



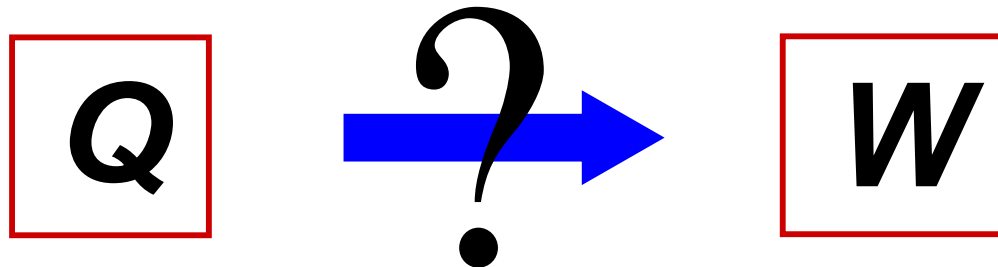
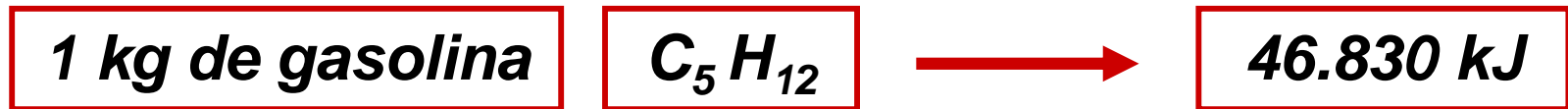
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
*Campus São Paulo*

## ***2ª Lei da Termodinâmica***

***ENTROPIA***

***Seria possível transformar em Trabalho Mecânico ( $W$ ) toda a energia ( $Q$ ) armazenada em uma certa quantidade de combustível,***

***isto é, um rendimento de 100% para uma máquina térmica?***

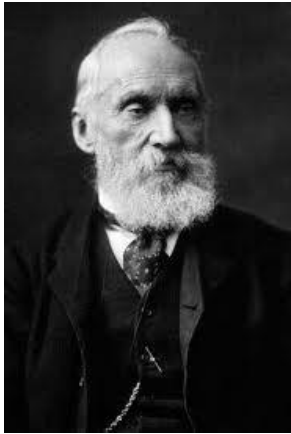


$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{comb}}}$$

## Personagens principais

### **Enunciado da 2ª lei, por Kelvin-Planck**

“É impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico, cujo **único efeito** seja a produção de trabalho às custas da energia na forma de calor, retirada de uma única fonte térmica.”



William Thomson

**Lord Kelvin**

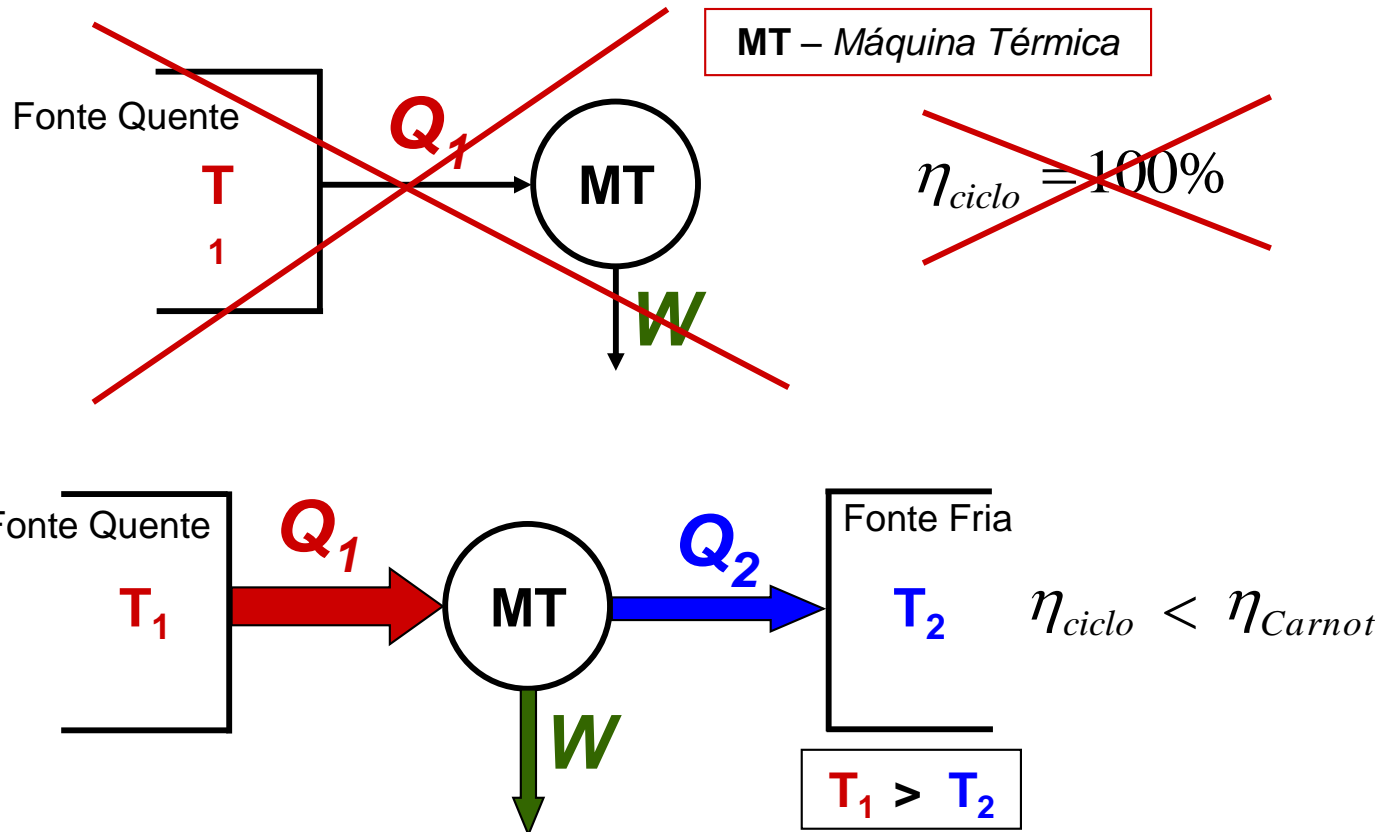
1824 - 1907

(1855)



