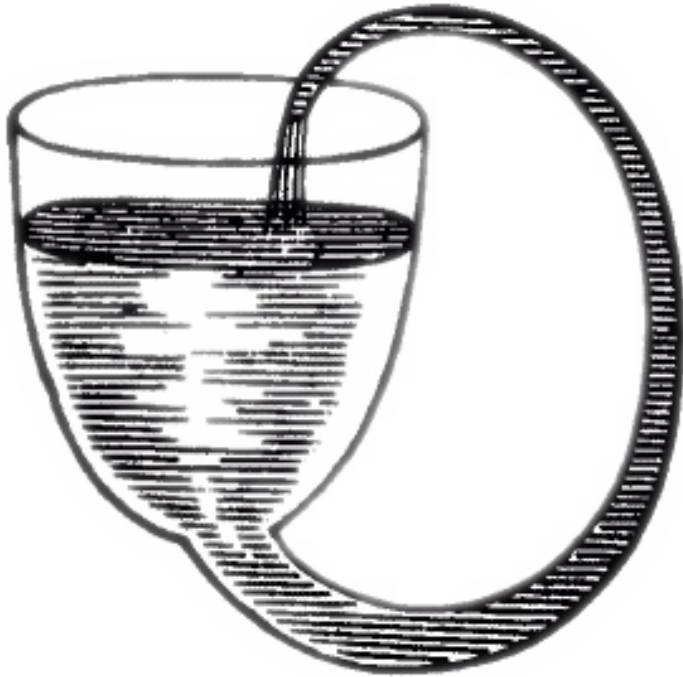
A segunda lei da termodinâmica tem sido enunciada como a impossibilidade da construção de um moto-perpétuo de segunda espécie.

Um moto-perpétuo de primeira espécie criaria trabalho do nada, ou criaria massa e energia, violando a primeira lei.

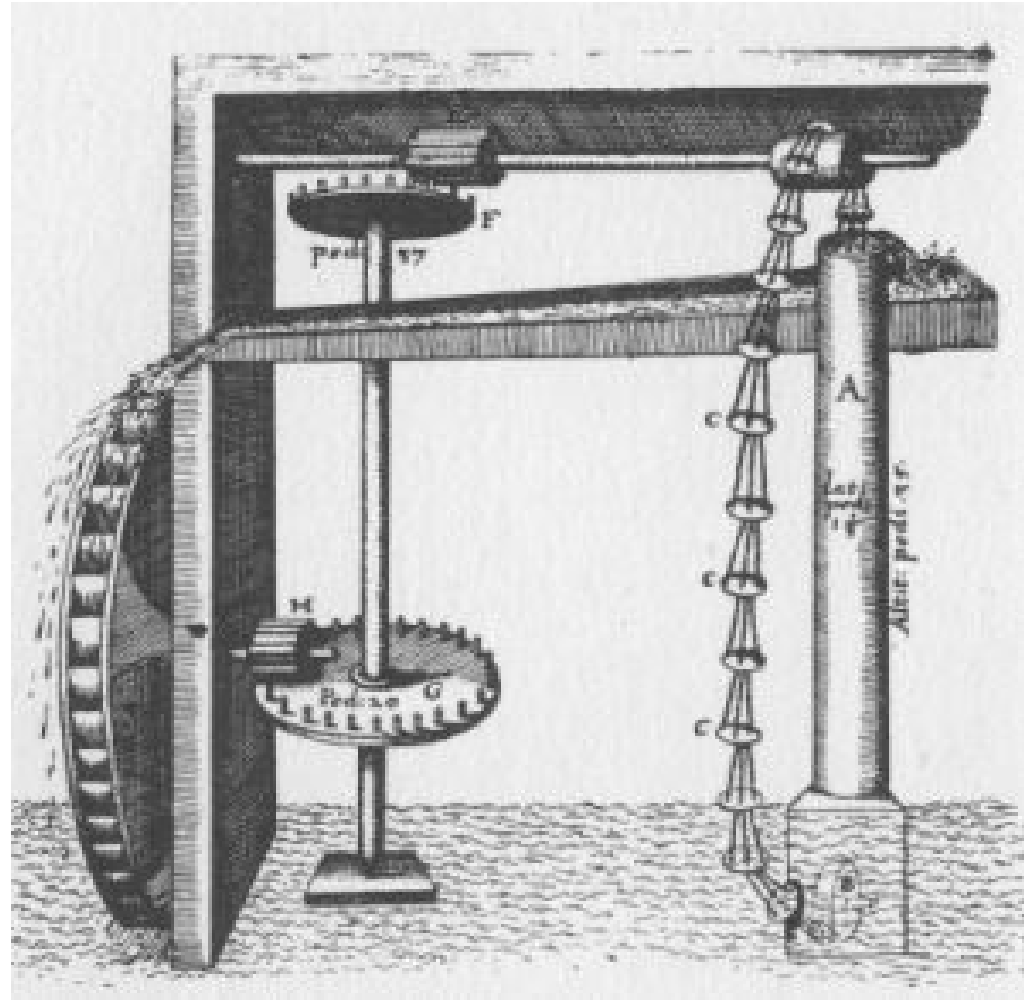
Um moto-perpétuo de segunda espécie violaria a segunda lei.

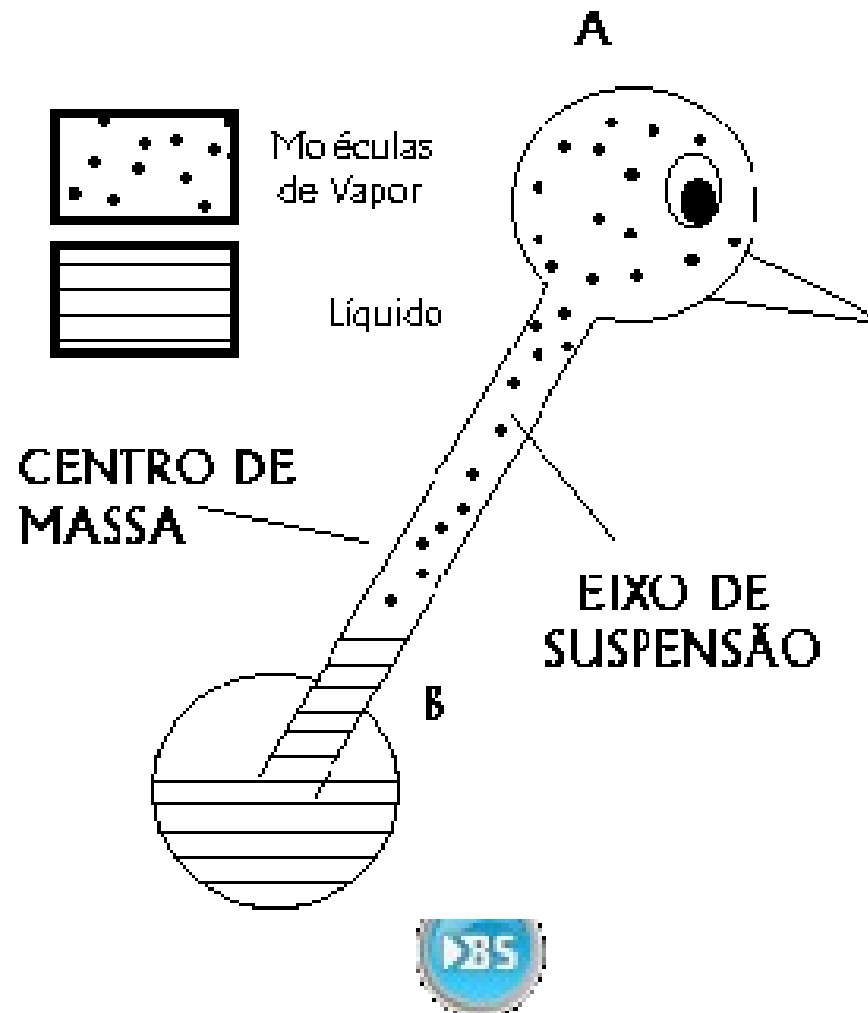
Um moto-perpétuo de terceira espécie não teria atrito e assim operaria indefinidamente, porém não produziria trabalho.

