

Segunda Lei da Termodinâmica

Flaviano Williams Fernandes

Instituto Federal do Paraná
Campus Irati

14 de agosto de 2025

Sumário

- 1 **Transformações cíclicas**
- 2 **Máquinas térmicas**
- 3 **Entropia**
- 4 **Aplicações**
- 5 **Apêndice**

Diagrama pressão versus volume em processos cíclicos

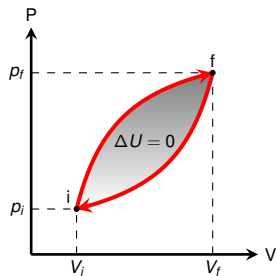
Corollary

Definimos como processo cíclico quando o gás retorna para o seu estado inicial.

A energia interna $U(T)$ de um gás é uma função da temperatura. Se os estados i e f estão em equilíbrio térmico, podemos determinar $U(T)$ sabendo a temperatura nesses estados, os valores **não irão mudar independente do processo termodinâmico** que esse gás poderá sofrer.

Corollary

Durante uma transformação cíclica, a variação da energia interna do gás será zero ($\Delta U = 0$).



Exemplo de processo cíclico.

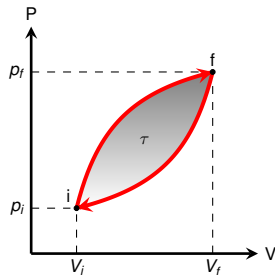
Trabalho realizado pelo gás em processos cíclicos

Podemos definir o trabalho total realizado pelo gás num processo cíclico subtraindo os trabalhos individuais nos processos de i para f e o retorno (f para i),

$$\tau = \tau_{(i \rightarrow f)} - \tau_{(f \rightarrow i)}.$$

Corollary

*Durante uma transformação cíclica, o trabalho realizado pelo gás, ao percorrer o ciclo, é fornecido pela **área entre as curvas**.*



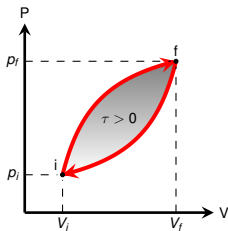
Representação de trabalho em um processo cíclico.

Trabalho e sentido do processo cíclico

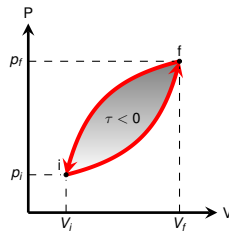
Corollary

O trabalho será positivo se o processo for no sentido horário.

O trabalho será negativo se o processo for no sentido anti-horário.



Sentido horário

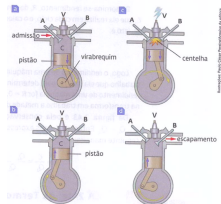


Sentido anti-horário

Definição de máquina térmica

Máquina térmica

Toda máquina térmica opera num processo cíclico, onde ela recebe calor Q_1 de uma fonte quente a temperatura T_1 e parte desse calor (Q_2) ela devolve para uma fonte fria que está a temperatura T_2 , onde $T_2 < T_1$.



Motor a combustão de 4 tempos

Corollary

Parte do calor recebido pela fonte quente é convertido em trabalho e o restante é desperdiçado para a fonte fria.

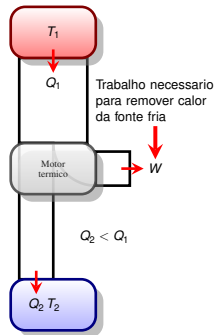
Aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica em máquinas térmicas

O calor total absorvido pelo gás durante o processo será o calor Q_1 recebido menos o calor Q_2 desperdiçado. Pela Primeira Lei da Termodinâmica temos

$$\Delta U = (Q_1 - Q_2) - \tau.$$

Mas $\Delta U = 0$ num processo cíclico, portanto

$$\tau = Q_1 - Q_2.$$



Representação de calor entrando (Q_1) e saindo (Q_2) do sistema.