Max K. E. L. Planck

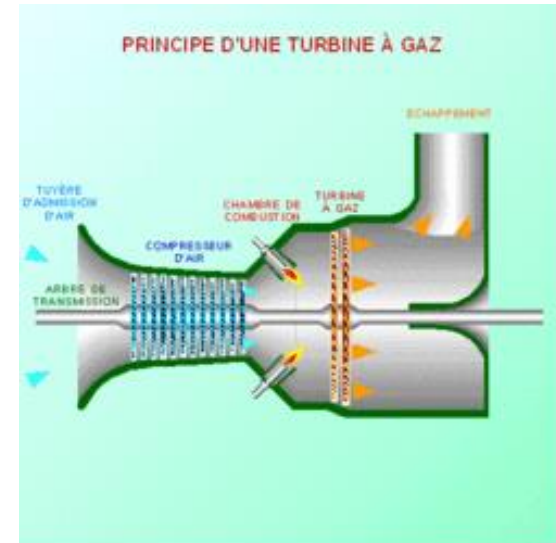
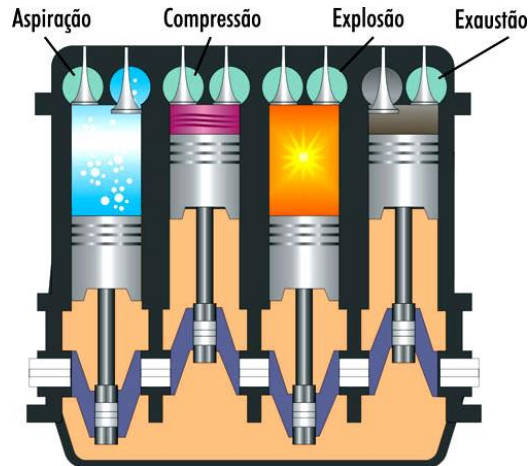
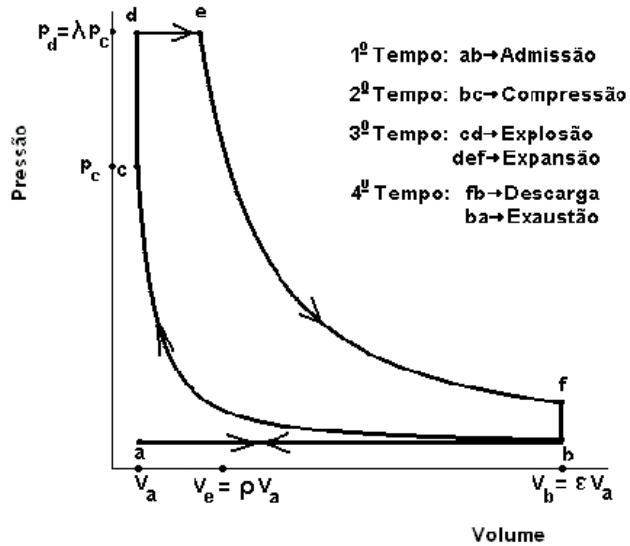
1858 - 1947



# Aplicações Tecnológicas

## • Motor de Combustão Interna

Ciclo de Otto real



## Rendimento (ou Eficiência) Termodinâmico(a)

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

e, pela 2ª lei, < 100% !!

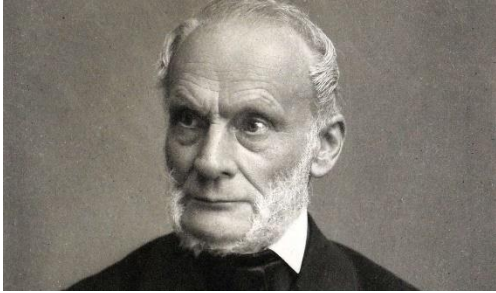
### Exercícios

1. **UFPI 2001** - A eficiência de um motor térmico é definida como a razão entre o trabalho por ele realizado e o calor por ele recebido durante um ciclo completo de seu funcionamento. Considere um motor que recebe 440 J de calor por ciclo, que tem uma eficiência de 30% e que completa um ciclo de funcionamento a cada 0,02 segundos. Determine a potência fornecida por esse motor.
2. Uma turbina a gás tem uma eficiência térmica igual a 17%, enquanto ela desenvolve cerca de 6.000 kW de potência. Determine o consumo de gás, em litros por minuto, sabendo-se que o combustível tem um poder calorífico igual a 46.000 kJ/kg e sua massa específica é igual a 0,8 g/cm<sup>3</sup>. **Resp.: 57,5 litros/min**
3. Um automóvel consome combustível à taxa de 20 litros por hora e desenvolve cerca de 60 kW de potência nas rodas. Se o poder calorífico do combustível utilizado for igual a 44.000 kJ/kg e sua massa específica for igual a 0,8 g/cm<sup>3</sup>, determine a eficiência do motor. **Resp.: 30,7%**

