

CURSO INTENSIVO

# TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA

## INTRODUÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS

Paulo Seleglim Jr.  
Universidade de São Paulo

# Termodinâmica:

estudo dos processos de transformação de  
uma substância e das trocas energéticas  
associadas...



Energia ↔ Transformação (S ↓)

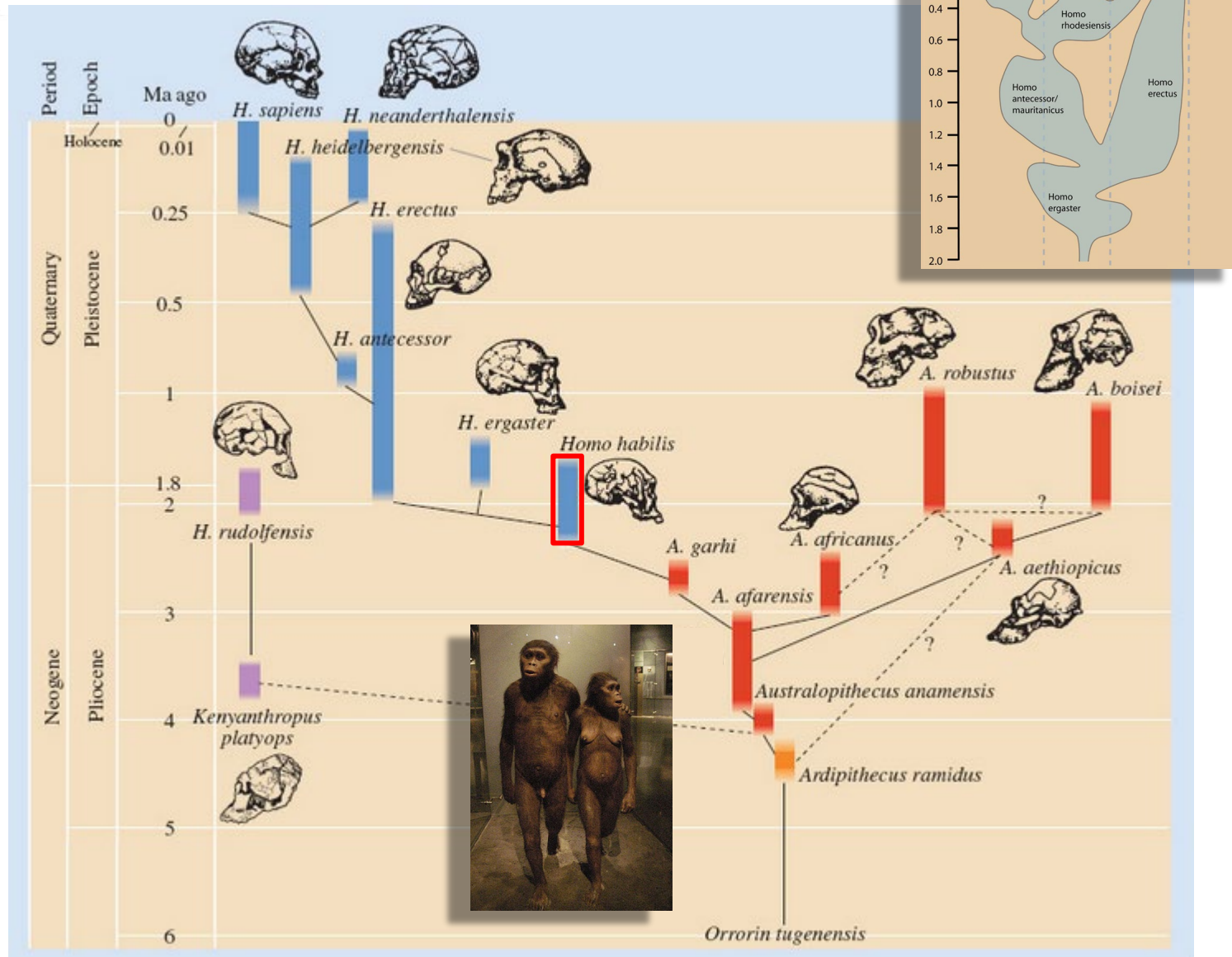


$$\frac{2500 \text{ kcal}}{1 \text{ dia}} \times \frac{4.18 \text{ Joules}}{1 \text{ cal}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}}$$

$$= 120,95 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$



**60 → 120 w**  
metabolismo



Natural History Museum NYC  
Lucy: Australopithecus afarensis



$$\frac{2500 \text{ kcal}}{1 \text{ dia}} \times \frac{4.18 \text{ Joules}}{1 \text{ cal}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}}$$

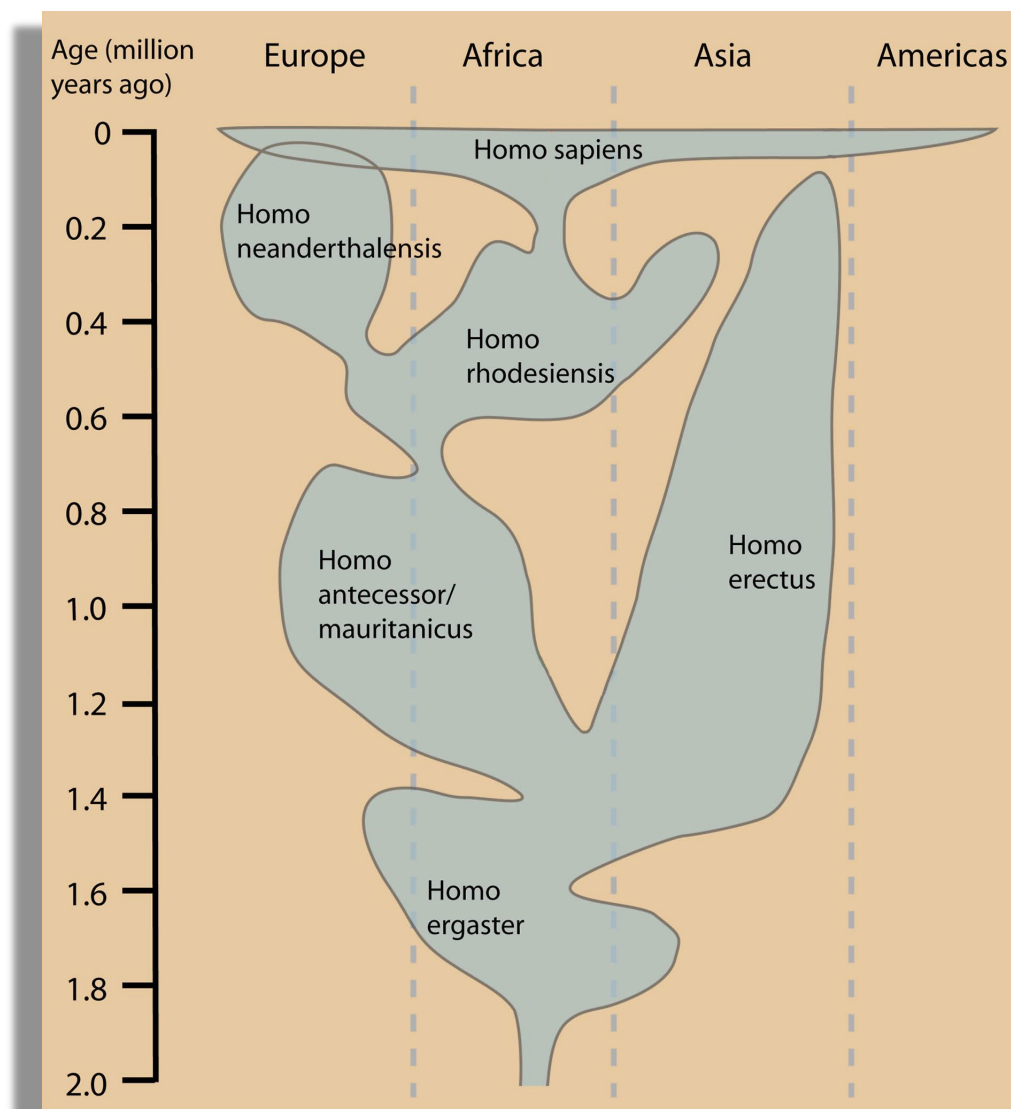
$$= 120,95 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$



**60 → 120 w**  
metabolismo



**300 w**



**Cocção de Alimentos...**

**Novos de materiais...**

**Desenvolvimento de ferramentas...**



**60 → 120 w**

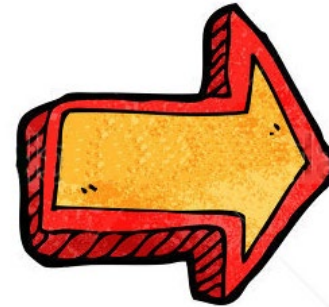
metabolismo



**300 w**

**Estabilidade Climática**

**10.000 anos**



**5000 w**

**Cocção de Alimentos...**

**Novos de materiais...**

**Desenvolvimento de ferramentas...**

Canadá:	10.000W
França:	5.300W
Brasil:	1.800W
Índia:	750W
Afganistão:	120W



## Energia e desenvolvimento social

### Avanços disruptivos no uso da energia

- ✓ domínio do fogo para a cocção dos alimentos
- ✓ tecnologias para uso do vento na propulsão de navios
- ✓ conversão de calor em trabalho (força  $\times$  deslocamento)
- ✓ desenvolvimento de motores de uso geral
- ✓ máquinas de usinagem, teares, tratores, escavadeiras, etc...

# REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

# Energia e desenvolvimento social

## Avanços disruptivos no uso da energia

**ENERGIA  
DESORGANIZADA**



**ENERGIA  
ORGANIZADA**

- ✓ domínio do fogo para a cocção dos alimentos
- ✓ tecnologias para uso do vento na propulsão de navios
- ✓ conversão de calor em trabalho (força × deslocamento)
- ✓ desenvolvimento de motores de uso geral
- ✓ máquinas de usinagem, teares, tratores, escavadeiras, etc...