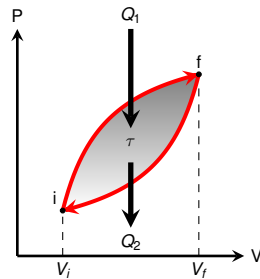
Rendimento de uma máquina térmica

Definimos o rendimento R de uma máquina térmica pela **quantidade de calor que ela consegue transformar em trabalho** à partir do calor que recebe da fonte quente,

$$R = \frac{\tau}{Q_1},$$

$$R = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

$$R = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow R < 1.$$



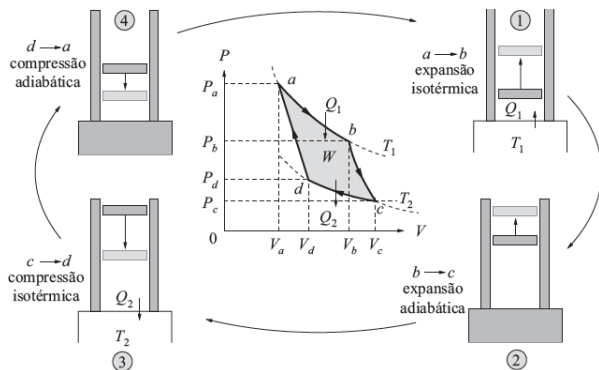
Representação de calor entrando (Q_1) e saindo (Q_2).

Corollary

O rendimento de uma máquina térmica será sempre menor que 1.

A máquina de Carnot

O rendimento de uma máquina depende do processo que ela realiza, então qual processo que teria o maior rendimento possível? A princípio uma máquina terá um maior rendimento se ela desperdiçar o mínimo de calor possível. De acordo com Carnot essa máquina funcionaria em um processo como mostrado ao lado.



Etapas de uma máquina de Carnot.

Rendimento de uma máquina de Carnot

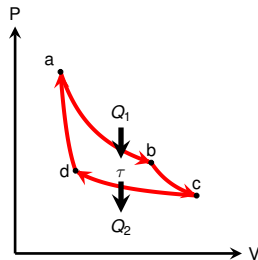
Uma máquina de Carnot é uma máquina térmica que funciona em um processo cíclico formado por dois processos isotérmicos mais dois processos adiabáticos.

Corollary

Nenhuma máquina térmica que opere entre duas fontes às temperaturas T_1 e T_2 , pode ter rendimento maior que uma máquina de Carnot operando entre essas mesmas fontes.

Rendimento de uma máquina de Carnot

$$R = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$



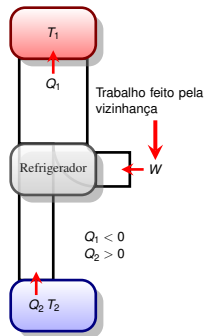
Representação gráfica de uma máquina de Carnot.

O esquema de um refrigerador

O objetivo de um refrigerador é remover calor de uma fonte fria e transferi-la para uma fonte mais quente. E para isso algo de fora (vizinhança) deve realizar trabalho sobre o gás empurrando o calor para a fonte quente. Portanto, um refrigerador seria uma máquina térmica funcionando no sentido contrário. O rendimento seria a capacidade de transferir calor Q_2 em relação ao trabalho τ associado a ele,

$$R = \frac{Q_2}{\tau},$$

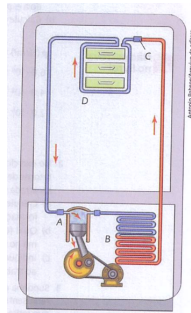
$$R = \frac{Q_2}{|Q_1 - Q_2|}.$$



Representação de calor Q_2 saindo de uma fonte fria e calor Q_1 transferida para a fonte quente.

Como funciona um refrigerador?

A figura ao lado mostra o diagrama de funcionamento de um refrigerador, que a princípio representa um processo cíclico no **sentido anti-horário**. Na serpentina B o gás é liquefeito devido a pressão produzida pelo compressor A. O líquido passando pelo estrangulamento em C sofre uma expansão, parte do líquido se transforma em vapor e com isso a sua temperatura diminui bruscamente. Em contato com o alimento em D, o líquido absorve calor Q_2 elevando a sua temperatura e transformando totalmente em vapor. O gás volta para o compressor onde é comprimido, e com isso retorna para o estado líquido. Neste processo o gás libera calor Q_1 para o ambiente.