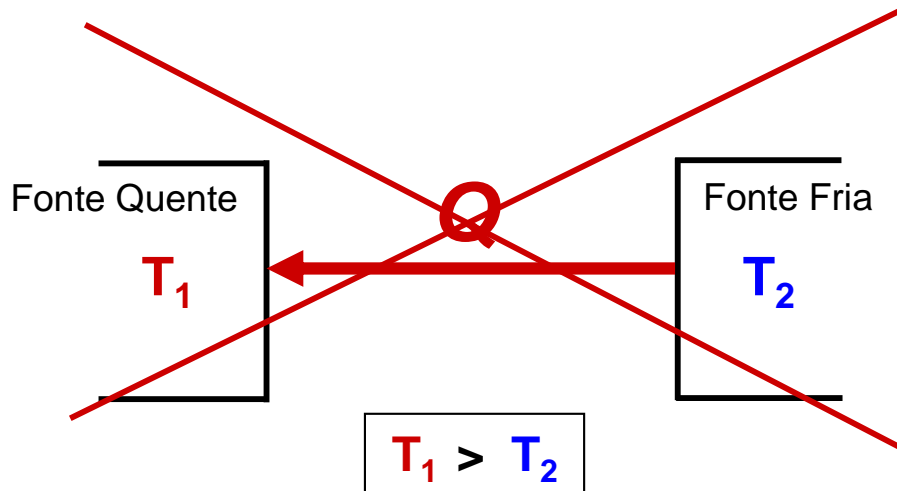
# Personagem principal

## Enunciado da 2ª lei, por Clausius

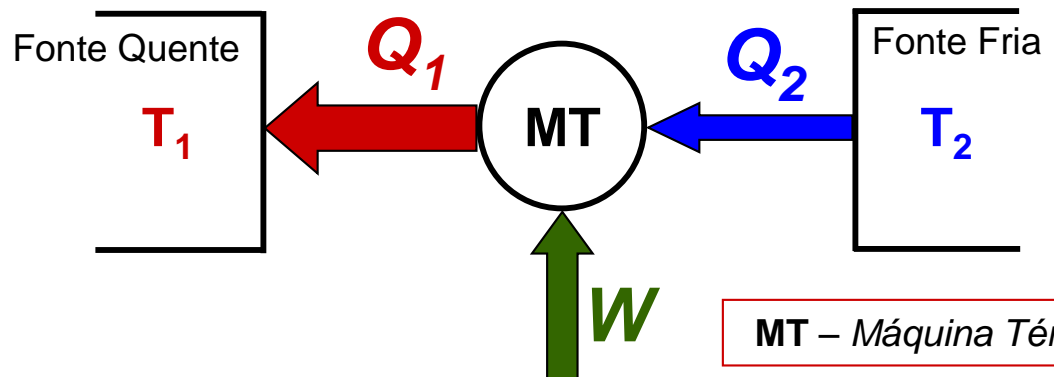
“É impossível haver transferência espontânea de calor de um objeto frio para outro mais quente.”



Rudolf J. E. Clausius  
1822 - 1888  
(1855)

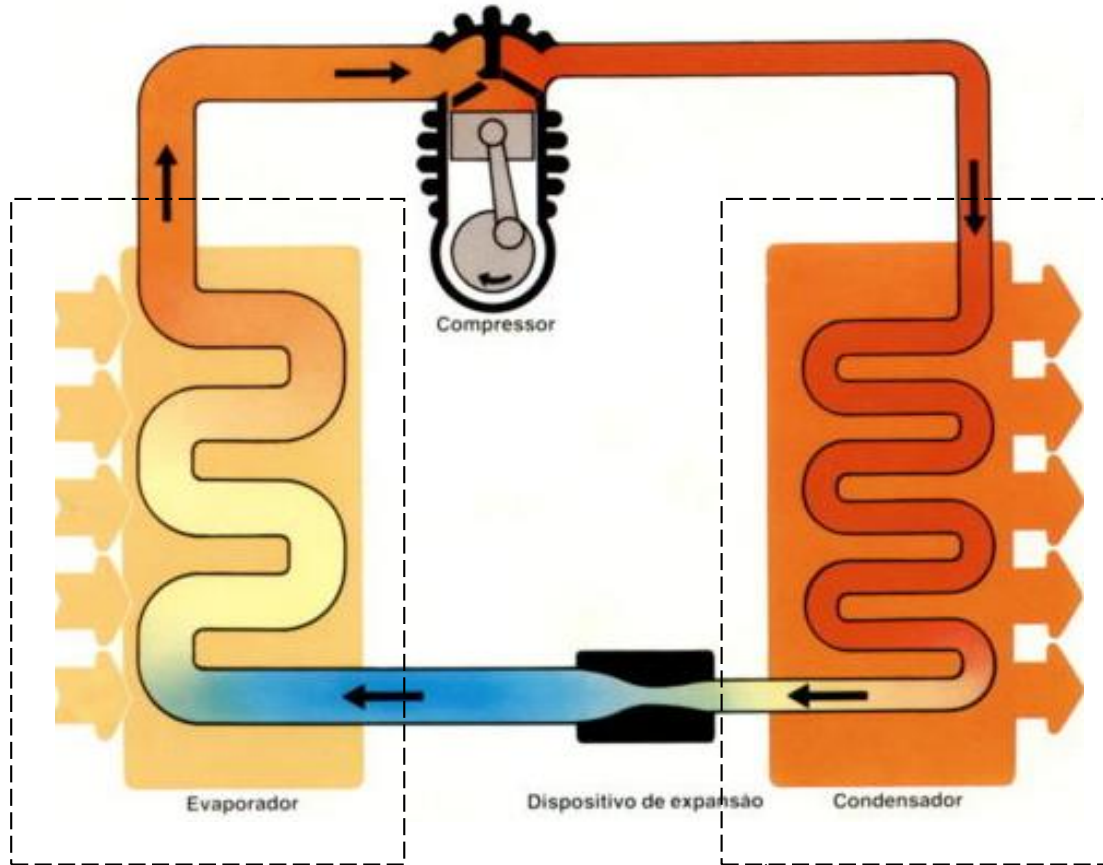


*Princípio do Refrigerador*



# Aplicações Tecnológicas

## • Ciclo de Resfriamento



Interior da geladeira, do congelador ou do freezer.