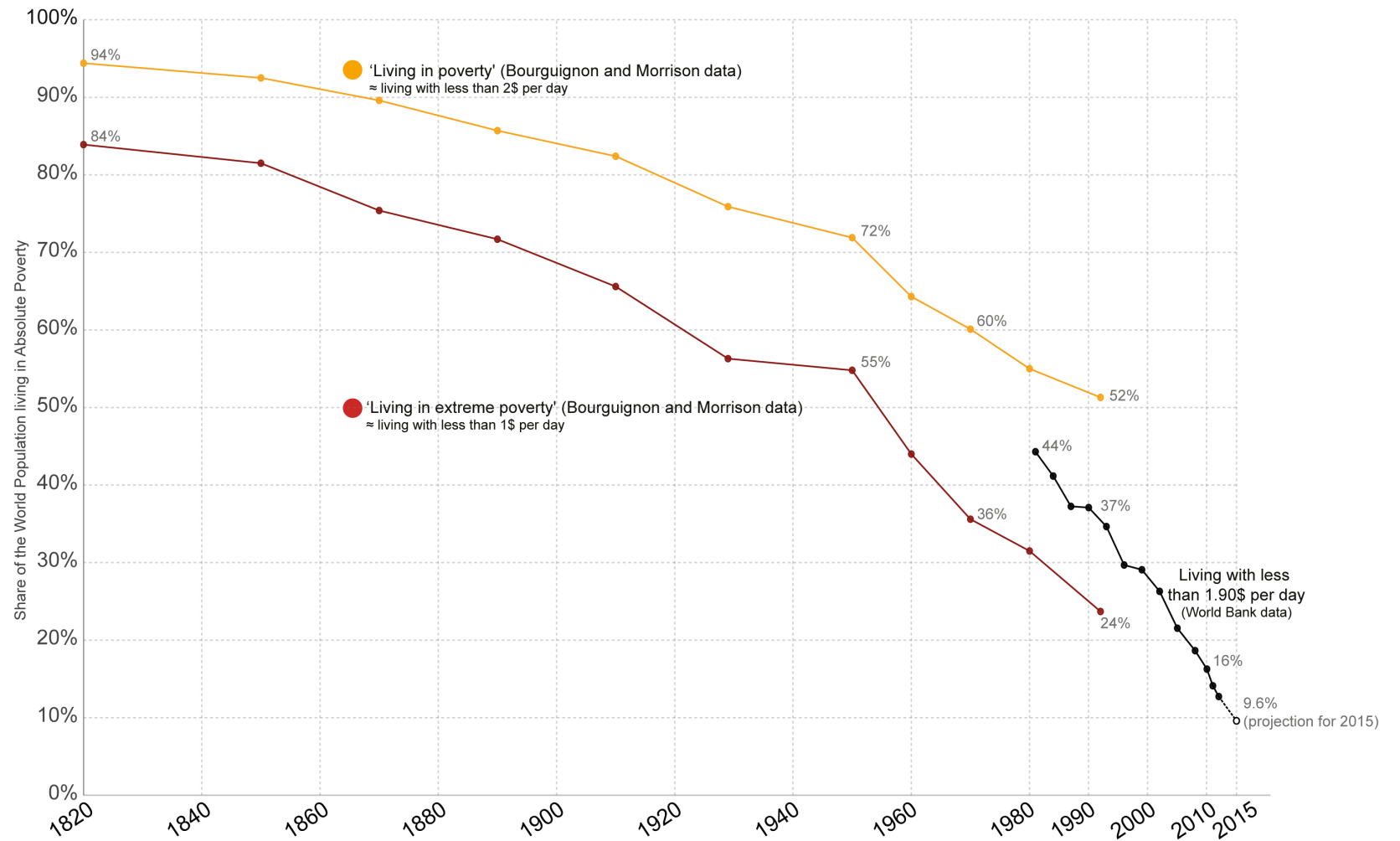
# REVOLUÇÃO INDUSTRIAL





# Share of the World Population living in Absolute Poverty, 1820-2015

All data are adjusted for inflation over time and for price differences between countries (PPP adjustment).



Data sources: 1820-1992 Bourguignon and Morrison (2002) - Inequality among World Citizens, In The American Economic Review; 1981-2015 World Bank (PovcalNet)

The interactive data visualisation is available at [OurWorldinData.org](http://OurWorldinData.org). There you find the raw data and more visualisations on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.



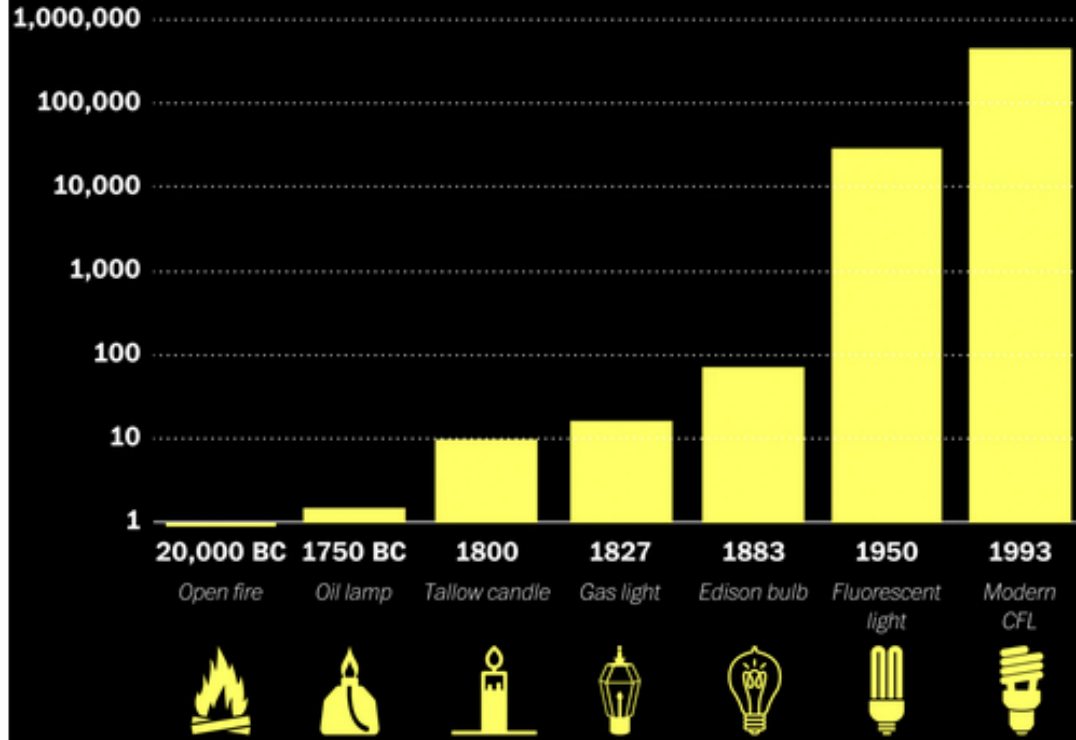




## A light in the darkness

How many hours of light (equivalent to burning one modern light bulb) that 60 hours of labor would get you throughout history.

Note: log scale



WAPO.ST/WONKBLOG

Source: William Nordhaus

Icons by Megan Hillman, Valere Dayan, Yo! Baba, Royyan Wijaya, Anthony Bossard, Shashank Singh and Ken Murray, the Noun Project

### Do Real Income and Real Wage Measures Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not

William D. Nordhaus<sup>1</sup>  
Yale University and the NBER  
(11/11/09/10/11)

#### 1. The Achilles Heel of Real Output and Wage Measures

Studies of the growth of real output or real wages reveal almost two centuries of rapid growth for the United States and Western Europe. As Figure 1 shows, real incomes (measured either as real wages or per capita GNP) have grown by a factor of between 13 and 18 since the first half of the 19th century. An examination of the growth in real wages indicates that real wages grew around 1 percent annual for three of the half-centuries and much faster for the first half of the 20th century.

Quantitative estimates of the growth of real wages or real output have an oft-forgotten Achilles heel. While it is relatively easy to calculate nominal wages and outputs, conversion of these into real output or real wages requires calculation of price indexes for the various components of output. The estimates of real income are only as good as the price indexes are accurate.