MÁQUINAS TÉRMICAS

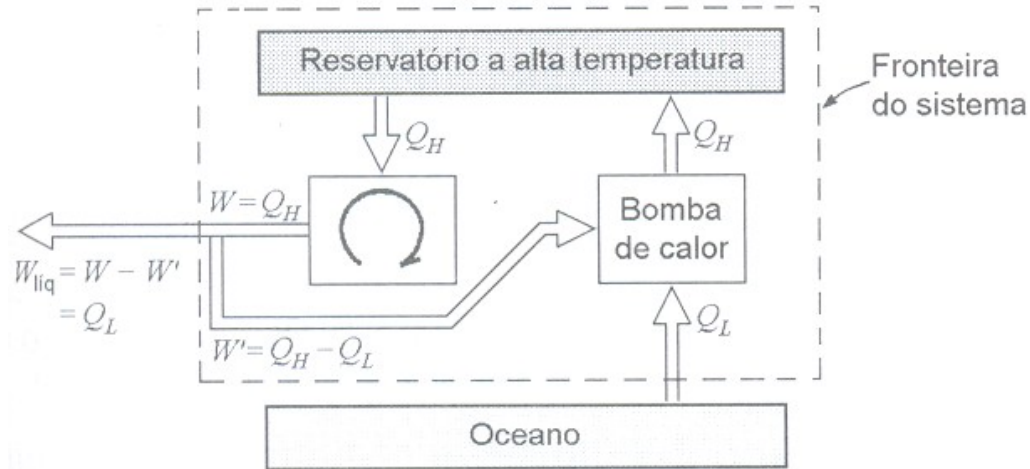


Vazo de Boyle





MÁQUINAS TÉRMICAS



Um motor térmico, que viola a segunda lei da termodinâmica, é transformado num moto-perpétuo de segunda espécie da seguinte maneira.

A Figura que poderia ser a instalação propulsora de um navio.

Uma quantidade de calor Q_L é transferida do oceano para um corpo de alta temperatura, por meio de uma bomba de calor.

O trabalho necessário é W' e o calor transferido ao corpo de alta temperatura é Q_H .

Então uma transferência da mesma quantidade de calor ao motor térmico, que viola o enunciado de Kelvin - Planck da segunda lei e que produz um trabalho $W = Q_H$.

Deste trabalho, uma parcela igual a $Q_H - Q_L$ é necessária para acionar a bomba de calor sobrando o trabalho líquido ($W_{liq} = Q_L$) disponível para movimentar o navio.

Dessa maneira, temos um moto-perpétuo, no sentido de que trabalho é realizado utilizando fontes de energia livremente disponíveis, tais como o oceano e a atmosfera.

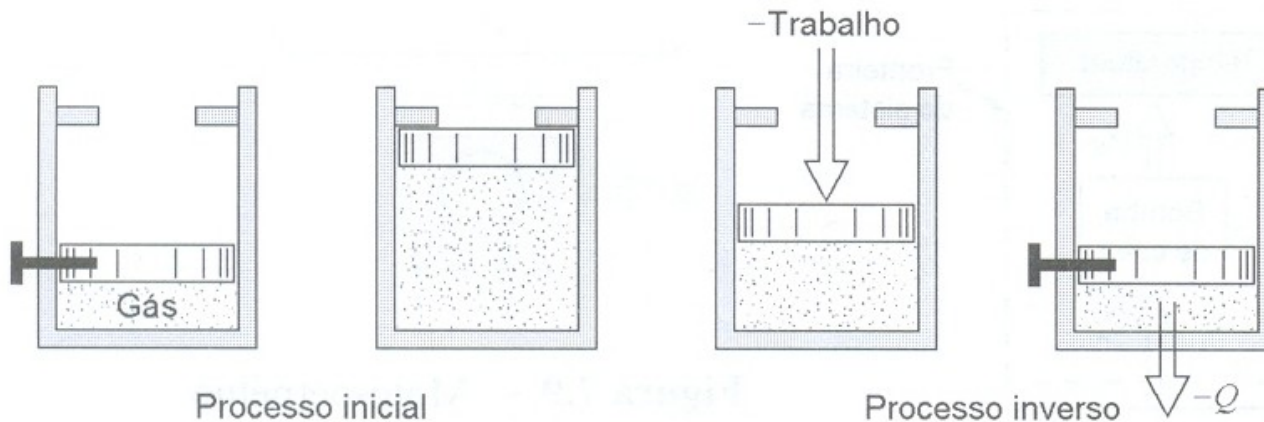
PROCESSO REVERSÍVEL

A pergunta que logicamente ocorre é se é impossível obter um motor térmico com eficiência de 100%, qual é a máxima eficiência que pode ser obtida?

O primeiro passo para responder a essa pergunta é definir um processo ideal que é chamado processo reversível.

Um processo reversível, para um sistema, é definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser revertido e depois de realizada esta inversão, não se notará algum vestígio no sistema e no meio.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Gás como sistema está inicialmente a alta pressão e com o êmbolo fixado por um pino.

Quando se remove o pino, o êmbolo sobe e se choca contra os limitadores.

Algun trabalho é realizado pelo sistema, pois o êmbolo foi levantado.

Para restabelecer o sistema ao seu estado inicial, uma maneira de fazer isso é exercer uma força sobre o êmbolo, comprimindo o gás até que o pino possa ser recolocado.

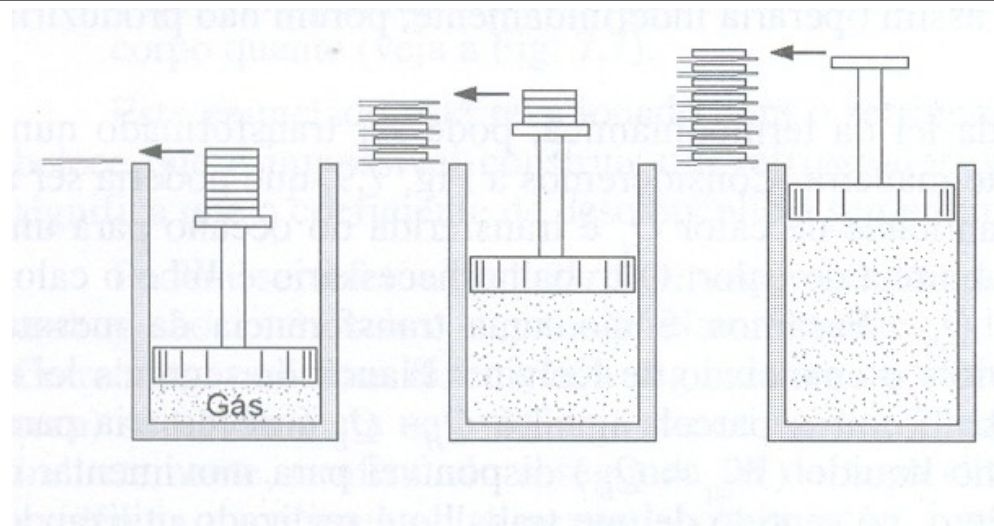
Como a pressão exercida sobre a face do pistão é maior no curso de volta do que no curso inicial de expansão, o trabalho realizado sobre o gás no processo de volta é maior do que o trabalho realizado pelo gás no processo inicial.

Uma determinada quantidade de calor deve ser transferida do gás durante o curso de volta, para que o sistema tenha a mesma energia interna do estado inicial.

O sistema retoma ao seu estado inicial, porém o meio mudou pelo fato de ter sido necessário fornecer trabalho ao sistema, para fazer descer o êmbolo, e transferir calor para o meio.

O processo inicial é irreversível - ele não pode ser invertido sem provocar mudança no meio.

MÁQUINAS TÉRMICAS



O gás contido no cilindro como o sistema. Inicialmente o êmbolo está carregado com pesos. Retirando os pesos, um de cada vez, fazendo-os deslizar horizontalmente e permitindo que o gás expanda e realize um trabalho correspondente ao levantamento dos pesos que ainda permanecem sobre o êmbolo.

À medida que a quantidade de pesos é diminuída, aproxima-se de um processo que pode ser invertido (pois em cada nível do êmbolo, no processo inverso, haverá um pequeno peso que está exatamente no nível da plataforma e, assim, pode ser colocado sobre a plataforma sem requerer trabalho).

No limite, como os pesos se tomam muito pequenos, o processo inverso pode ser realizado de tal maneira que tanto o sistema como o meio retomam exatamente ao mesmo estado em que estavam inicialmente.

Este processo é reversível.

MÁQUINAS TÉRMICAS

FATORES QUE TORNAM IRREVERSÍVEL UM PROCESSO

Atrito

O atrito torna um processo irreversível.

Considere um bloco e um plano inclinado e façamos com que o bloco seja puxado para cima, no plano inclinado, pelos pesos que descem.

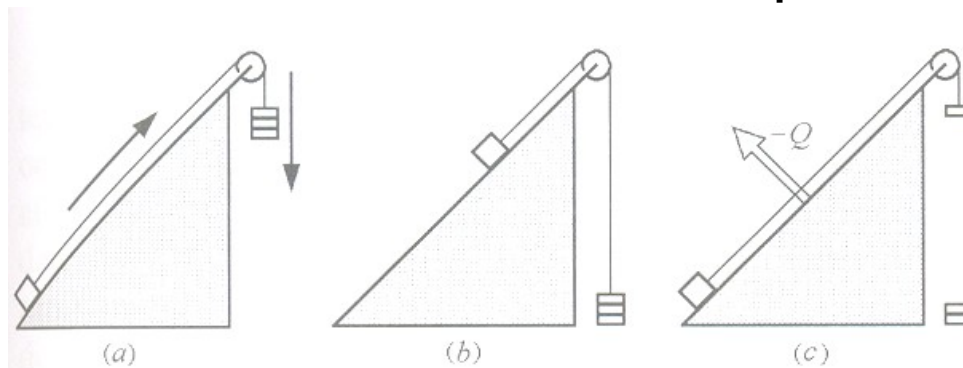
Trabalho é necessário para realizar o processo. Parte é necessária para vencer o atrito entre o bloco e o plano e outra parte é necessária para aumentar a energia potencial do bloco.