Parte de trás do refrigerador

Ar Condicionado Split Dual Inverter LG Art Cool 18000 BTUs Q/F 220V S4-W18KLRPA



Geladeira Brastemp Frost Free Duplex 400 litros cor Inox com Freeze Control - 110V

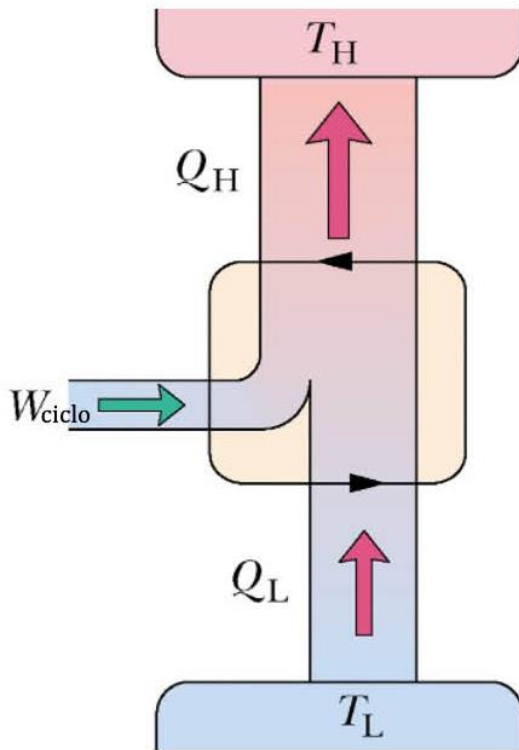


# Propriedades Físicas de Gases Refrigerantes

Para ser um bom gás refrigerante, a substância deve apresentar as seguintes propriedades:

Liquefazer-se (condensar-se) a pressões moderadas; Evaporar-se a pressões acima da pressão atmosférica; Ter pequeno volume específico (pequeno volume em relação ao seu peso); Ter um elevado calor latente de vaporização; Ser quimicamente estável (não se alterar, mesmo com repetidas mudanças de estado no ciclo); Não ser corrosivo; Não ser inflamável; Não ser tóxico; Permitir fácil localização de vazamento; Não atacar o óleo lubrificante ou provocar qualquer efeito indesejável em outros componentes do ciclo de refrigeração; Não atacar os deteriorar alimentos, em caso de vazamento.

Tabela 1. Características dos refrigerantes sintéticos e naturais, com destaque ao R717 e R744.



Refrigerantes	R22	R404A	R507A	R134a	R410A	R407C	R422D	R427A	R717	R744	R290	R1270
Substância Natural	não	não	não	não	não	não	não	não	sim	sim	sim	sim
Nome Comercial	-	-	-	-	-	-	Isoson MO29	FX100	Amônia	Dióxido Carbono	Propano	Propileno
Fabricante	vários	vários	vários	vários	vários	vários	DuPont	Arkema	vários	vários	vários	vários
Composição química	CH F <sub>2</sub> Cl	R143a/R125/R134a	R143a/R125	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	R32/R125	R32/R125/R134a	R125/R134a/R600a	R32/R125/R143a/R134a	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Destruição Camada Ozônio (ODP)*	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potencial Aquecimento Global (GWP)**	1500	3260	3300	1300	1725	1525	2230	1830	0	1	3	3
Temperatura Glide (K)	0	0,7	0	0	0,2	7,4	4,5	7,1	0	0	0	0
Ponto de Ebulição (°C)	-40,86	-47,0	-47,0	-26,07	-51,0	-40,0	-45,0	-43,0	-33,0	-57,0 (sublim.)	-42,0	-47,7
Temperatura Crítica (°C)	96,15	73,0	71,0	101,15	72,0	86,0	81,0	87,0	133,0	31,0	96,7	92,4
Pressão Crítica (bar)	50,54	37,8	37,9	40,67	49,5	46,5	39,06	44,0	113,5	73,8	42,48	46,65
Inflamabilidade	não	não	não	não	não	não	não	não	baixa	não	alta	alta
Toxicidade	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	baixa	alta	baixa	baixa	baixa
Tipo de óleo lubrificante**	MO/AB/MO+AB	POE	POE	POE	POE	POE	MO/AB/POE	MO/AB/POE	MO/PAO	POE	MO/PAO/POE	MO/PAO/POE
Tipo de aplicação****	HT / MT / LT	MT / LT	MT / LT	HT	HT	HT	HT / MT / LT	HT / MT / LT	HT / MT / LT (Sist. Indiretos)	MT e LT	HT / MT / LT (Sist. Indiretos)	MT / LT (Sist. Indiretos)
Custo Relativo Refrigerante / Kg	1	3	4	2	4	3	8	10	0,1	0,1	0,1	0,1
Eficiência Energética Relativa Média (%)	100	99	102	97	95	100	95	95	105	120 (operação subcrítica)	102	101
Equipamentos (Retrofit)	—————	Novos	Novos	Novos	Novos	Novos	Existentes	Existentes	Novos	Novos	Novos	Novos