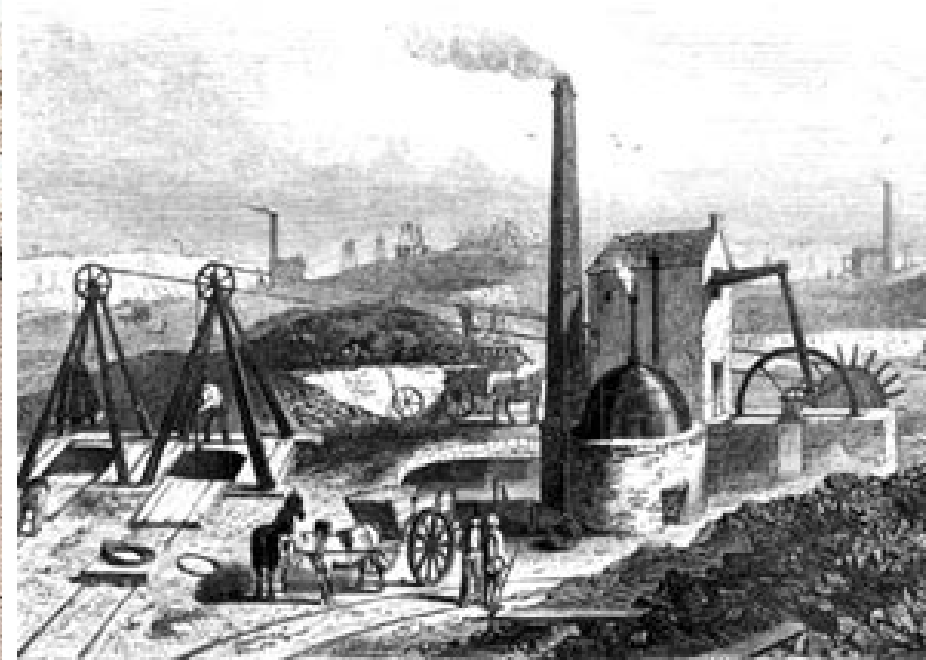
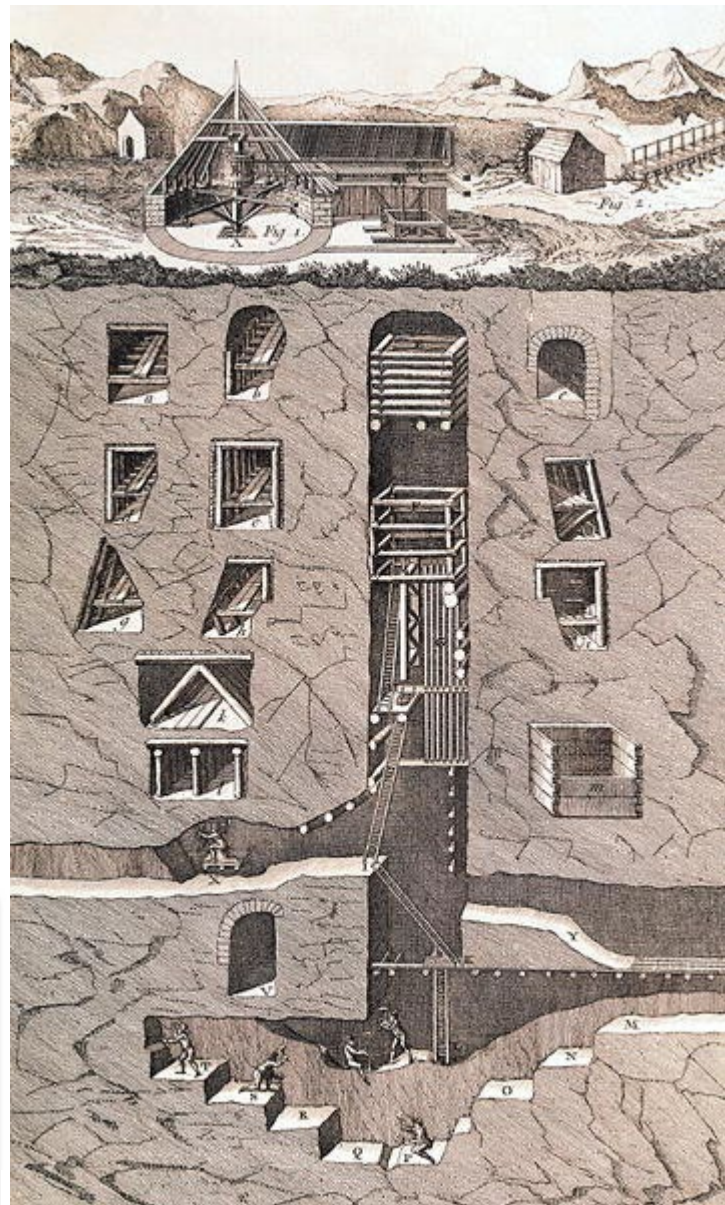
During periods of major technological change, the need to construct accurate price indexes that capture the impact of new technologies on living standards is beyond the practical capability of official statistical agencies. The essential difficulty arises for the obvious but usually overlooked reason that most of the goods that we consume today were not produced a century ago. We travel in vehicles that were not yet invented, powered by fuels not yet produced, talk on devices not yet manufactured, enjoy cool air

<sup>1</sup> Helpful comments on economics, physics, and the index-number practices were given by Ernie Berndt, William Brainard, Carole Cooper, William English, Robert J. Gordon, Zvi Griliches, Tim Guinnane, Charles Hulten, Stanley Lebergott, Michael Lovell, Joel Mokyr, Sherwin Rosen, Alice Slotky, Robert Solow, T. N. Srinivasan, and Jack Triplett. Robert Wheeler brought the diary and experiments of B. Silliman Jr. to my attention. All errors and flights of fancy are my responsibility.

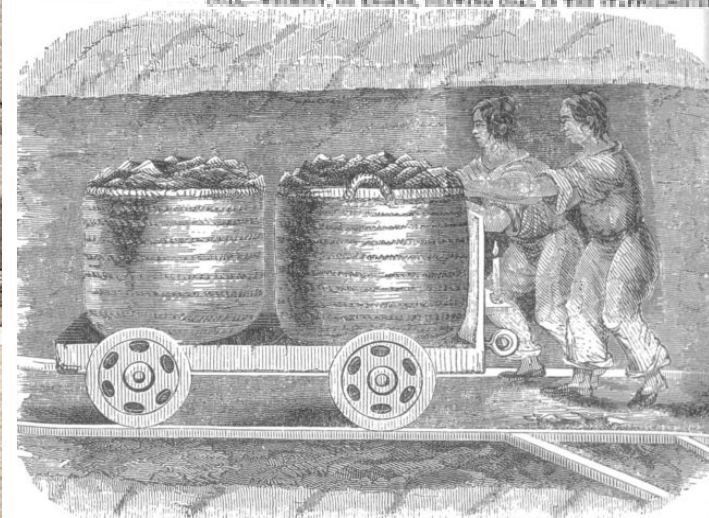




# Mineração de carvão no Reino Unido

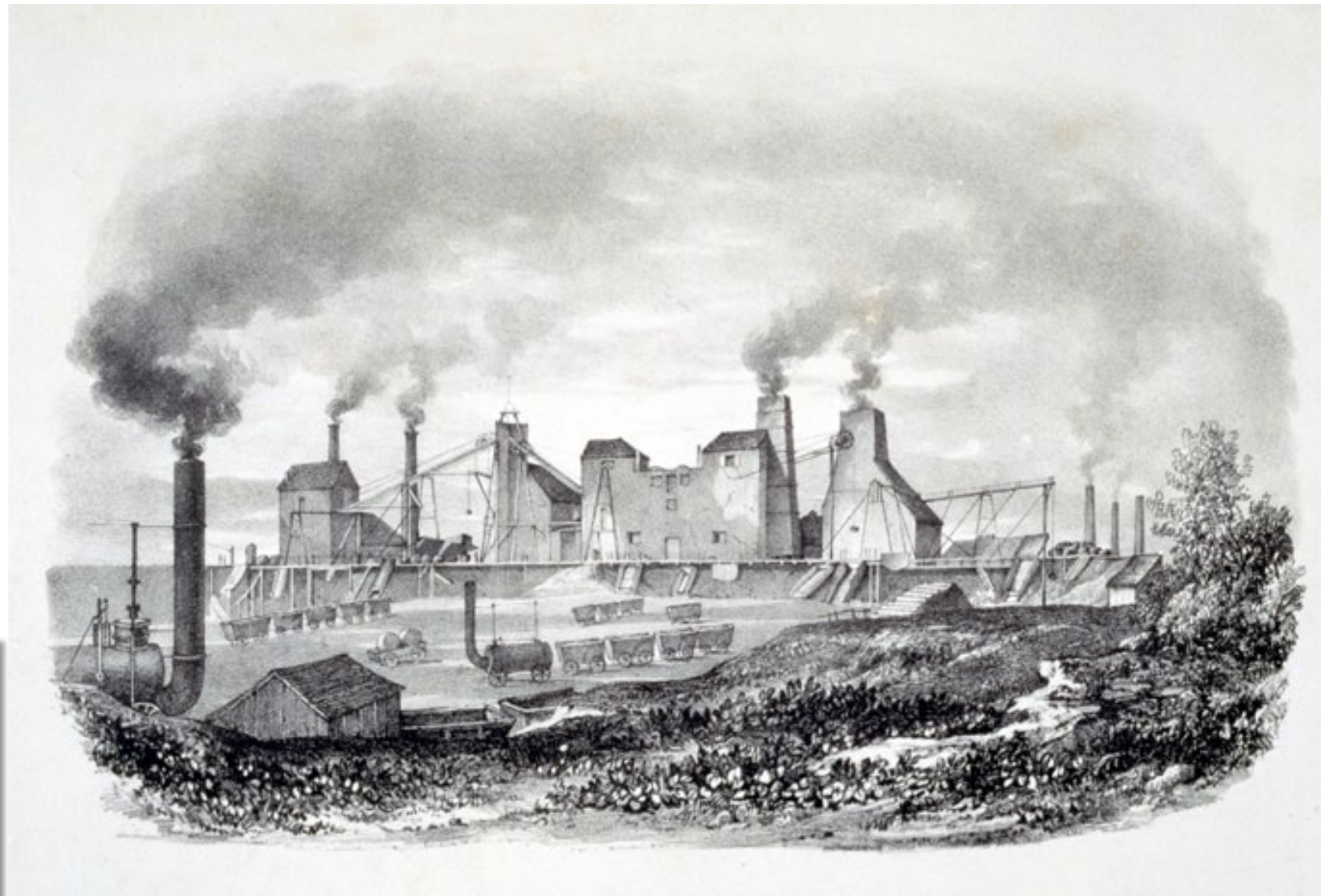


WHEEL-DRIVEN ENGINE, DRIVING SHAFT IN THE STAFFORDSHIRE COALFIELD.