O bloco pode ser recolocado na posição inicial pela remoção de alguns pesos..

É necessário alguma transferência de calor do sistema para o meio, para que o bloco retome à sua temperatura inicial.

Como o meio não retoma ao seu estado inicial no fim do processo inverso, concluímos que o atrito tornou o processo irreversível.

Outros efeitos da presença do atrito estão associados aos escoamentos de fluidos viscosos em tubos e canais e com os movimentos dos corpos em fluidos viscosos.



MÁQUINAS TÉRMICAS

Expansão não resistida

Um gás está separado do vácuo por uma membrana.

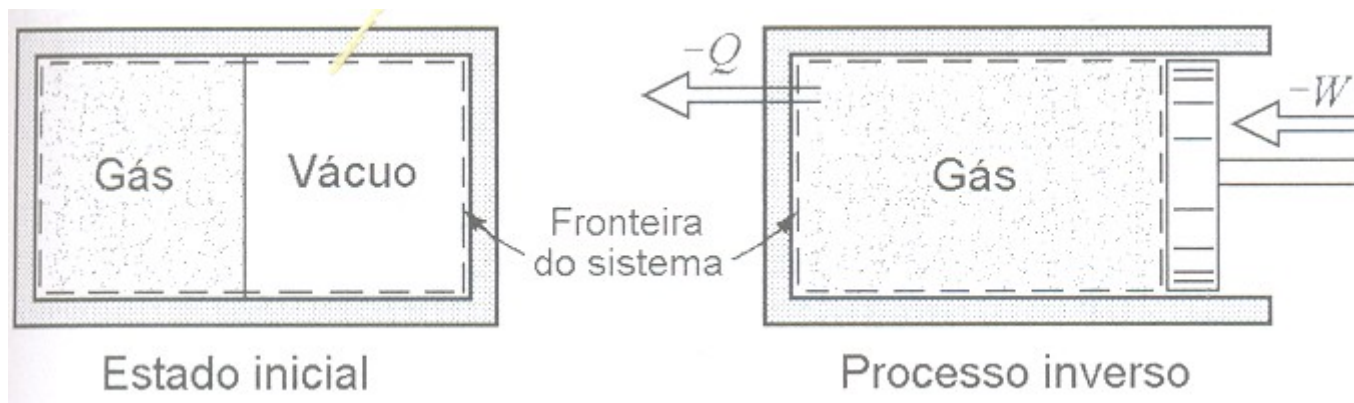
Considera-se o processo que ocorre quando a membrana se rompe e o gás ocupa todo o recipiente.

Pode-se demonstrar que esse processo é irreversível, considerando o processo que seria necessário para recolocar o sistema no seu estado original.

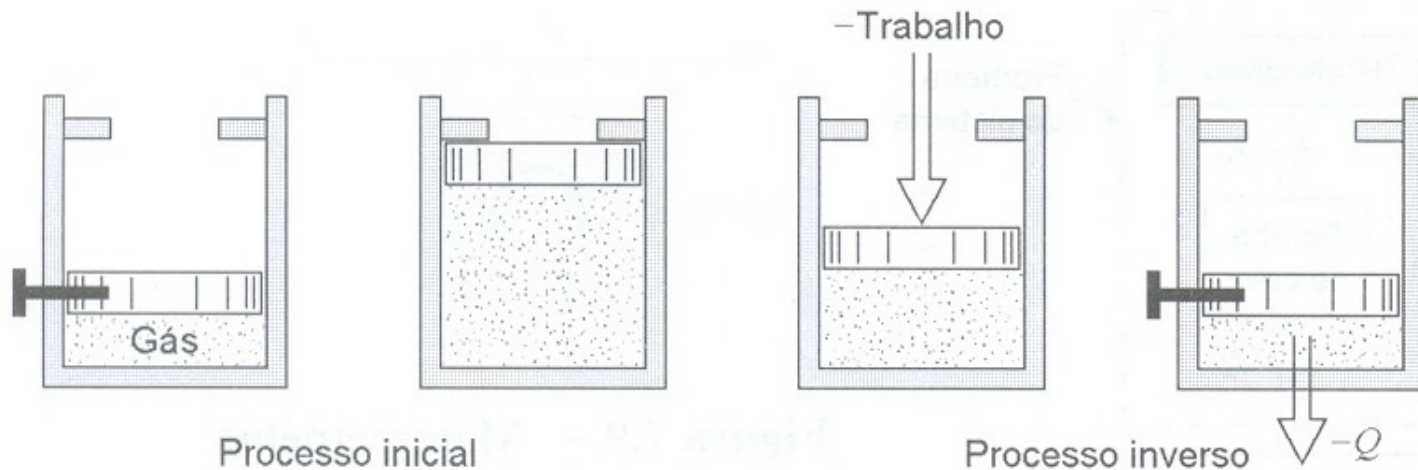
Esse processo envolve a compressão e a transferência de calor do gás, até atingir o estado inicial.

Como trabalho e transferência de calor implicam numa mudança do meio, o meio não retoma ao seu estado inicial.

A expansão não resistida é um processo irreversível.



MÁQUINAS TÉRMICAS



O processo acima é um exemplo de expansão não resistida.

Na expansão reversível de um gás, deve haver somente uma diferença infinitesimal entre a força exercida pelo gás e a força resistiva, de modo que a velocidade com que a fronteira se move será infinitesimal.

Esse processo é quase-estático.

Os casos reais envolvem diferenças finitas de forças, que provocam velocidades finitas de movimento da fronteira e são, em determinado grau, irreversíveis.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Transferência de calor com diferença finita de temperatura

Um sistema: um corpo a alta temperatura e outro a baixa temperatura. Deixa-se que ocorra a transferência de calor do corpo a alta temperatura para o de baixa temperatura.

A única maneira pela qual o sistema pode retomar ao seu estado inicial é através de um refrigerador, que requer trabalho do meio e uma transferência de calor para o meio.

Como o meio não retoma ao seu estado original, temos que o processo é irreversível.

Calor é a energia que é transferida devido a uma diferença de temperatura e esta transferência é um processo irreversível.

Questão: como podemos ter um processo de transferência de calor reversível?

MÁQUINAS TÉRMICAS

Um processo de transferência de calor se aproxima de um processo reversível quando a diferença entre as temperaturas dos dois corpos tende a zero.

Um processo de transferência de calor reversível é aquele em que o calor é transferido através de uma diferença infinitesimal de temperatura.

Para transferir uma quantidade finita de calor através de uma diferença infinitesimal de temperatura, precisamos de um tempo infinito, ou de uma área infinita.

Os processos reais de transferência de calor ocorrem através de uma diferença finita de temperatura e são irreversíveis; quanto maior a diferença maior a irreversibilidade.

Verificamos, entretanto, que o conceito de transferência de calor reversível é muito útil na descrição dos processos ideais.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Mistura de duas substâncias diferentes

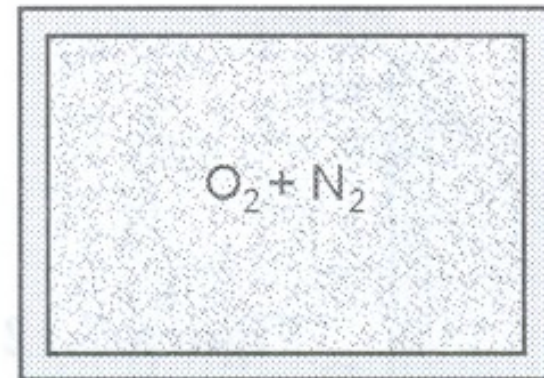
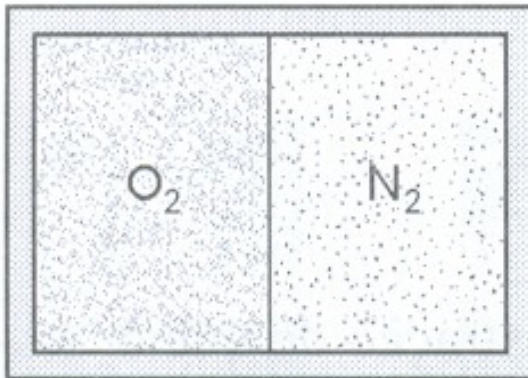
Dois gases diferentes estão separados por uma membrana.

Admitamos que a membrana se rompa e que uma mistura homogênea de oxigênio e nitrogênio ocupe todo o volume.

Esse processo pode ser considerado como um caso especial de expansão não resistida pois cada gás sofre uma expansão não resistida ao ocupar todo o volume.