# Coeficiente de Performance (COP)

$$COP = \frac{|Q_2|}{|W|} = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|}$$

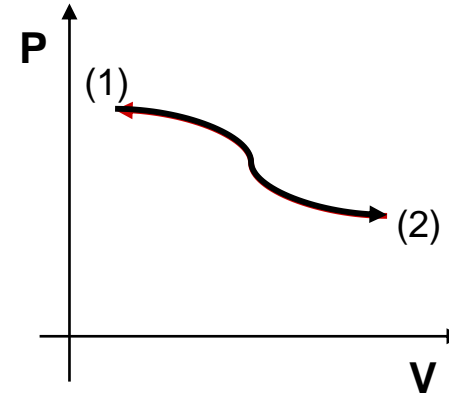
e, pela 2ª lei, **> 1 !!**

## Exercício

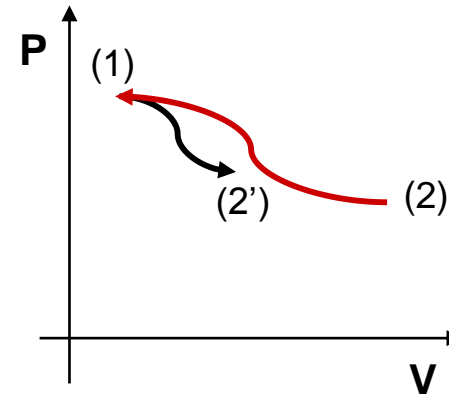
4. Uma bomba de calor, isto é, um condicionador de ar, com COP igual a 3,2 é usada para aquecer uma casa. Durante sua operação, a bomba consome cerca de 5 kW. Se a temperatura da casa for igual a 7°C, quanto tempo irá demorar para que a temperatura interna da casa alcance 22°C? Considere que a massa inteira da casa (ar interno, ocupantes, mobília etc) seja equivalente a cerca de 1.500 kg de ar. Considere o calor específico do ar à pressão constante,  $c_p$ , igual a 1,0048 kJ/kg°C. **Resp.: 1.012 s.**

# Isto poderia ser possível?

## Reversibilidade



## Irreversibilidade



- Presença de atritos mecânicos e fluidos → Calor
- Processos de troca térmica entre substâncias a temperaturas diferentes
- A transformação deve ser extremamente lenta (ou *quase-estática*)

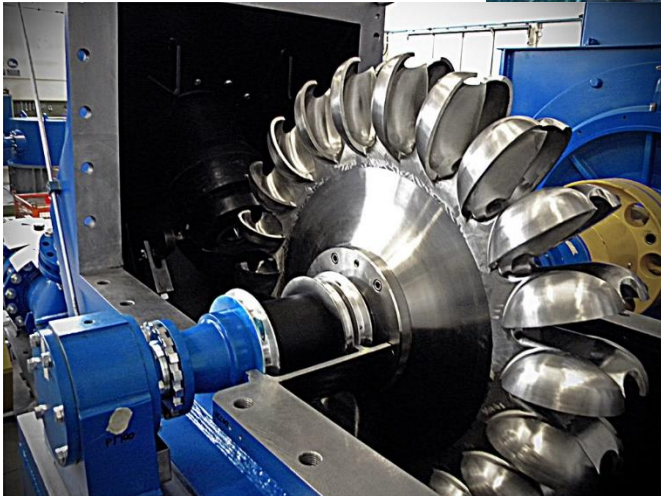
# As ideias de Carnot



N. L. Sadi [Carnot](#)  
1796 - 1832



Cachoeira do Evilson  
Taquaruçu, TO

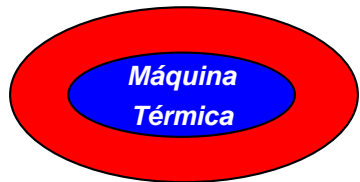


***“O calórico se conserva.”***  
**Sem máquina → eficiência = 0**  
**Com máquina → eficiência > 0**

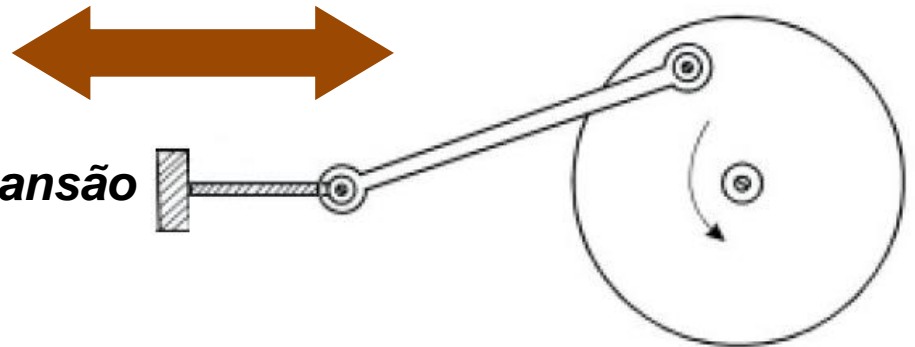
**Reservatório Térmico**  
(Fonte Quente,  $T_Q$ )