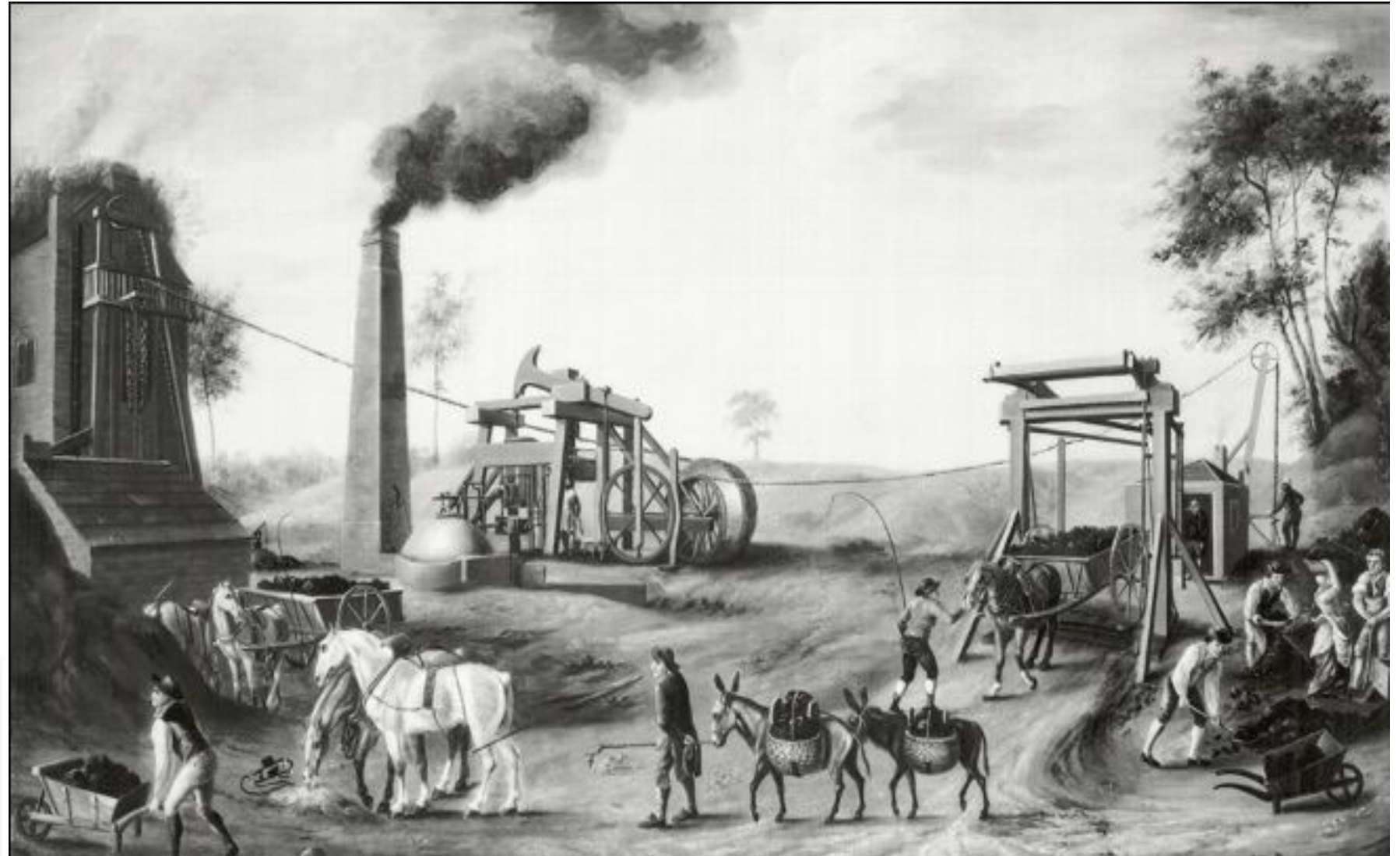




# Mineração de carvão no Reino Unido

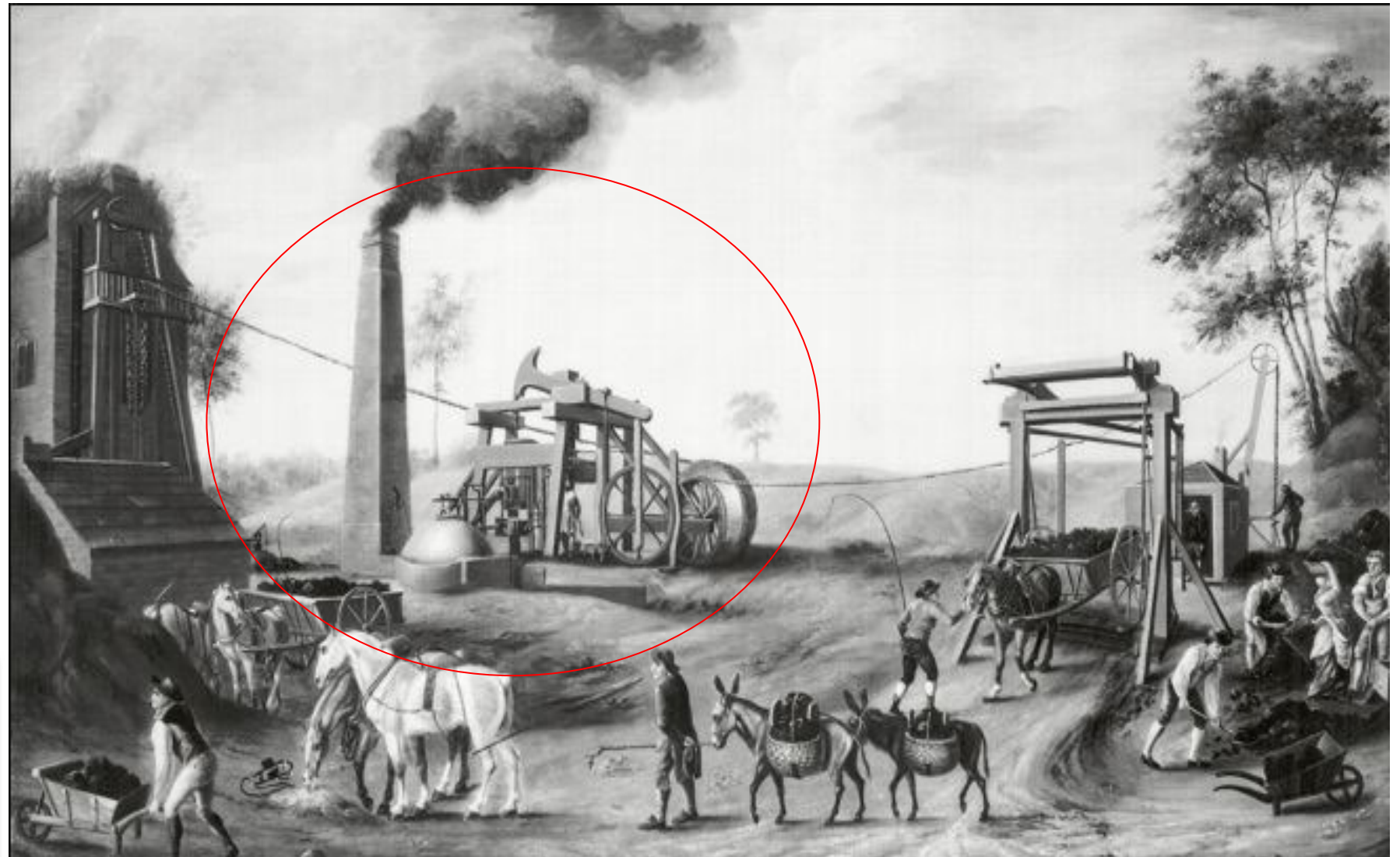


# Mineração de carvão no Reino Unido



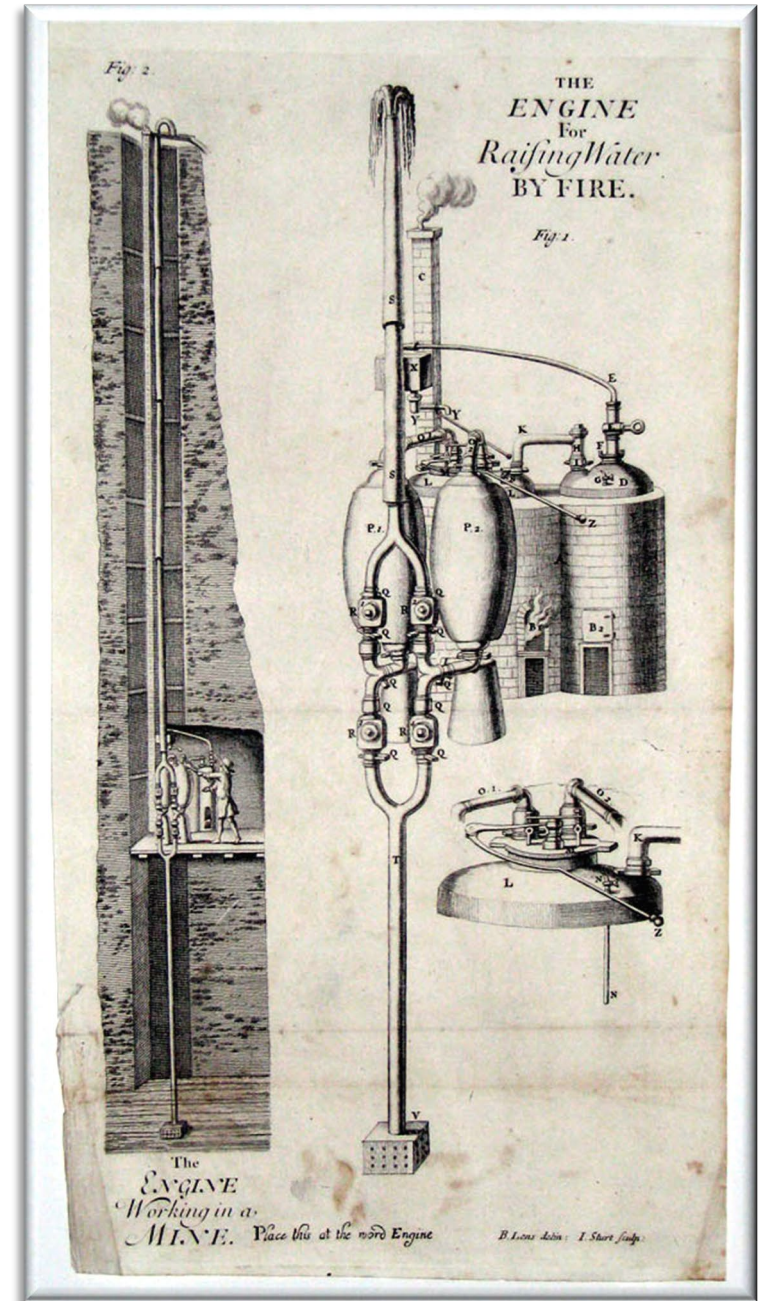
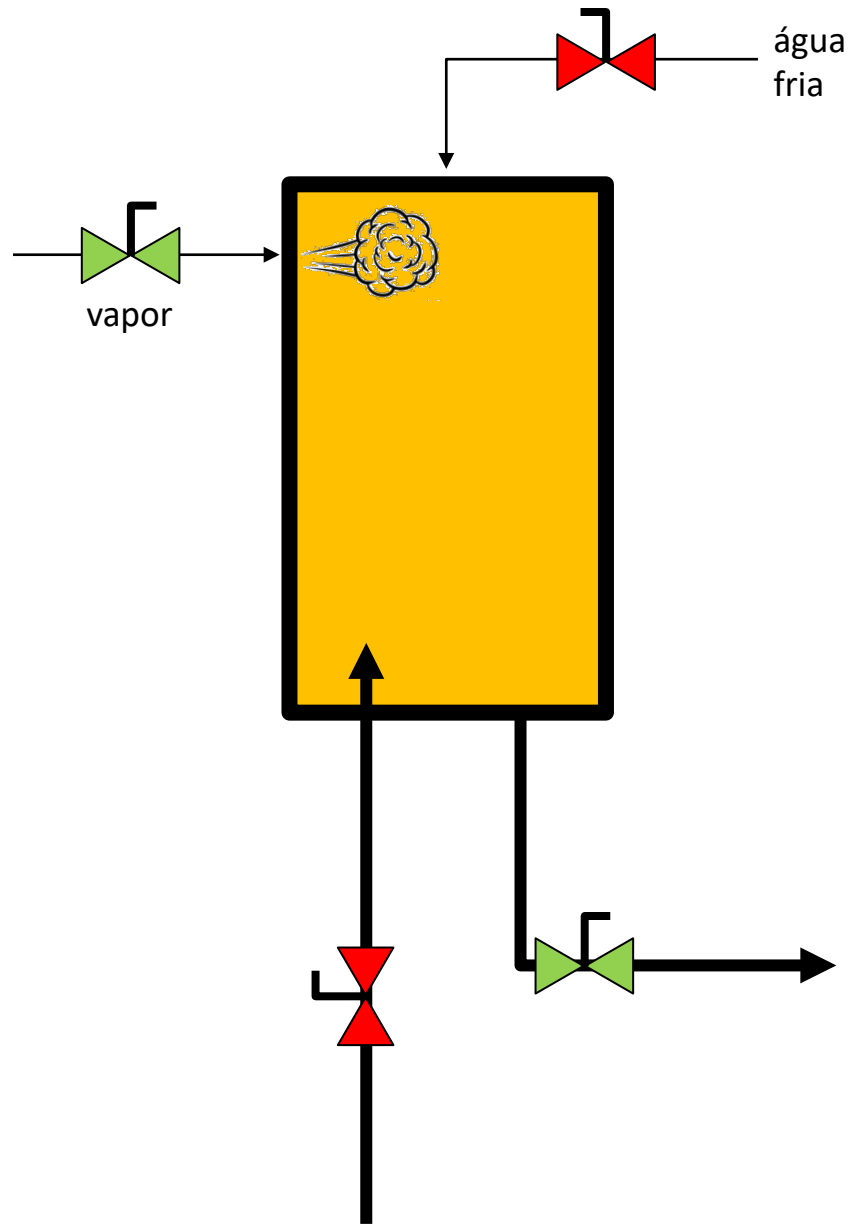