É necessária uma determinada quantidade de trabalho para separar esses gases.

Uma instalação de separação de ar requer o fornecimento de trabalho, para que se obtenha esta separação.



MÁQUINAS TÉRMICAS

Outros fatores

Existem outros fatores que tornam os processos irreversíveis.

Efeitos de histerese e a perda RI^2 encontrados em circuitos elétricos são fatores que tornam irreversíveis os processos.

Um processo de combustão também é um processo irreversível.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Irreversibilidade interna e a externa.

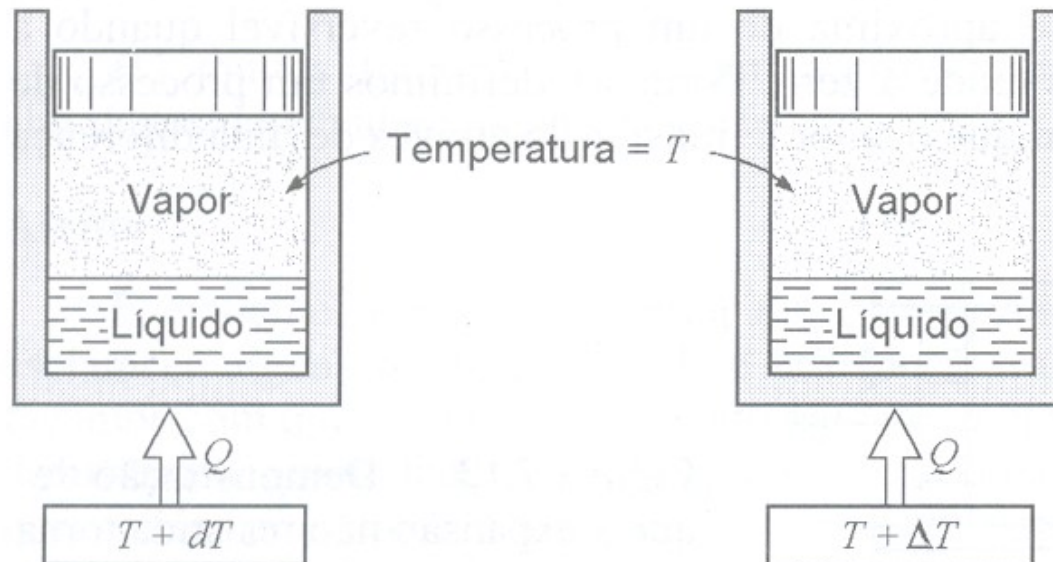
Cada sistema é constituído por uma substância pura, a temperatura se mantém constante durante o processo de transferência de calor.

Num deles, o calor é transferido de um reservatório a temperatura $T + dT$, e no outro, o reservatório está a uma temperatura $T + \Delta T$.

O primeiro é um processo reversível e o segundo é um processo irreversível.

Quando se considera somente o sistema, ele passa exatamente através dos mesmos estados nos dois processos.

Diz-se que o processo é internamente reversível no segundo caso, porém ele é externamente irreversível porque a irreversibilidade ocorre fora do sistema.



MÁQUINAS TÉRMICAS

Existe uma inter-relação geral entre reversibilidade, equilíbrio e tempo.

Num processo reversível, o afastamento do equilíbrio é infinitesimal e ele ocorre com velocidade infinitesimal.

Os processos reais ocorrem com velocidade finita e o o afastamento do equilíbrio é finito.

Os processos reais são irreversíveis em determinado grau.

Quanto maior o afastamento do equilíbrio, maior é a irreversibilidade e mais rapidamente ocorre o processo.

Deve-se observar que o processo quase-estático é um processo reversível, e será usado o termo processo reversível.

MÁQUINAS TÉRMICAS

O CICLO DE CARNOT

Tendo definido o processo reversível e considerado alguns fatores que tornam os processos irreversíveis, apresentamos novamente a questão levantada anteriormente:

Se o rendimento térmico de todo motor térmico é inferior a 100%, qual é o ciclo de maior rendimento que podemos ter?

MÁQUINAS TÉRMICAS

O CICLO DE CARNOT

Responde-se essa questão para um motor térmico que recebe calor de um reservatório térmico a alta temperatura e rejeita calor para um a baixa temperatura.

As temperaturas dos reservatórios térmicos são constantes e independem das quantidades de calor transferidas.

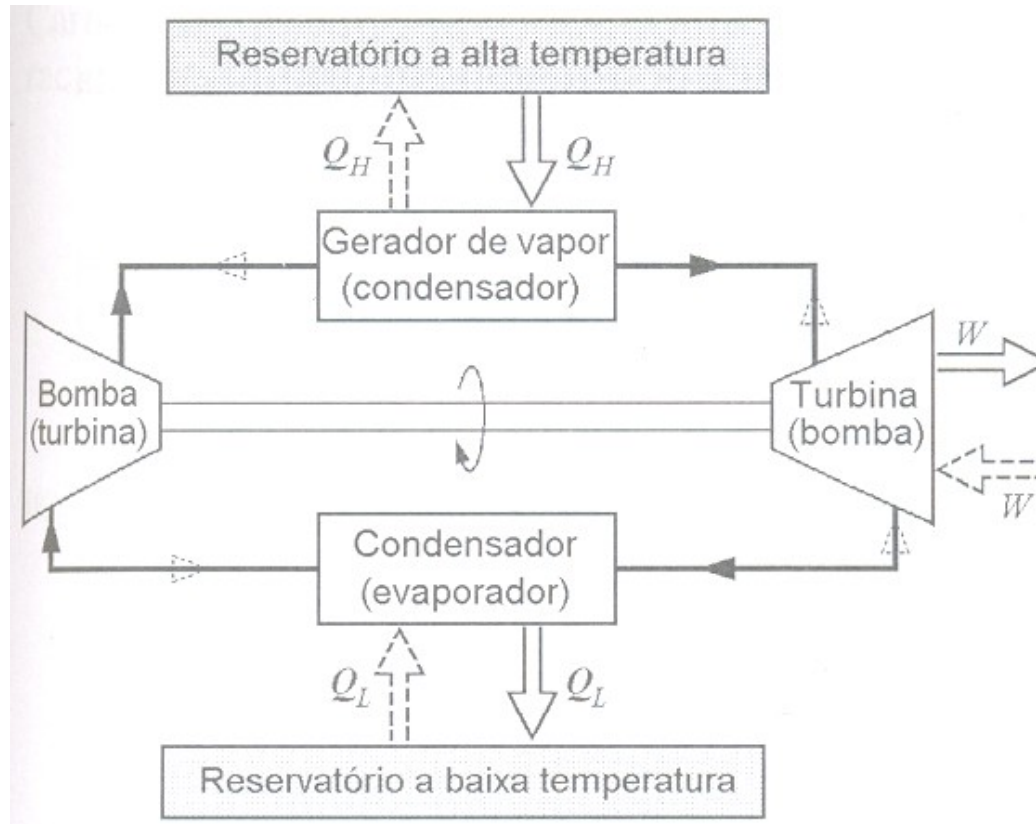
Admite-se que esse motor térmico, que opera entre os dois dados reservatórios térmicos, funcione segundo um ciclo no qual todos os processos são reversíveis.

Se cada processo é reversível, o ciclo é também reversível e, se o ciclo for invertido, o motor térmico se transforma num refrigerador.

Este ciclo é conhecido como o ciclo de Carnot, em homenagem ao engenheiro francês Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832) que estabeleceu as bases da segunda lei da termodinâmica em 1824.

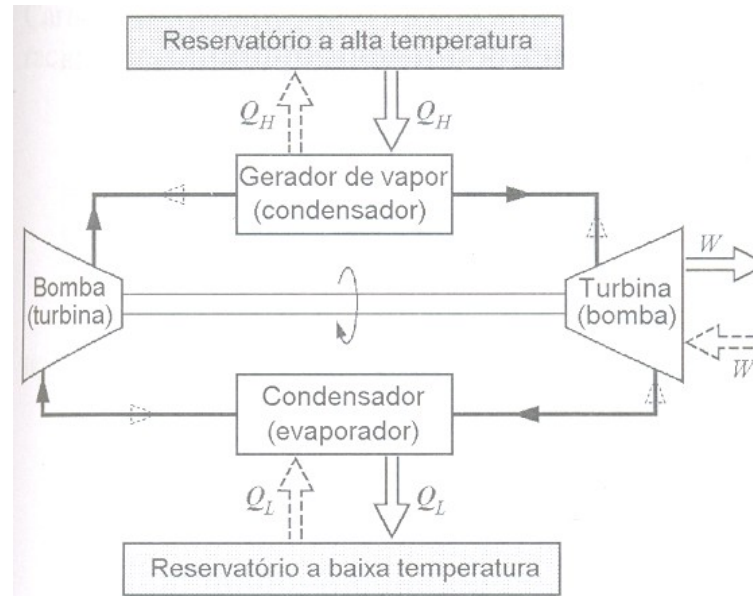
Mostraremos que esse é o ciclo mais eficiente que pode operar entre dois reservatórios térmicos.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Uma instalação motora que é semelhante a uma instalação a vapor d'água. Admiti-se que a instalação opera segundo um ciclo de Carnot e que o fluido de trabalho seja uma substância pura, tal como a água. Calor é transferido do reservatório térmico a alta temperatura para a água no gerador de vapor.