Mecanismo que transforma um movimento de vaivém em movimento de rotação

**Contração**



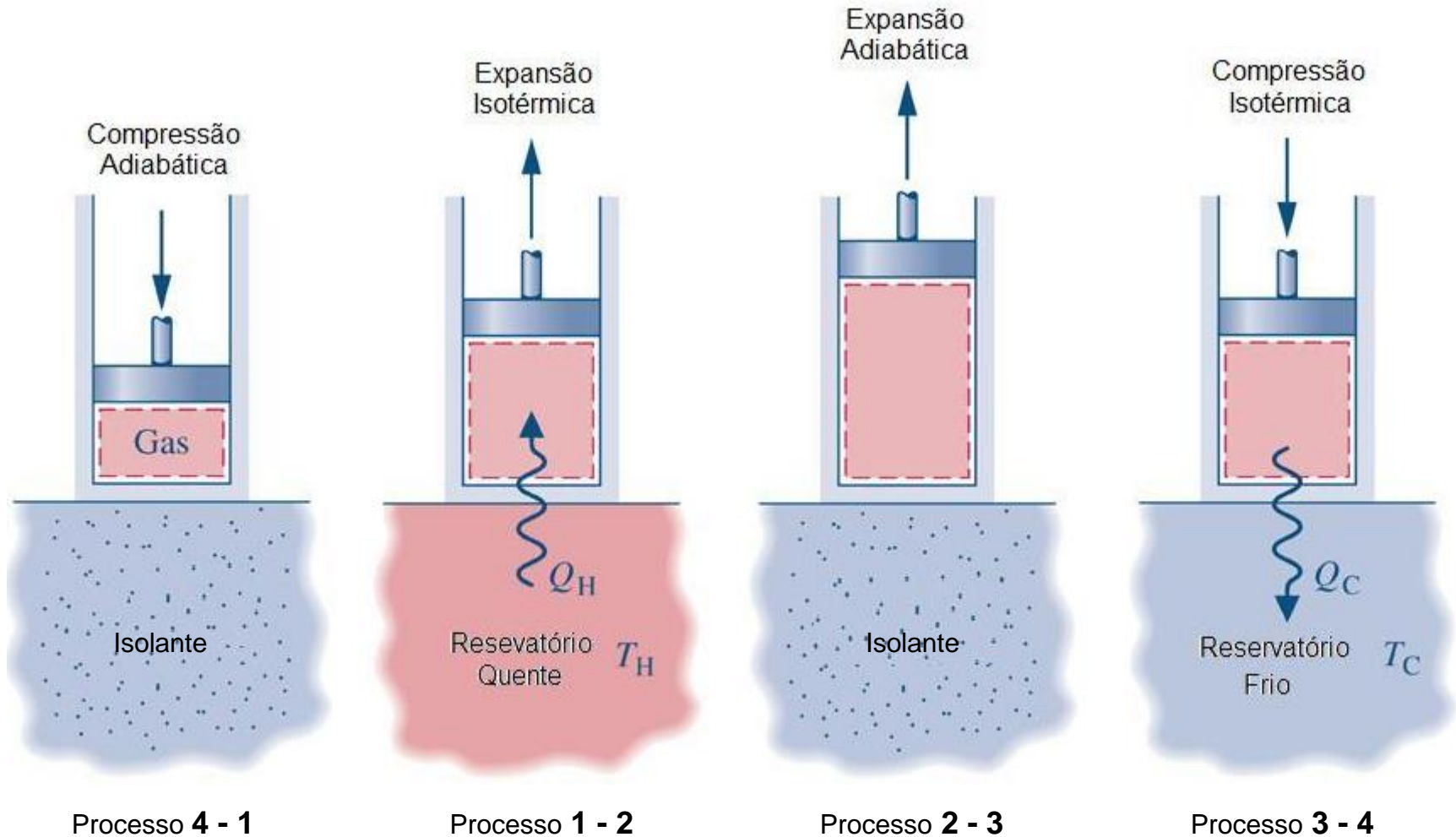
**Expansão**



**Reservatório Térmico**  
(Fonte Fria,  $T_F$ )

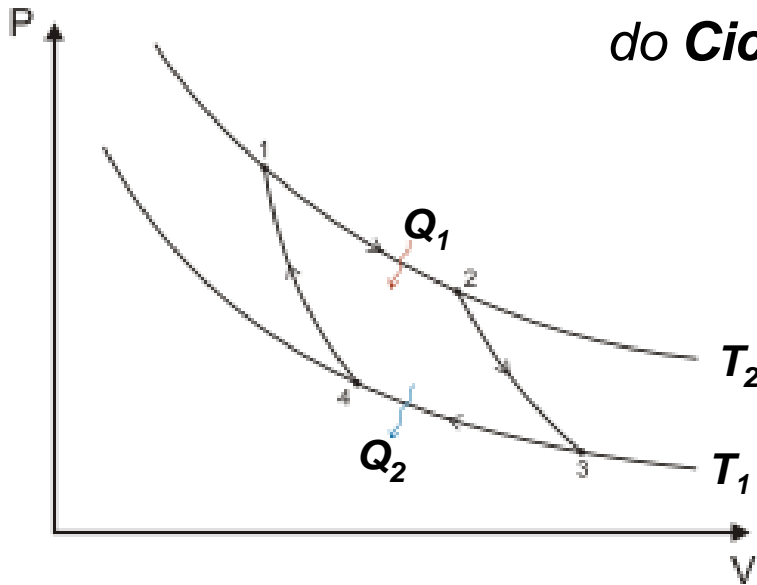
isto é, uma máquina que transforma energia química do combustível em energia mecânica (trabalho).

# O Ciclo de Carnot (para motor térmico)



H  $\rightarrow$  hot (2)

C  $\rightarrow$  cool (1)



do **Ciclo de Carnot**,

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

onde  $Q_2$  está em módulo!!!