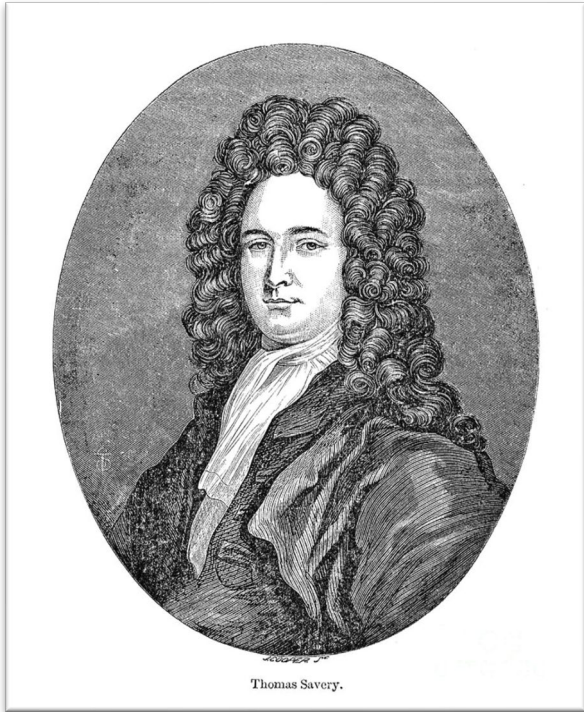


# Mineração de carvão no Reino Unido



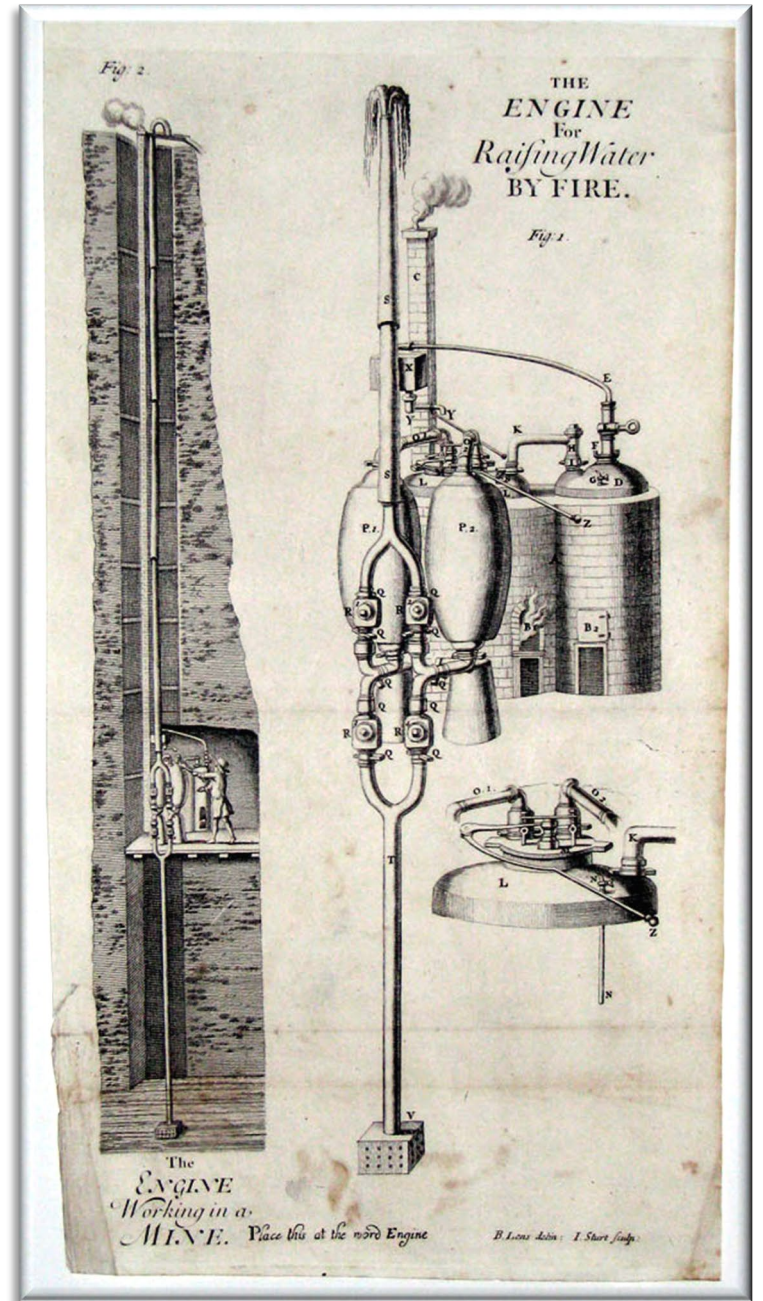
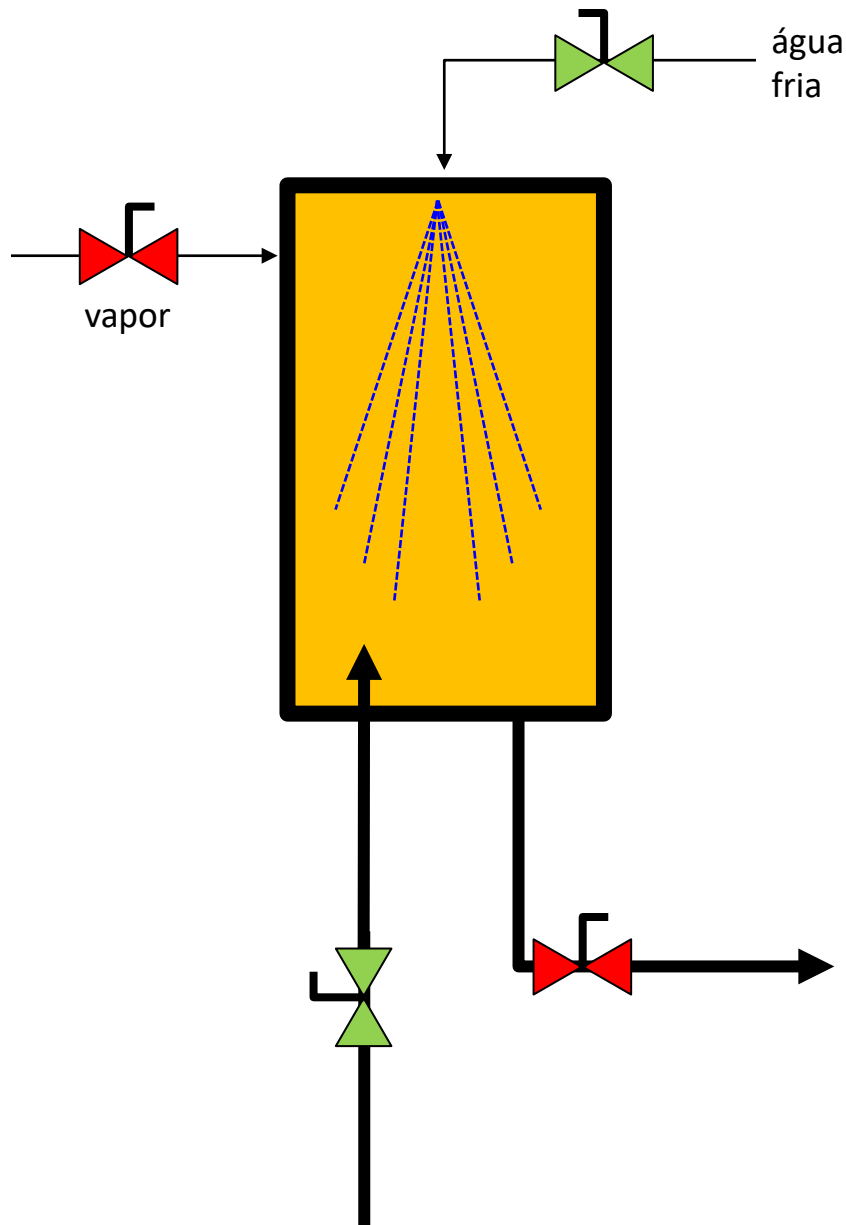
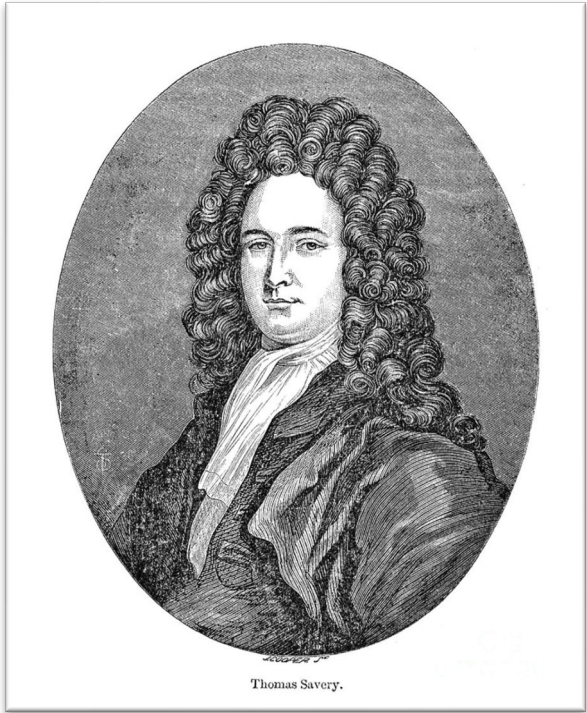