MÁQUINAS TÉRMICAS



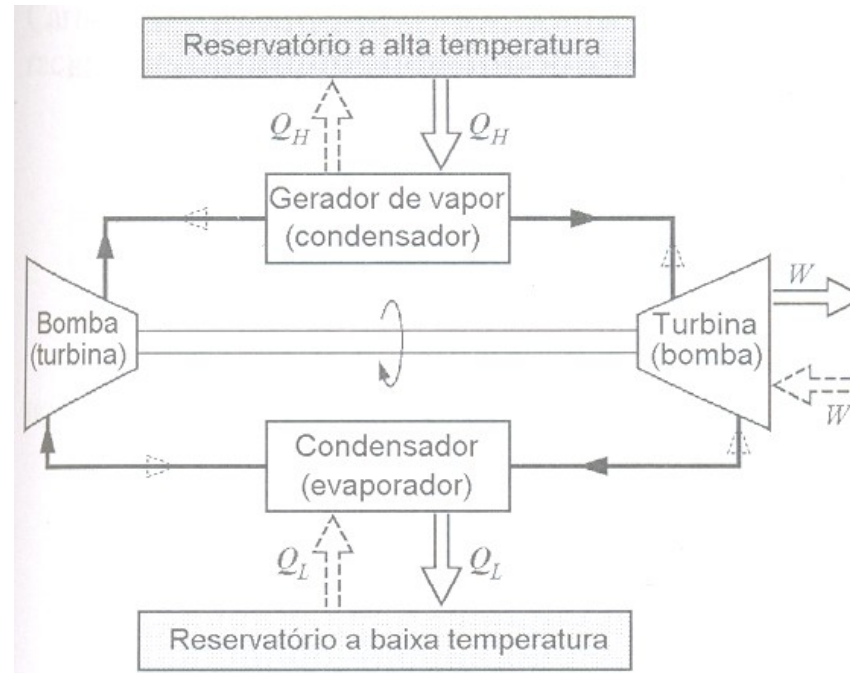
Para que seja um processo de transferência de calor reversível, a temperatura da água (vapor) é infinitesimalmente menor do que temperatura do reservatório.

A temperatura da água deve se manter constante, pois a temperatura do reservatório permanece constante.

Portanto, **o primeiro processo do ciclo de Carnot é um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido do reservatório a alta temperatura para o fluido de trabalho.**

A mudança de fase, de líquido para vapor, numa substância pura e a pressão constante, é um processo isotérmico.

MÁQUINAS TÉRMICAS

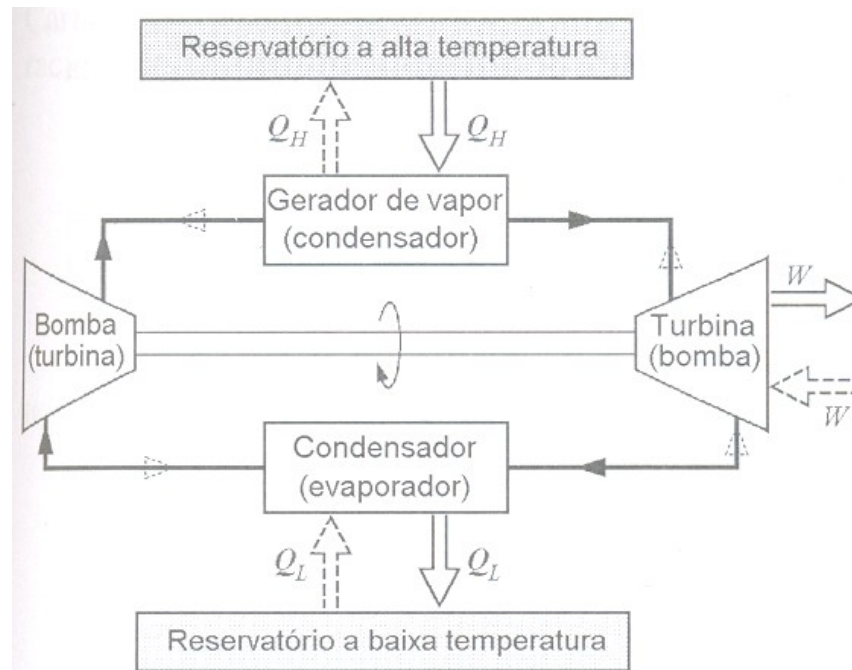


O processo seguinte ocorre na turbina.

Esse processo ocorre sem transferência de calor e é portanto adiabático.

Como todos os processos do ciclo de Carnot são reversíveis, esse deve ser um **processo adiabático reversível, durante o qual a temperatura do fluido de trabalho diminui, desde a temperatura do reservatório a alta temperatura até a do reservatório a baixa temperatura.**

MÁQUINAS TÉRMICAS

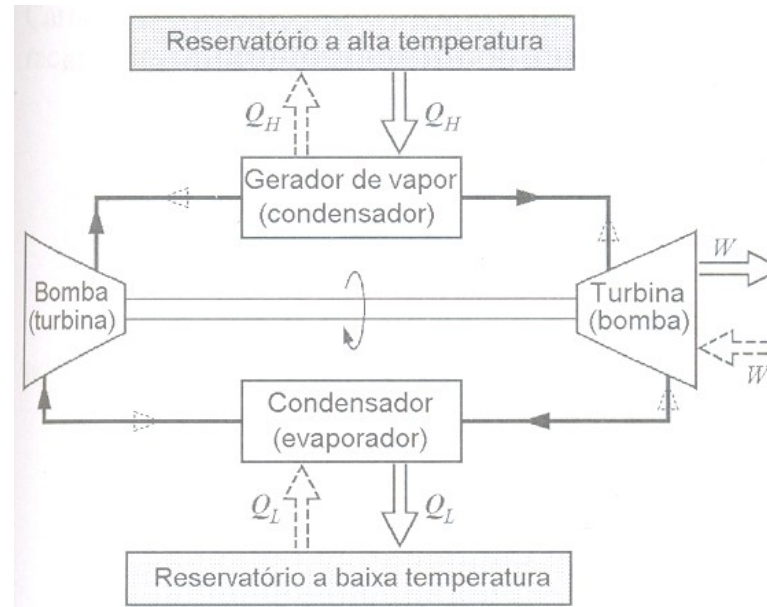


No processo seguinte, calor é rejeitado do fluido de trabalho para o reservatório a baixa temperatura.

Esse **processo deve ser isotérmico e reversível**, no qual a temperatura do fluido de trabalho é infinitesimalmente maior do que a do reservatório a baixa temperatura.

Durante esse processo isotérmico, parte do vapor d'água é condensado.

MÁQUINAS TÉRMICAS



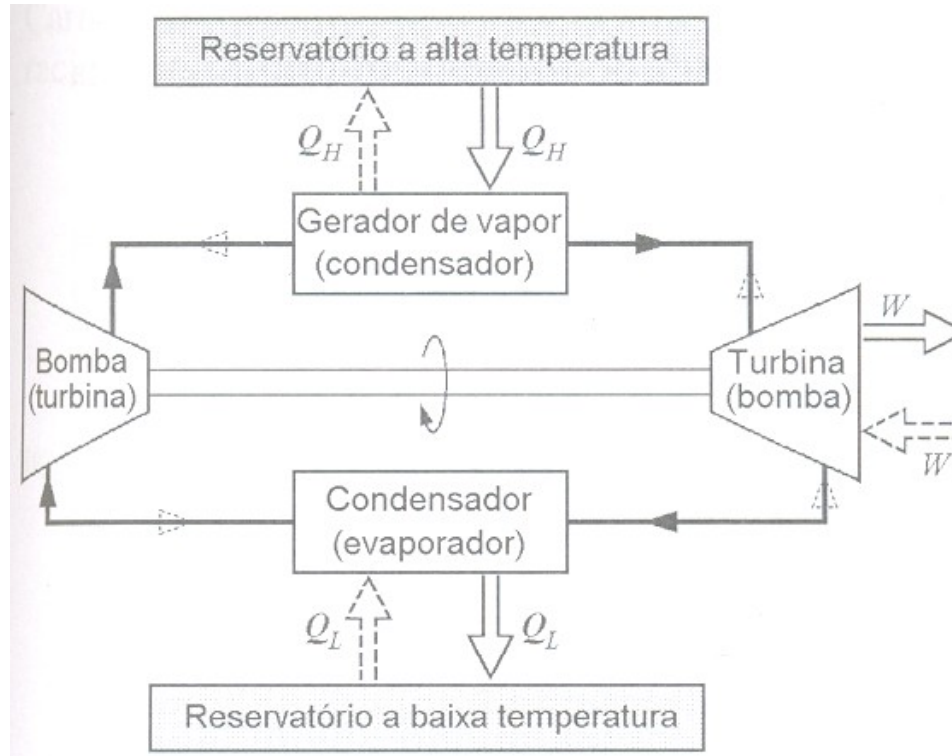
O processo final, que completa o ciclo, é um **processo adiabático reversível**, no qual a temperatura do fluido aumenta desde a temperatura do reservatório a baixa temperatura até a temperatura do outro reservatório.