1 → 2: Transf. Isotérmica Reversível ( $T_2$ )

2 → 3: Transf. Adiabática Reversível

3 → 4: Transf. Isotérmica Reversível ( $T_1$ )

4 → 1: Transf. Adiabática Reversível

Definição geral:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W}{Q_1} \rightarrow \eta_{ciclo} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \rightarrow \eta_{ciclo} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \rightarrow$$

$$\eta_{ciclo} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

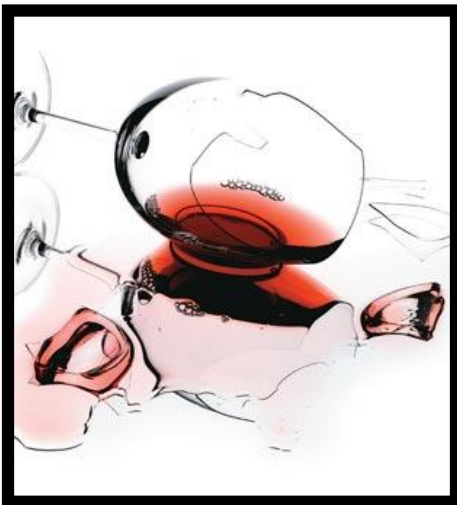
< 100%, e

independe da substância!!

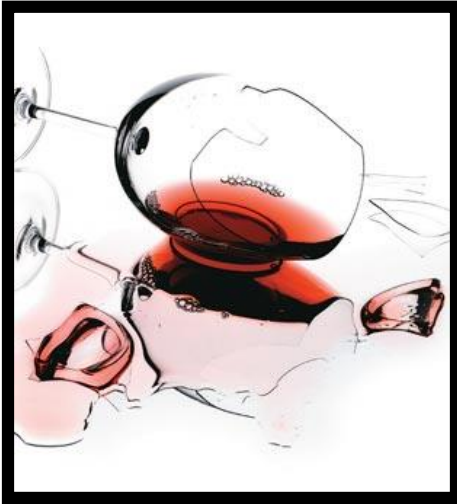
**Rendimento de Carnot (máximo)**

Qual seria a sequência natural (ou espontânea) dos eventos?

Possibilidade 1



## Possibilidade 2



1



2



3



4



5



6



## Possibilidade 3



1



3



4



2



5

*Existiriam outras possibilidades?*

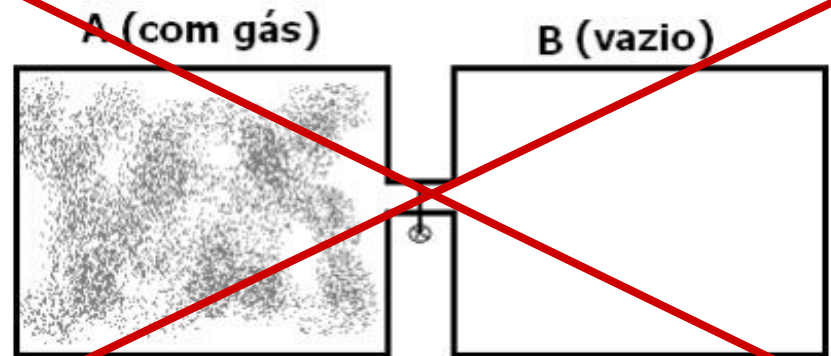
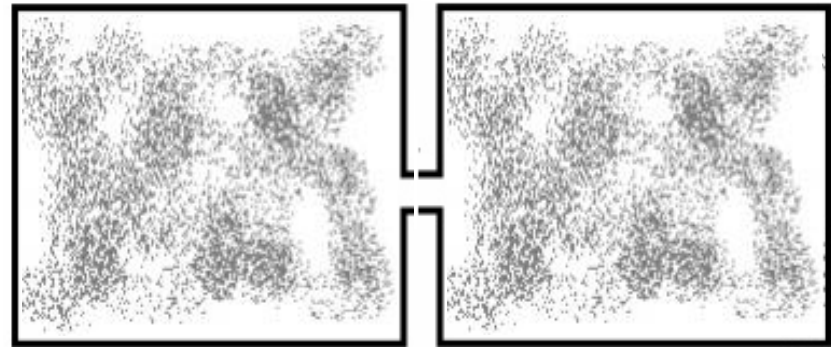
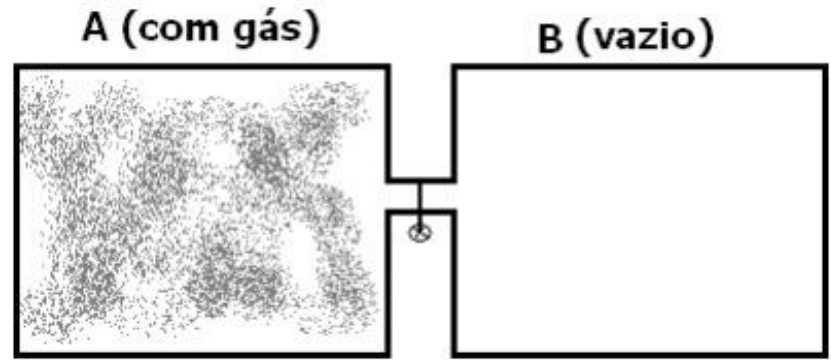
# Outra observação...

$$\Delta t_1 \ll \ll \Delta t_2$$

$$\Delta t_2 \rightarrow \infty$$

$\Delta t_2$

$\Delta t_1$



## **Definição**

**Entropia** é a grandeza termodinâmica que mede o grau de irreversibilidade (ou de desordem) de um sistema.

**2ª Lei da Termodinâmica**: “Em um sistema termicamente isolado, a medida da entropia deve sempre aumentar com o tempo, até atingir o seu valor máximo.”