# Thomas Savery (1698)



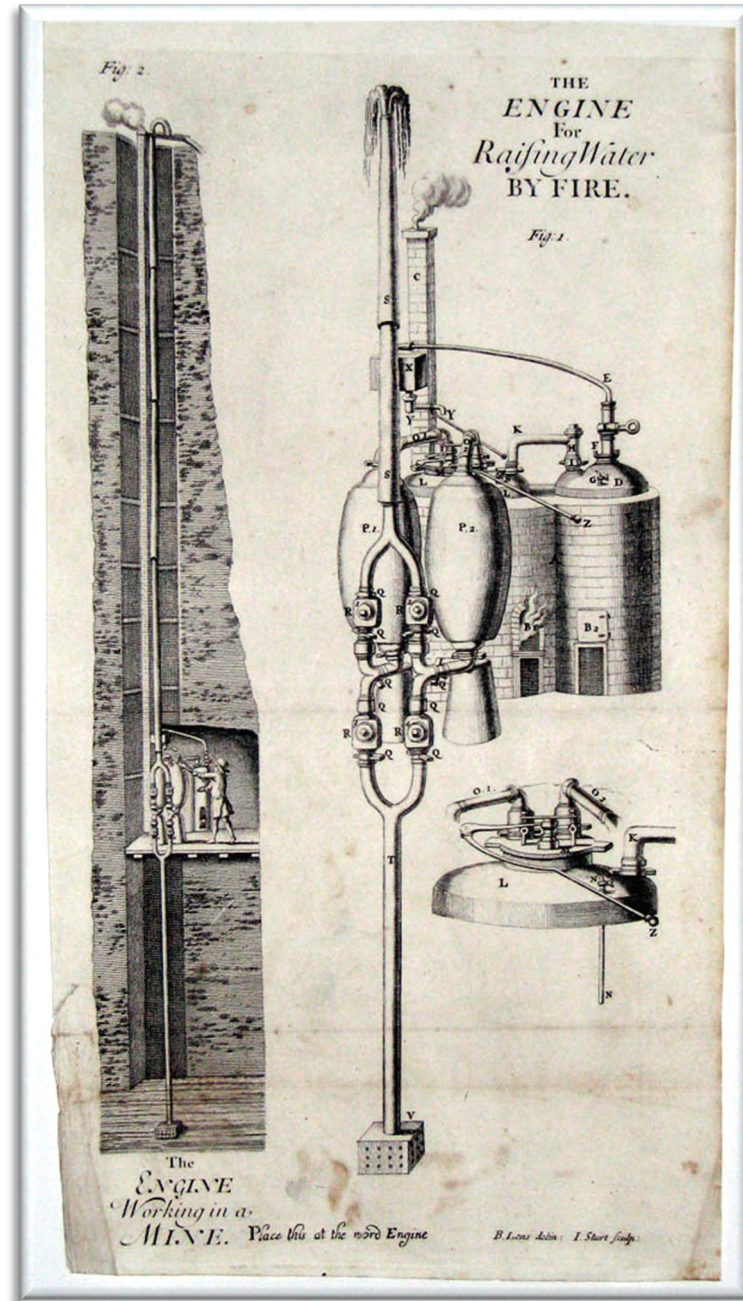
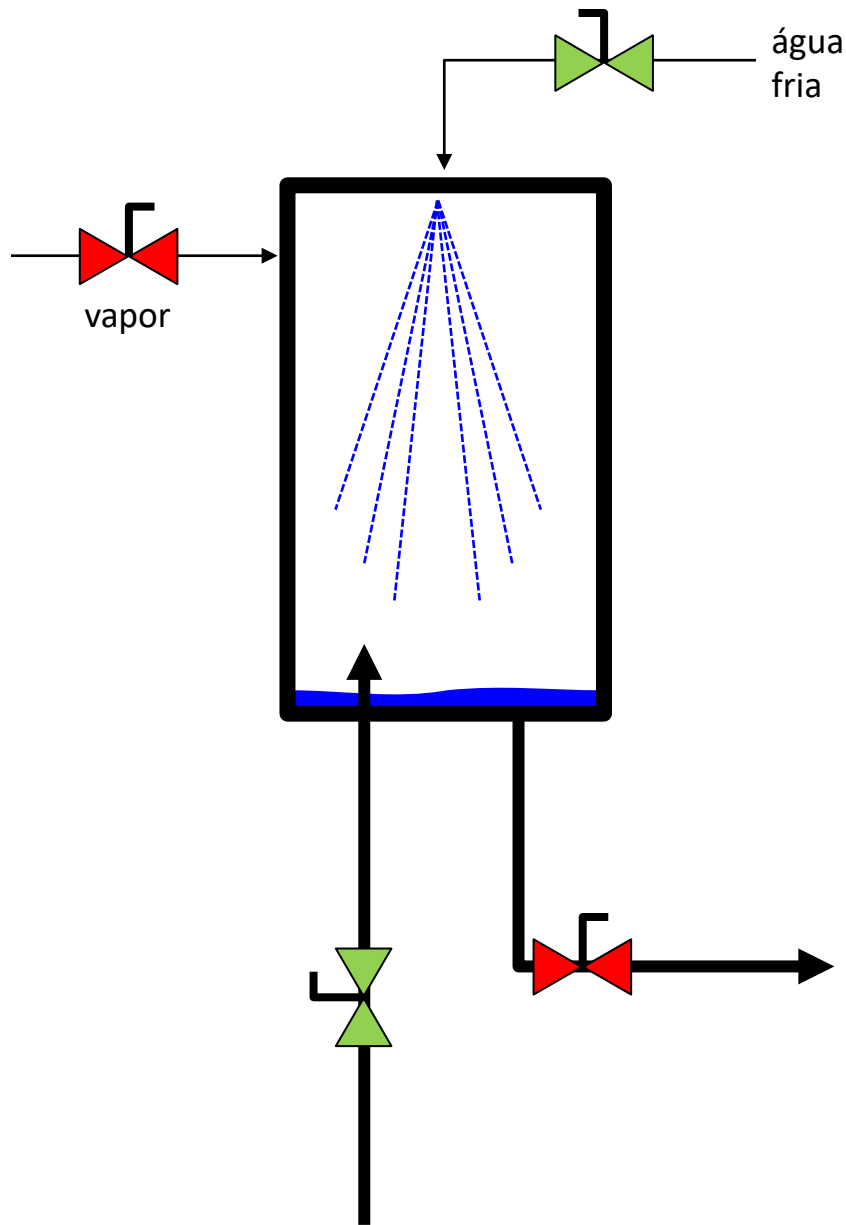
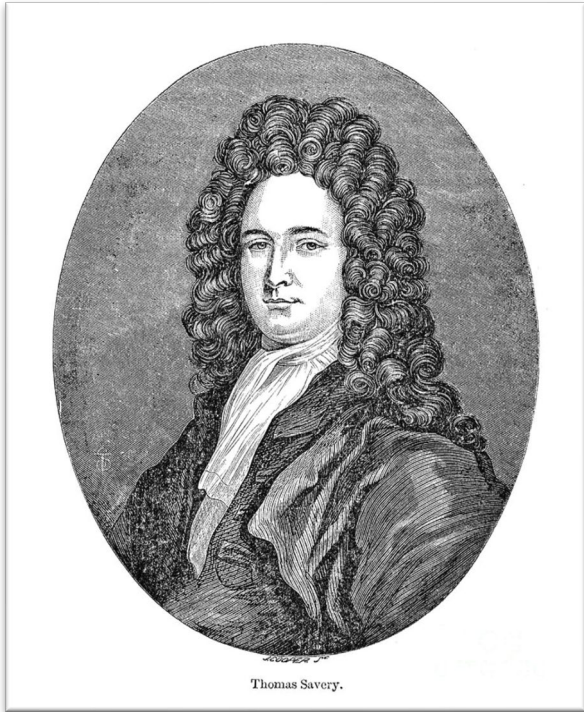