Princípio de funcionamento de um refrigerador [1].

O que é entropia?

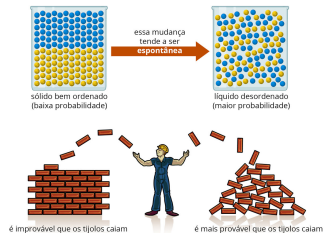
Entropia

A entropia, definida pela letra S, está associada com o grau de desordem de um sistema. No SI a unidade de medida da entropia é Joule por Kelvin (J/K).

Por exemplo, se o processo ocorre sem variar a sua temperatura (isotérmico) a variação da entropia ΔS associado ao sistema será

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

onde Q é a quantidade de calor que o sistema irá receber ou ceder e T a sua temperatura.



Exemplo de entropia usando tijolos.

Variação da entropia do universo

Segunda lei da termodinâmica

Na natureza, a entropia total, **que é a soma da entropia do sistema com a vizinhança**, sempre aumenta.

Definindo ΔS_u como a variação da entropia do universo, ΔS_s a variação de entropia do sistema e ΔS_v a variação da entropia da vizinhança, onde

$$\Delta S_u = \Delta S_s + \Delta S_v,$$

podemos dizer que para qualquer fenômeno que ocorre na natureza ΔS_u será sempre maior ou no mínimo igual a zero ($\Delta S_u \geq 0$).

Entropia e máquinas térmicas

No ciclo de Carnot temos que a variação da entropia ΔS nos processos adiabáticos é zero, pois $Q=0$. Sabendo que nos processos isotérmicos temos $\Delta S = \frac{Q}{T}$ e que $\Delta S_{\text{Total}} \geq 0$. Se $\Delta S_{\text{sistema}} = 0$ temos

$$\Delta S_{\text{sistema}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 0,$$

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0,$$
$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}.$$

Sabemos que $T_1 \neq 0$ e $T_2 \neq 0$, portanto a única maneira de termos $Q_2 = 0$ é se $Q_1 = 0$ (**uma máquina que não existe!**).

Corollary

A segunda lei da termodinâmica impede que todo calor Q_1 recebido pela máquina térmica seja inteiramente convertido na forma de trabalho.

Terceira lei da Termodinâmica

Terceira lei da termodinâmica

A entropia de qualquer sistema somente se anula no zero absoluto.

A entropia está associado com o grau de desordem de um sistema, ou seja, em um sistema constituído por átomos, a entropia aumenta com o seu grau de movimentação. Em $T = 0 \text{ K}$ as vibrações cessariam, o que causaria um valor praticamente nulo para a entropia. Porém, **pelas leis da física quântica tal estado é impossível de ser alcançado.**

No caso da máquina de Carnot, se $S \rightarrow 0$ teremos $\Delta S = Q/T \rightarrow 0$, e assim poderemos ter $Q_2 \rightarrow 0$ se $T_2 \rightarrow 0$. Portanto qualquer máquina térmica ao atingir o zero absoluto conseguiria converter todo o calor que recebe em trabalho, e o seu rendimento seria 100%.

Alfabeto grego

Alfa	A	α
Beta	B	β
Gama	Γ	γ
Delta	Δ	δ
Epsílon	E	ϵ, ε
Zeta	Z	ζ
Eta	H	η
Teta	Θ	θ
Iota	I	ι
Capa	K	κ
Lambda	Λ	λ
Mi	M	μ

Ni	N	ν
Csi	Ξ	ξ
ômicon	O	o
Pi	Π	π
Rô	P	ρ
Sigma	Σ	σ
Tau	T	τ
Ípsilon	Υ	υ
Fi	Φ	ϕ, φ
Qui	X	χ
Psi	Ψ	ψ
Ômega	Ω	ω

Referências e observações¹

 A. Máximo, B. Alvarenga, C. Guimarães, Física. Contexto e aplicações, v.2, 2.ed., São Paulo, Scipione (2016)

Esta apresentação está disponível para download no endereço
<https://flavianowilliams.github.io/education>

¹Este material está sujeito a modificações. Recomenda-se acompanhamento permanente.