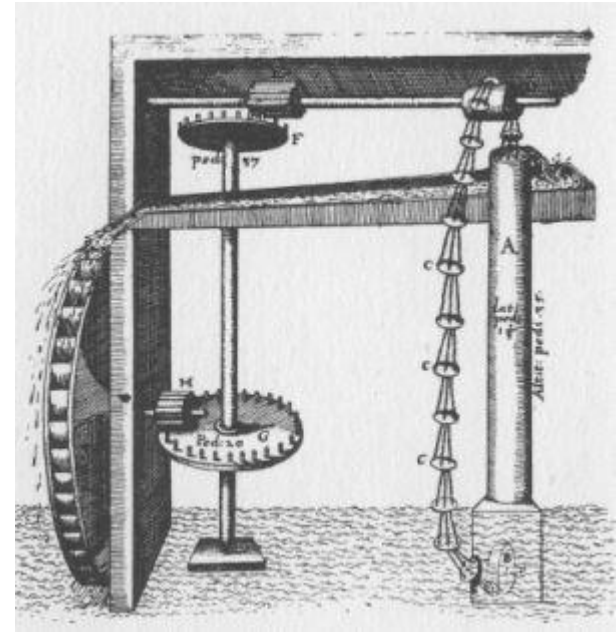
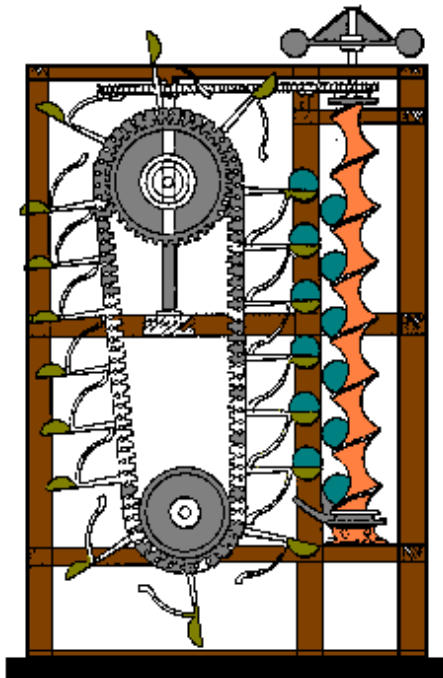
Propriedades fundamentais da **Entropia**

- 1) A entropia de um sistema isolado é aumentada para qualquer transformação **natural** (ou espontânea) que ocorra em seu interior;
- 2) A entropia de um sistema isolado tem um valor máximo no equilíbrio.

# Moto Perpétuo



Frasco com autofluxo  
*Robert Boyle*



Dispositivos de **MP** do primeiro tipo (ou de primeira espécie), que violam a primeira lei da termodinâmica (*Conservação da Energia*).

***Eles produzem mais energia que recebem.***

Dispositivos de **MP** do segundo tipo (ou de segunda espécie), que violam a segunda lei de termodinâmica (*Entropia*).

***Eles envolvem mudanças nulas ou negativas da entropia.***

## **Referências Sitigráficas**

[http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/NotasdeAula\\_2aLei.doc.pdf](http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/NotasdeAula_2aLei.doc.pdf)

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Segunda\\_lei\\_da\\_termodin%C3%A2mica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Segunda_lei_da_termodin%C3%A2mica)

[http://www.empresastuma.com.br/empresas\\_tuma/emacs/utilidades/utilidades\\_02.asp](http://www.empresastuma.com.br/empresas_tuma/emacs/utilidades/utilidades_02.asp)

[www.fem.unicamp.br/~em672/Ciclo\\_Refrigeracao\\_Refrigerantes.doc](http://www.fem.unicamp.br/~em672/Ciclo_Refrigeracao_Refrigerantes.doc)

<http://www.fsc.ufsc.br/~tati/disciplinas/fsc5163/20071/fsc5163-entropia-2aleiterm-20071.pdf>

[http://wwwusers.rdc.puc-rio.br/wbraga/fentran/termo/listas/lista\\_eficiencia.PDF](http://wwwusers.rdc.puc-rio.br/wbraga/fentran/termo/listas/lista_eficiencia.PDF)

<http://www.seara.ufc.br/donafifi/entropia/entropia0.htm>

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Entropia>

<http://www.ecientificocultural.com/Usenet/term07.htm>

<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/dilatacao/entropia.php>

<http://www.vanzolini-ead.org.br/pecem/fis/fisica1.htm>

[http://www.feiradeciencias.com.br/sala25/25\\_MP\\_01.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala25/25_MP_01.asp)

[http://www.fsc.ufsc.br/~bechtold/apresentacao\\_entropia.pdf](http://www.fsc.ufsc.br/~bechtold/apresentacao_entropia.pdf)

<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=15&top=168>

<http://www.seara.ufc.br/donafifi/donafifi.htm>

[http://www.cce.ufes.br/jair/termo/Aula06\\_2aLei.pdf](http://www.cce.ufes.br/jair/termo/Aula06_2aLei.pdf)

[http://www.refrigeracao.net/Topicos/refrigerante\\_2.htm](http://www.refrigeracao.net/Topicos/refrigerante_2.htm)

<http://www.edumedia-share.com/media.php?id=966>

<https://docplayer.com.br/70339894-Modulo-ii-processo-reversivel-e-irreversivel-ciclos-potencia-refrigeracao-e-bomba-de-calor-de-carnot.html>

<http://refrigerandomundo.blogspot.com/2016/09/ciclofrigorifico-para-finalizarmos-o.html>

<https://megavaleweb.blogspot.com/2017/08/eng-mecanica-aula-0-maquinas-de-fluxo.html>

<https://conhecimentocientifico.com/ciclo-de-carnot-maquina-de-carnot/>