# Thomas Savery (1698)



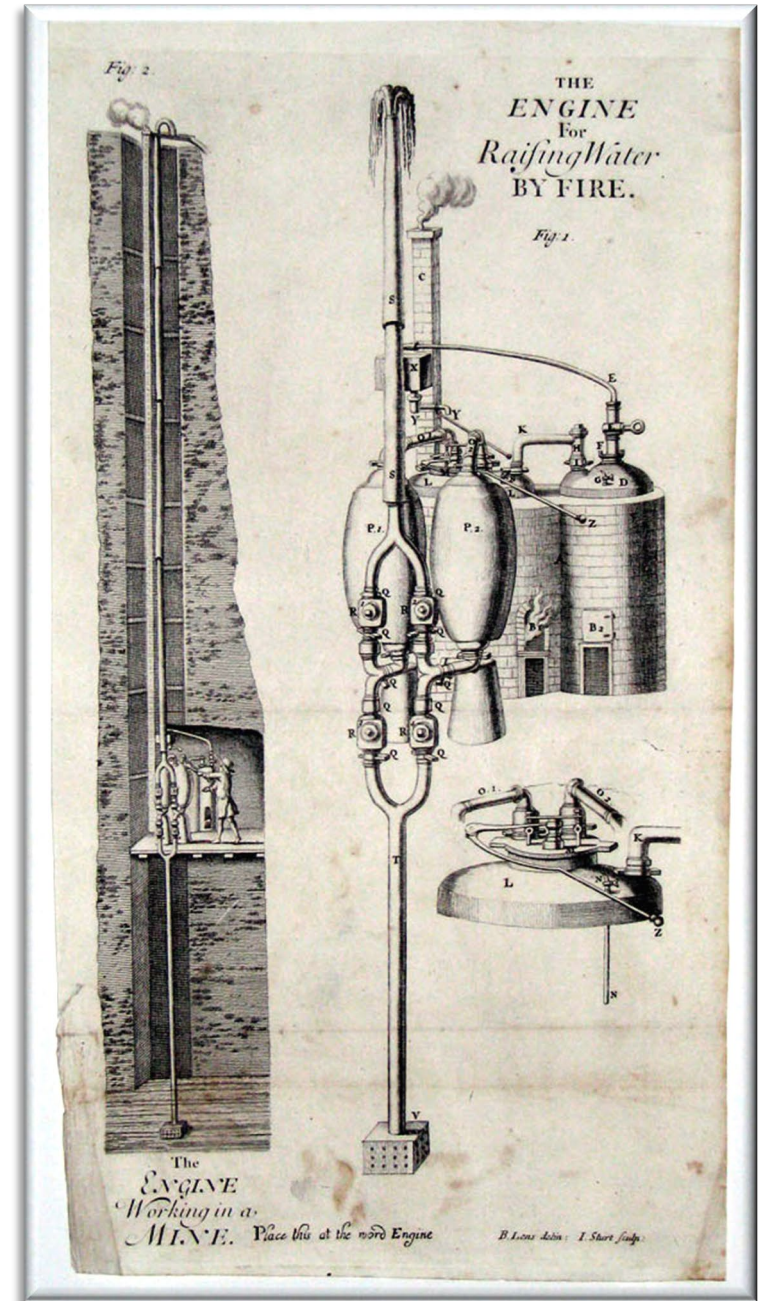
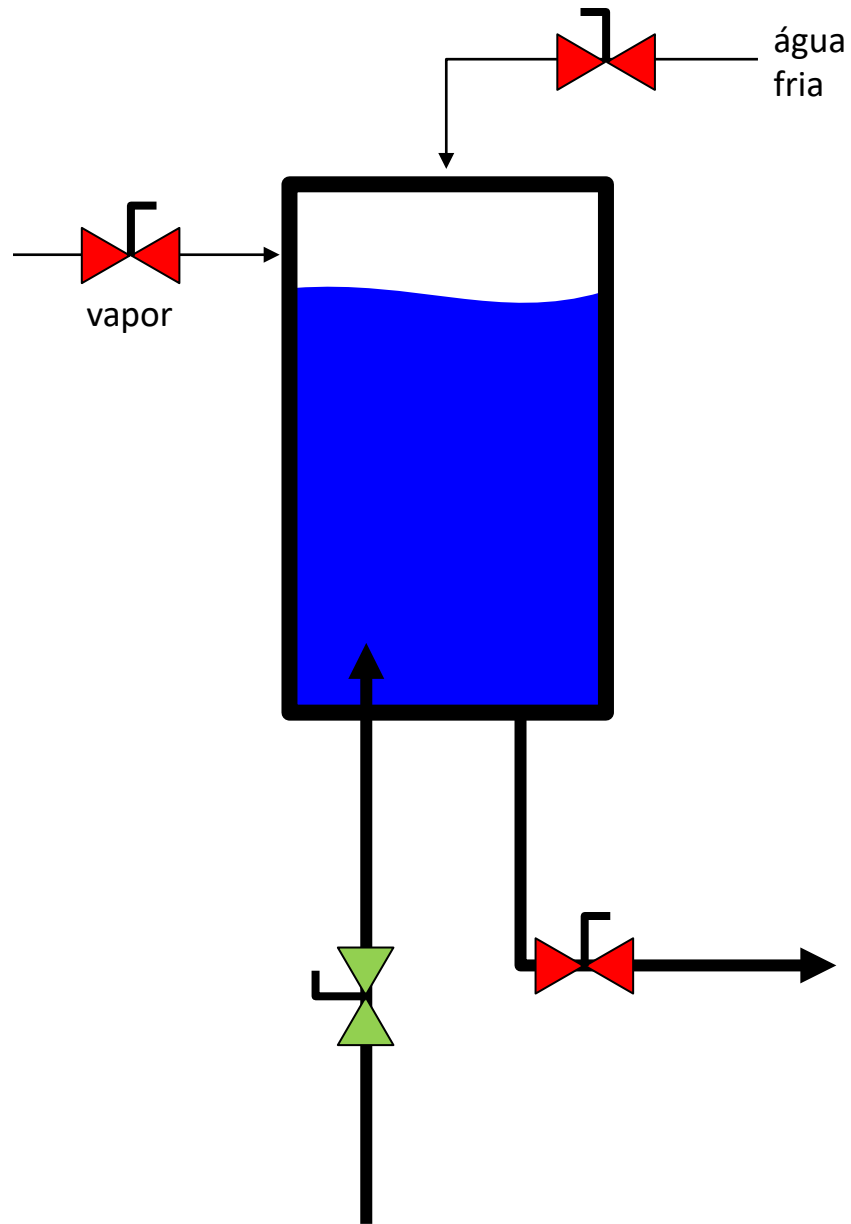
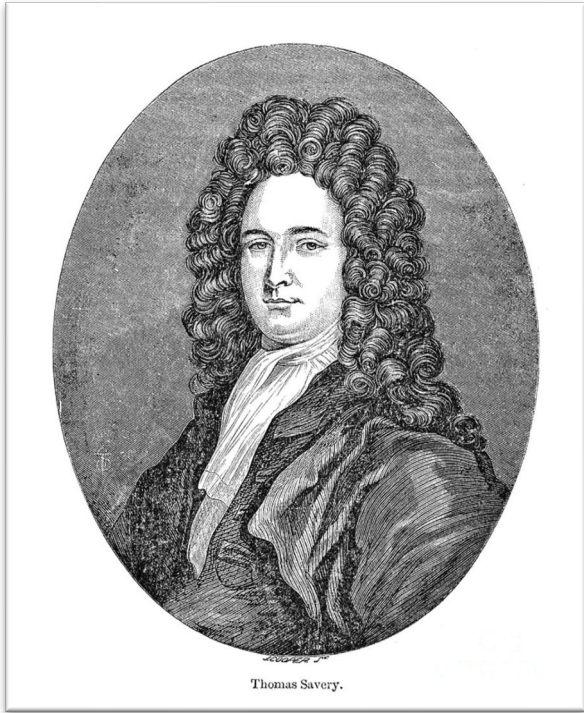