Se esse processo for efetuado com água (vapor), nós encontraríamos uma compressão de uma mistura de líquido com vapor efluente do condensador.

Na prática isto é um inconveniente e, portanto, em todas as instalações motoras reais, o fluido de trabalho é condensado completamente no condensador.

Lembre que as bombas operam apenas com a substância na fase líquida. Será?

MÁQUINAS TÉRMICAS



Como o ciclo motor térmico de Carnot é reversível, cada processo pode ser invertido e, neste caso, ele se transforma num refrigerador.

O refrigerador é mostrado pelas linhas tracejadas e pelos parênteses na Figura. A temperatura do fluido de trabalho no evaporador é infinitesimalmente menor do que a temperatura do reservatório a baixa temperatura e, no condensador, ela é infinitesimalmente maior do que a do reservatório a alta temperatura.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Um ponto importante, que deve ser observado, é que o ciclo de Carnot, independentemente da substância de trabalho, tem sempre os mesmos quatro processos básicos.

São eles:

1. Um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para ou do reservatório a alta temperatura.
2. Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho diminui desde a do reservatório a alta temperatura até a do outro reservatório.
3. Um processo isotérmico reversível, no qual calor é transferido para ou do reservatório a baixa temperatura.
4. Um processo adiabático reversível, no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta desde a do reservatório de baixa temperatura até a do outro reservatório.

MÁQUINAS TÉRMICAS

DOIS TEOREMAS RELATIVOS AO RENDIMENTO DO CICLO DE CARNOT

Existem dois teoremas importantes relativos ao rendimento térmico do ciclo de Carnot.

Primeiro teorema.

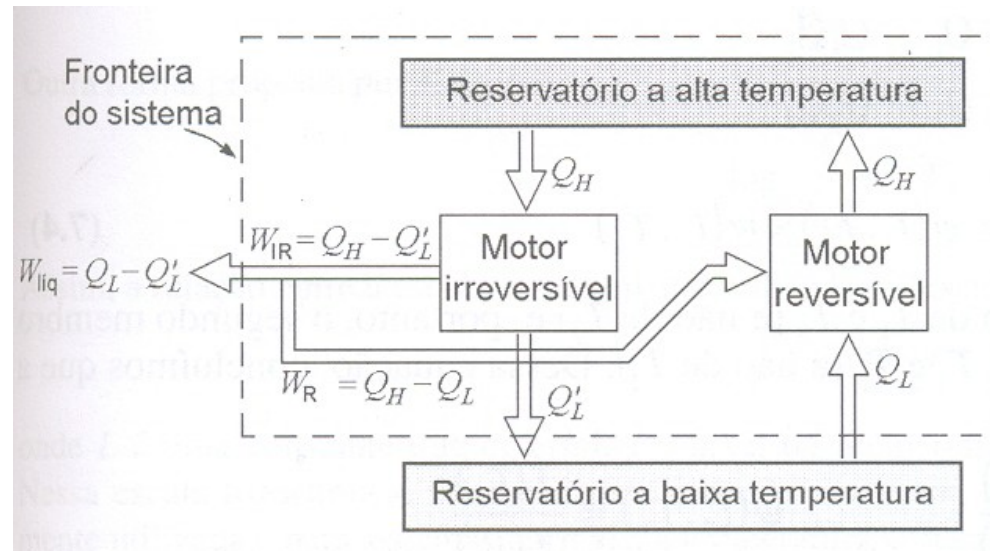
É impossível construir um motor que opere entre dois reservatórios térmicos dados e que seja mais eficiente que um motor reversível operando entre os mesmos dois reservatórios.

A demonstração desse enunciado envolve uma "experiência mental".

Faz-se uma hipótese inicial, e então se demonstra que esta hipótese conduz a conclusões impossíveis.

A única conclusão possível é que a hipótese inicial era incorreta.

MÁQUINAS TÉRMICAS



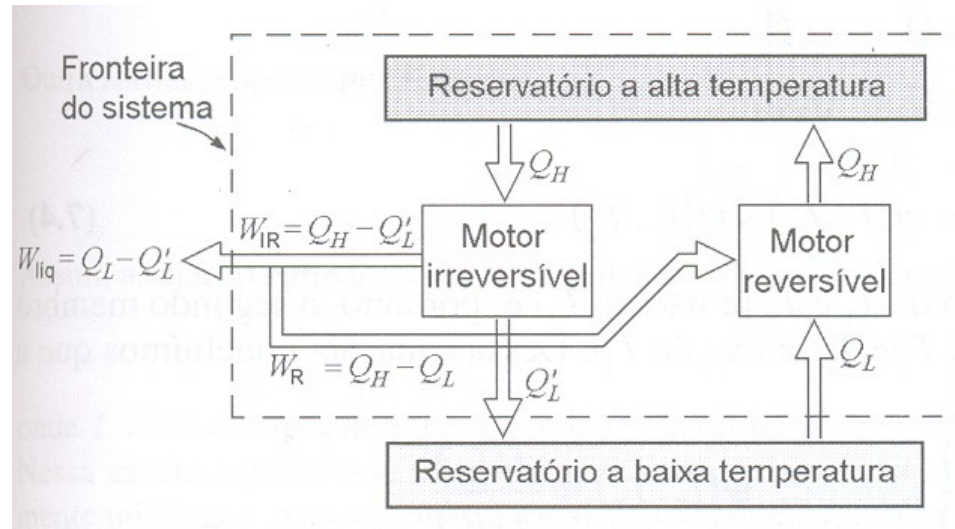
Admitamos que exista um motor irreversível operando entre dois reservatórios térmicos e que tenha um rendimento térmico maior que um motor reversível operando entre os mesmos dois reservatórios.

Seja Q_H o calor transferido ao motor irreversível, Q'_L o calor rejeitado e W_{IR} o trabalho (igual a $Q_H - Q'_L$).

Admitamos que o motor reversível opere como um refrigerador (isto é possível, pois ele é reversível).

Seja Q_L o calor transferido no reservatório a baixa temperatura, Q_H o calor transferido no reservatório de alta temperatura e W_R o trabalho necessário (igual a $Q_H - Q_L$).

MÁQUINAS TÉRMICAS



Foi admitido inicialmente que o motor irreversível é mais eficiente, portanto temos que $Q'_L < Q_L$ e $W_{IR} > W_R$ (pois Q_H é o mesmo para os dois ciclos motores).

O motor irreversível pode movimentar o motor reversível e ainda produzir o trabalho líquido W_{liq} (igual a $W_{IR} - W_R = Q_L - Q'_L$).

Se consideramos os dois motores e o reservatório a alta temperatura como o sistema, teremos um sistema que opera segundo um ciclo que se comunica com um único reservatório e produz uma determinada quantidade de trabalho.

Isso constitui uma violação da segunda lei da termodinâmica e concluímos que a nossa hipótese inicial (que o motor irreversível é mais eficiente que o motor reversível) é incorreta.

Não podemos ter um motor irreversível que apresente rendimento térmico maior do que aquele de um motor reversível que opere entre os mesmos reservatórios térmicos.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Segundo teorema.

Todos os motores que operam segundo o ciclo de Carnot e entre dois reservatórios térmicos apresentam o mesmo rendimento térmico.

A demonstração desse teorema é similar à esboçada anteriormente e envolve a hipótese de que existe um ciclo de Carnot que é mais eficiente que outro ciclo de Carnot operando entre os mesmos reservatórios térmicos.

Façamos com que o ciclo de Carnot com a eficiência maior substitua o ciclo irreversível da demonstração anterior, e o ciclo de Carnot com eficiência menor opere como o refrigerador.

A demonstração segue a mesma linha de raciocínio do primeiro teorema.

Os detalhes ficam como exercício.

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

A ESCALA TERMODINÂMICA DE TEMPERATURA

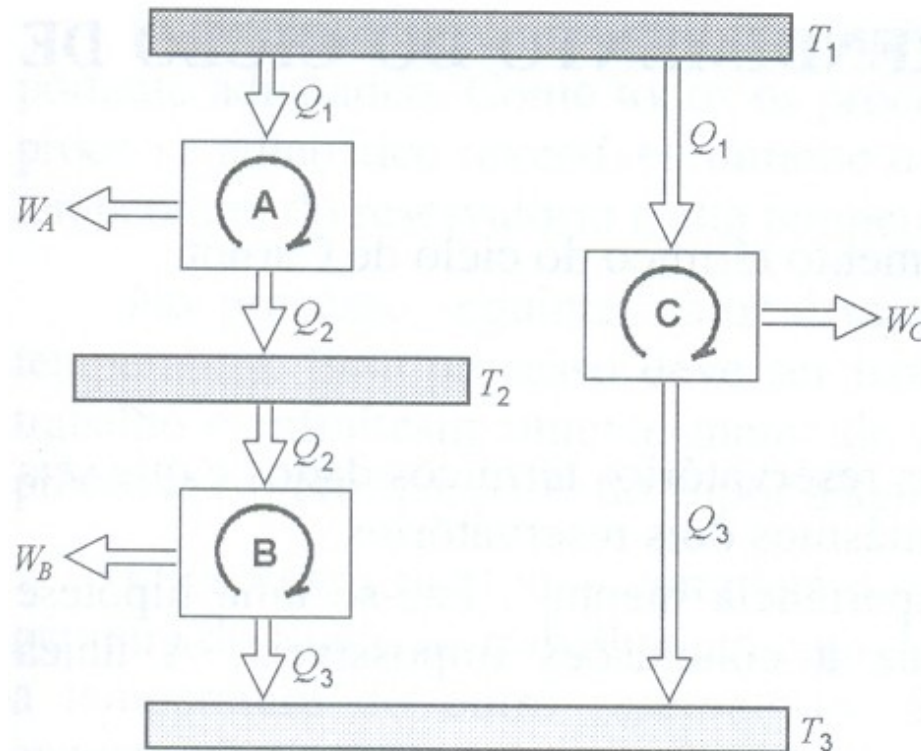
Na discussão anterior sobre temperatura foi observado que a lei zero da termodinâmica estabelece uma base para a medida de temperatura, mas que a escala de temperatura deve ser definida em função de uma determinada substância e de um dispositivo termométrico.

Seria desejável termos uma escala de temperatura que fosse independente de qualquer substância particular, a qual poderia ser chamada de escala absoluta de temperatura.

Anteriormente verificamos que a eficiência de um ciclo de Carnot é independente da substância de trabalho e depende somente das temperaturas dos reservatórios térmicos.

Esse fato estabelece a base para essa escala absoluta de temperatura, que chamaremos de escala termodinâmica.

MÁQUINAS TÉRMICAS



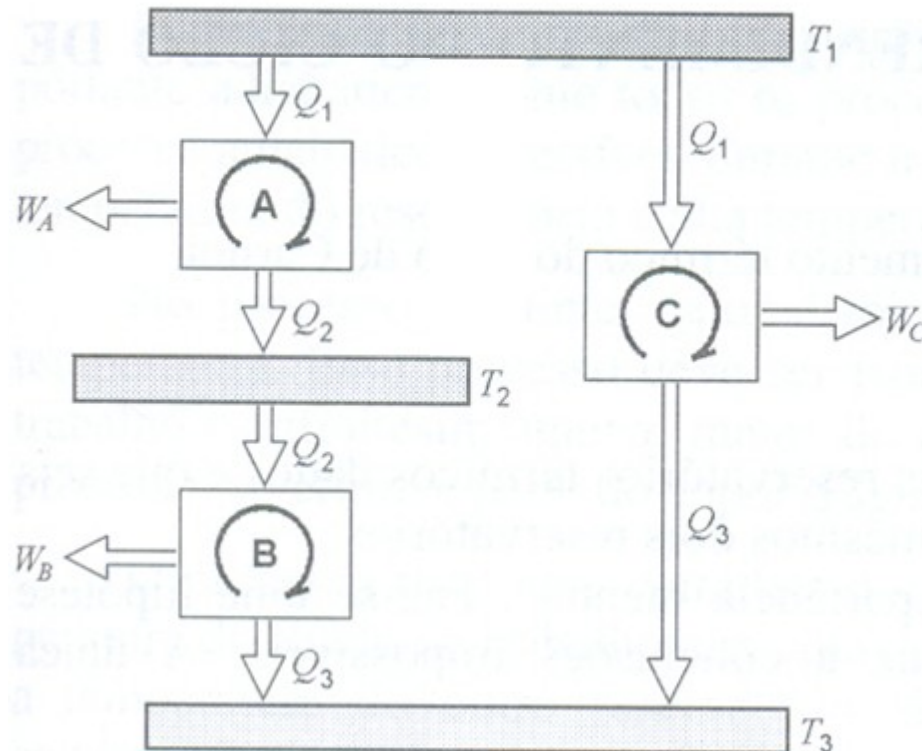
A Figura mostra três reservatórios térmicos e três motores que operam segundo ciclos de Carnot.

T_1 é a temperatura mais alta, T_3 é a temperatura mais baixa e T_2 é a intermediária.

Os motores funcionam do modo indicado entre os vários reservatórios.

Q_1 é o mesmo para os motores A e C e, como estamos tratando de ciclos reversíveis, Q_3 é o mesmo para os motores B e C.

MÁQUINAS TÉRMICAS



Com $T_1 > T_2$ – Pode a eficiência do motor B (Carnot) ser maior ou igual a eficiência do motor C (Carnot)?

MÁQUINAS TÉRMICAS

O rendimento térmico do ciclo de Carnot é função somente da temperatura:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \Psi(T_L, T_H)$$

Onde Ψ indica uma relação funcional.

Apliquemos esta relação aos três ciclos de Carnot

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \Psi(T_1, T_2) \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \Psi(T_2, T_3) \quad \frac{Q_1}{Q_3} = \Psi(T_1, T_3)$$

Como

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{Q_2}{Q_3}$$

temos que

$$\Psi(T_1, T_3) = \Psi(T_1, T_2) \times \Psi(T_2, T_3)$$

Note que o primeiro membro é função de T_1 e T_3 (e não de T_2) e, portanto, o segundo membro dessa equação, também, deve ser função de T_1 e T_3 (e não de T_2).

Dessa equação concluímos que a forma da função Ψ deve ser tal que

$$\Psi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad \Psi(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

pois, desse modo $f(T_2)$ se cancelará no produto $\Psi(T_1, T_2) \times \Psi(T_2, T_3)$.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Portanto, concluímos que $\frac{Q_1}{Q_2} = \Psi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)}$

Generalizando, $\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{f(T_H)}{f(T_L)}$

Existem diversas relações funcionais que satisfazem essa equação.

Lord Kelvin escolheu a seguinte relação para escala termodinâmica de temperatura

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

Assim, utilizando a relação anterior, o rendimento térmico de um ciclo de Carnot pode ser expresso em função das temperaturas absolutas.

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Isso significa que se conhecermos o rendimento térmico de um ciclo de Carnot que opera entre dois dados reservatórios térmicos conheceremos, também, a relação entre as temperaturas absolutas dos reservatórios.

Note que a equação nos fornece uma relação entre temperaturas absolutas, porém não nos informa sobre a grandeza do grau.

MÁQUINAS TÉRMICAS

Admitamos que temos um motor térmico que opera segundo o ciclo de Carnot, que recebe calor a temperatura do ponto de evaporação normal da água e que rejeite calor num reservatório a temperatura do ponto de fusão do gelo.

Observe que é impossível construir tal motor porque o ciclo de Carnot envolve somente processos reversíveis.

Assim, não é possível executar a experiência proposta mas podemos realizar uma especulação e adquirir algum conhecimento sobre a escala termodinâmica de temperatura.

Se o rendimento térmico de tal motor pudesse ser medido, obteríamos o valor de 26,80%.

Portanto

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_{\text{fusão do gelo}}}{T_{\text{evap. água}}} = 0,2680 \Rightarrow \frac{T_{\text{fusão do gelo}}}{T_{\text{evap. água}}} = 0,7320$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Isso nos fornece uma equação envolvendo as duas incógnitas T_H e T_L

A segunda equação provém de uma decisão arbitrária relativa à grandeza do grau na escala termodinâmica de temperatura.

Se desejamos ter a grandeza do grau na escala absoluta correspondendo à mesma grandeza do grau na escala Celsius, podemos escrever

$$T_{\text{evap. água}} - T_{\text{fusão do gelo}} = 100$$

Resolvendo essas duas equações

$$T_{\text{evap. água}} = 373,15\text{K} \quad ; \quad T_{\text{fusão do gelo}} = 273,15\text{K}$$

$$\text{Assim } T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 = T(\text{K})$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Conforme já foi observado, a medida dos rendimentos térmicos dos ciclos de Carnot não é, entretanto, uma maneira prática de abordar o problema da medida de temperatura na escala termodinâmica de temperatura.

A abordagem utilizada é baseada no termômetro de gás perfeito e num valor atribuído para o ponto triplo da água.

Na Décima Conferência de Pesos e Medidas, realizada em 1954, foi atribuído o valor de 273,15 K para a temperatura do ponto triplo da água.

O ponto triplo da água é aproximadamente 0,01 °C acima do ponto de fusão do gelo.

O ponto de fusão do gelo é definido como sendo a temperatura de uma mistura de gelo e água, à pressão de 1 atm (101,3 kPa), e em equilíbrio com ar que está saturado com vapor de água.

MÁQUINAS TÉRMICAS

ESCALA DE TEMPERATURA DE GÁS IDEAL

Essa escala é baseada no seguinte fato: à medida que a pressão de um gás tende a zero, a sua equação de estado tende à equação de estado do gás ideal, ou seja:

$$Pv = RT$$

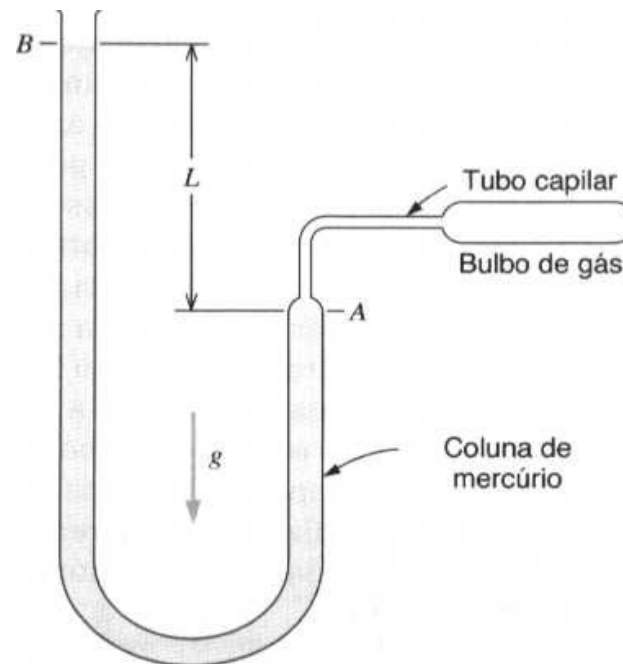
A temperatura de gás ideal satisfaz a definição de temperatura termodinâmica apresentada.

Um gás ideal pode ser usado para medir a temperatura num termômetro a gás de volume constante.

MÁQUINAS TÉRMICAS

O bulbo de gás é colocado no local onde a temperatura deve ser medida e, então, a coluna de mercúrio é ajustada de maneira que o nível de mercúrio fique na marca de referência A. Assim, o volume do gás permanece constante.

Admite-se que o gás no tubo capilar esteja à mesma temperatura do gás no bulbo. Então, a pressão do gás, correspondente à altura L da coluna de mercúrio, é uma indicação da temperatura.



$$Pv = RT$$

MÁQUINAS TÉRMICAS

Como referencial de temperatura, pode-se utilizar a temperatura do ponto triplo da água (273,16 K).

Desse modo, mede-se a pressão que está associada à temperatura desse ponto e designa-se essa pressão $P_{p.t}$.

Então, utilizando a definição de gás ideal, qualquer outra temperatura T pode ser determinada a partir da medida da pressão P por meio da relação:

$$T = 273,16 \left(\frac{P}{P_{p.t}} \right)$$

A escala de temperatura de gás perfeito é idêntica a escala de temperatura termodinâmica que foi definida na discussão sobre o ciclo de Carnot e a segunda lei da termodinâmica.

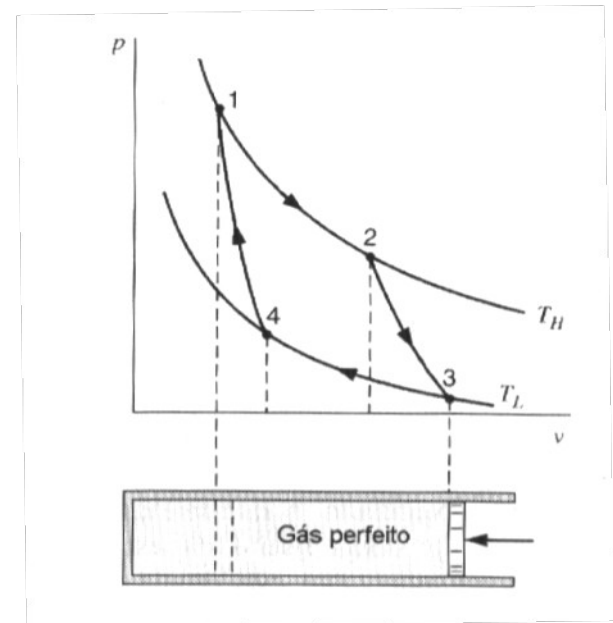
MÁQUINAS TÉRMICAS

Analizando os processos que o correm numa máquina térmica que opera segundo o ciclo de Carnot e que utiliza um gás perfeito como fluido de trabalho:

Os quatro processos que compõe um ciclo de Carnot, e os estados termodinâmicos 1, 2, 3 e 4.

Considerando que a massa de gás contida na câmara seja unitária, apenas para facilitar a análise, o trabalho reversível realizado no movimento de fronteira nos quatro processos podem ser calculados:

$$\delta w = p dv$$



MÁQUINAS TÉRMICAS

Como admitimos que o gás contido na câmara é perfeito, temos que o comportamento dele é dado por:

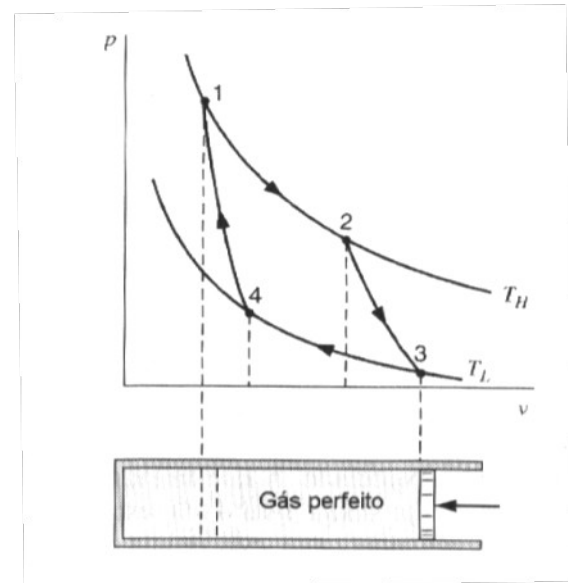
$$pv = RT$$

A energia interna pode ser calculada:

$$du = c_{v0} dT$$

Admitindo que as variações de energia cinética e potencial sejam desprezíveis, a equação da primeira lei da termodinâmica para uma massa unitária é:

$$\delta q = du + \delta w$$



MÁQUINAS TÉRMICAS

Utilizando as três primeiras equações, podemos reescrever a equação anterior do seguinte modo:

$$\delta q = c_{vo} dT + \frac{RT}{v} dv$$

Integrando a equação nos quatro processos que compõe o ciclo de Carnot:

Processo 1-2, transferência de calor isotérmica para o gás contido na câmara –

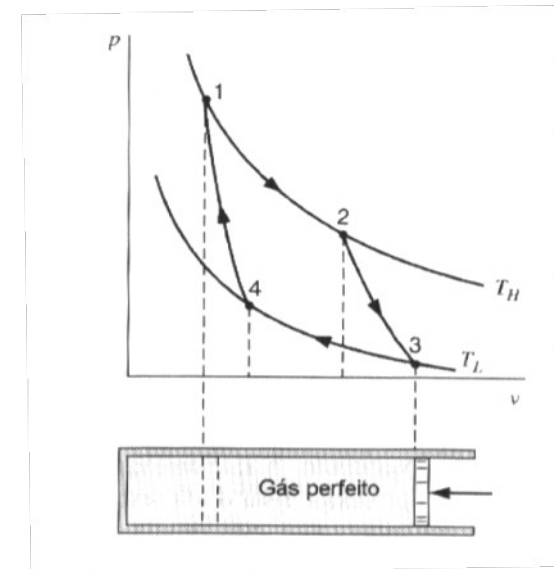
$$q_H = q_1 = 0 + RT_H \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Processo 2-3, expansão adiabática –

$$0 = \int_{T_H}^{T_L} \frac{c_{v0}}{T} dT + R \ln \frac{v_3}{v_2}$$

Processo 3-4, transferência de calor isotérmica –

$$q_L = q_3 = 0 - RT_L \ln \frac{v_4}{v_3} = RT_L \ln \frac{v_3}{v_4}$$



MÁQUINAS TÉRMICAS

Processo 4-1, compressão adiabática –

$$0 = \int_{T_L}^{T_H} \frac{C_{v0}}{T} dT + R \ln \frac{v_1}{v_4}$$

Então:

$$\int_{T_L}^{T_H} \frac{C_{v0}}{T} dT = -R \ln \frac{v_1}{v_4} = R \ln \frac{v_3}{v_2} \therefore \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1} \therefore \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\left\| \frac{q_H}{q_L} = \frac{RT_H \ln \frac{v_2}{v_1}}{RT_L \ln \frac{v_3}{v_4}} = \frac{T_H}{T_L} \right\|$$