# Thomas Savery (1698)



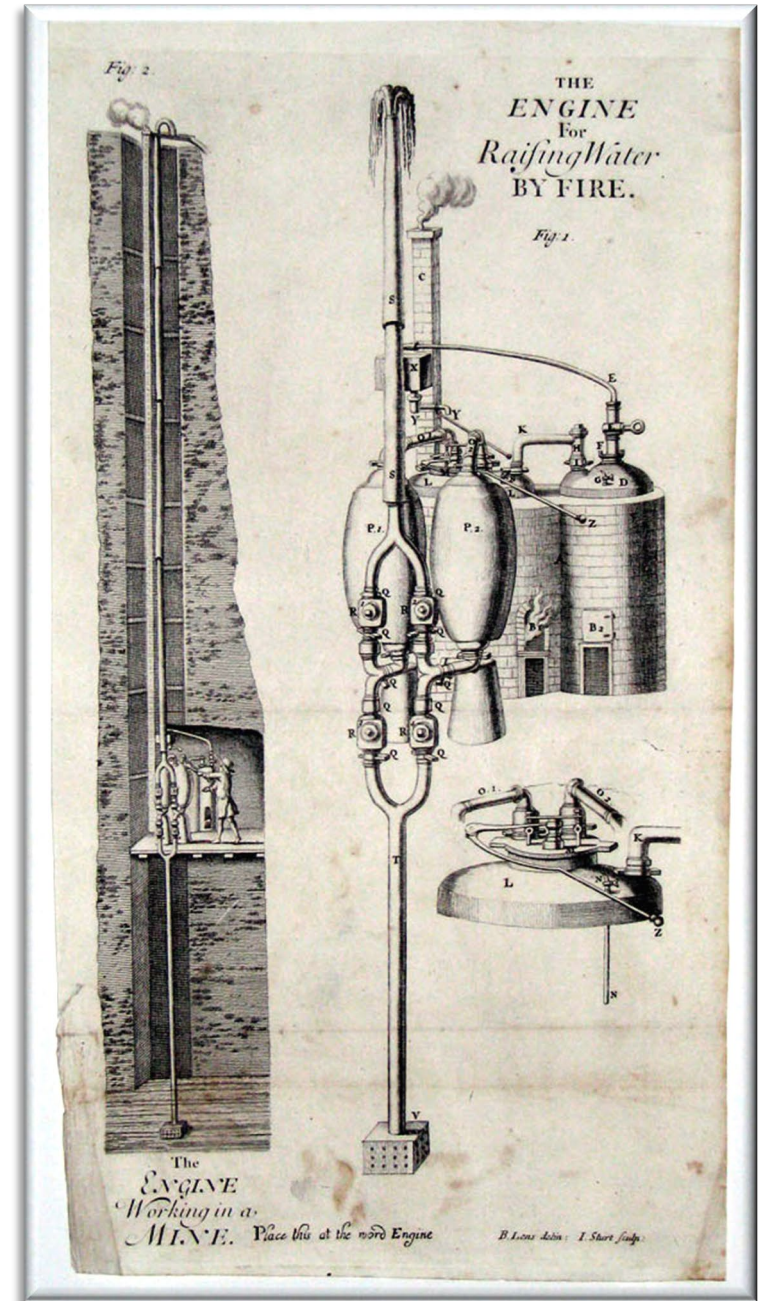
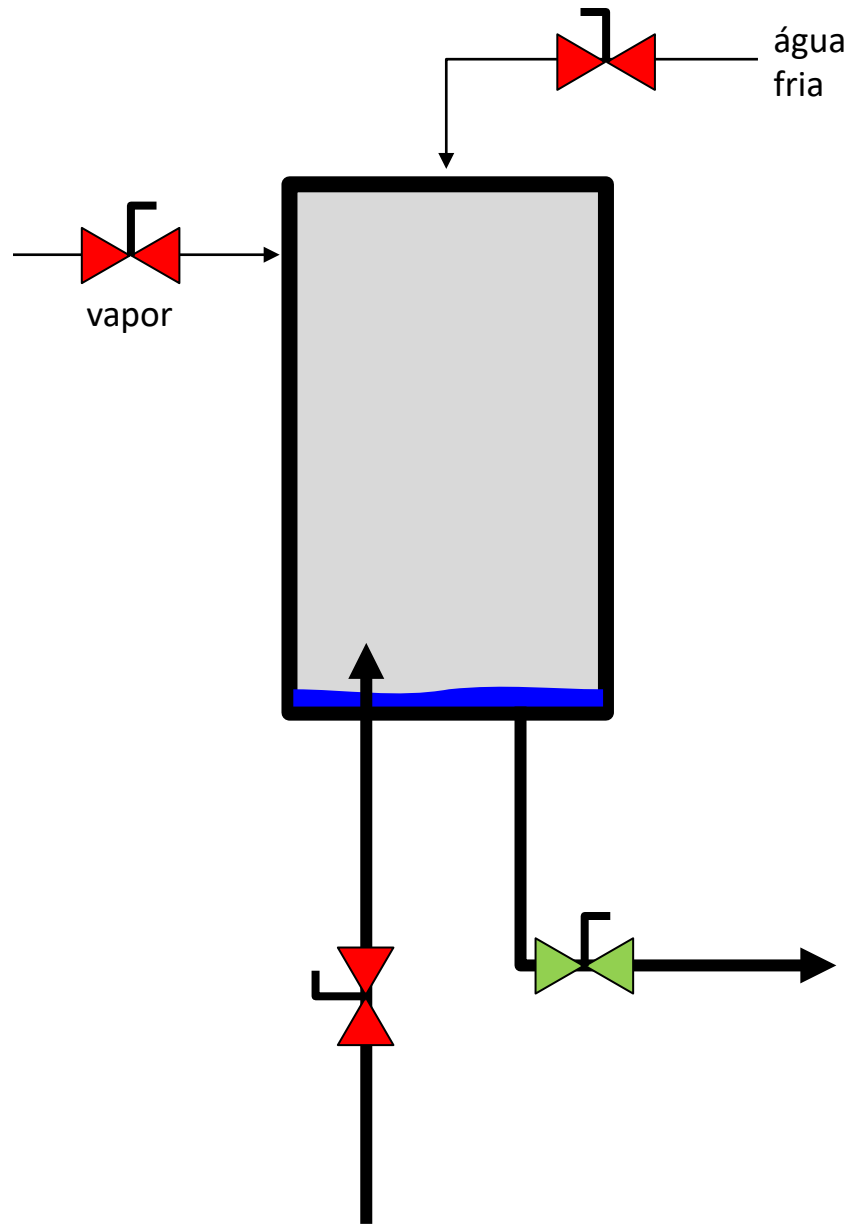
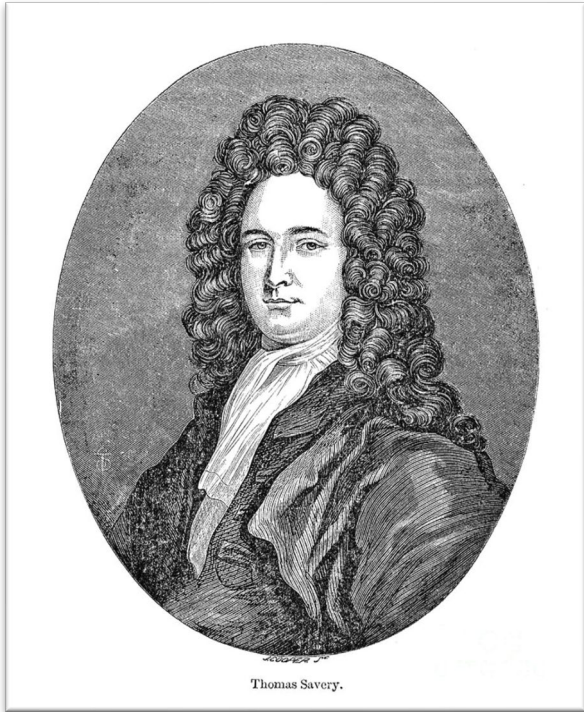


# Thomas Savery (1698)



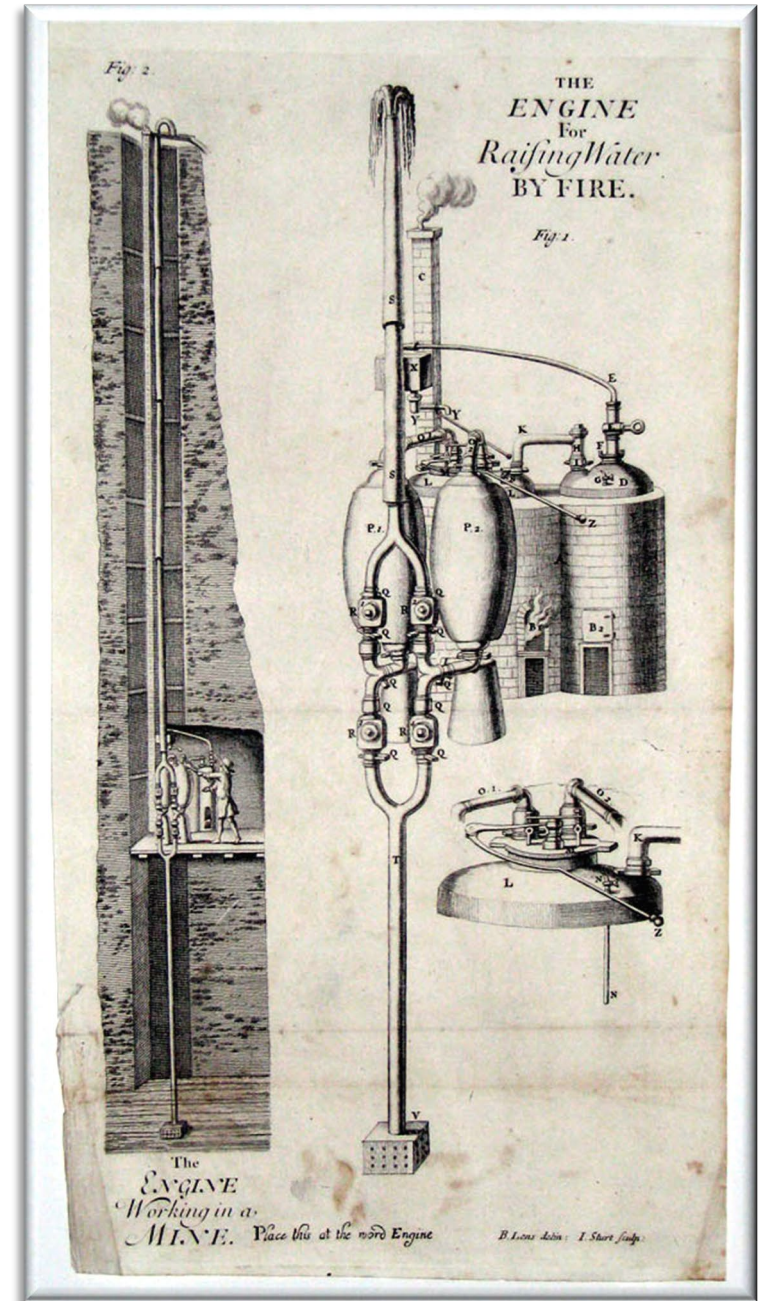
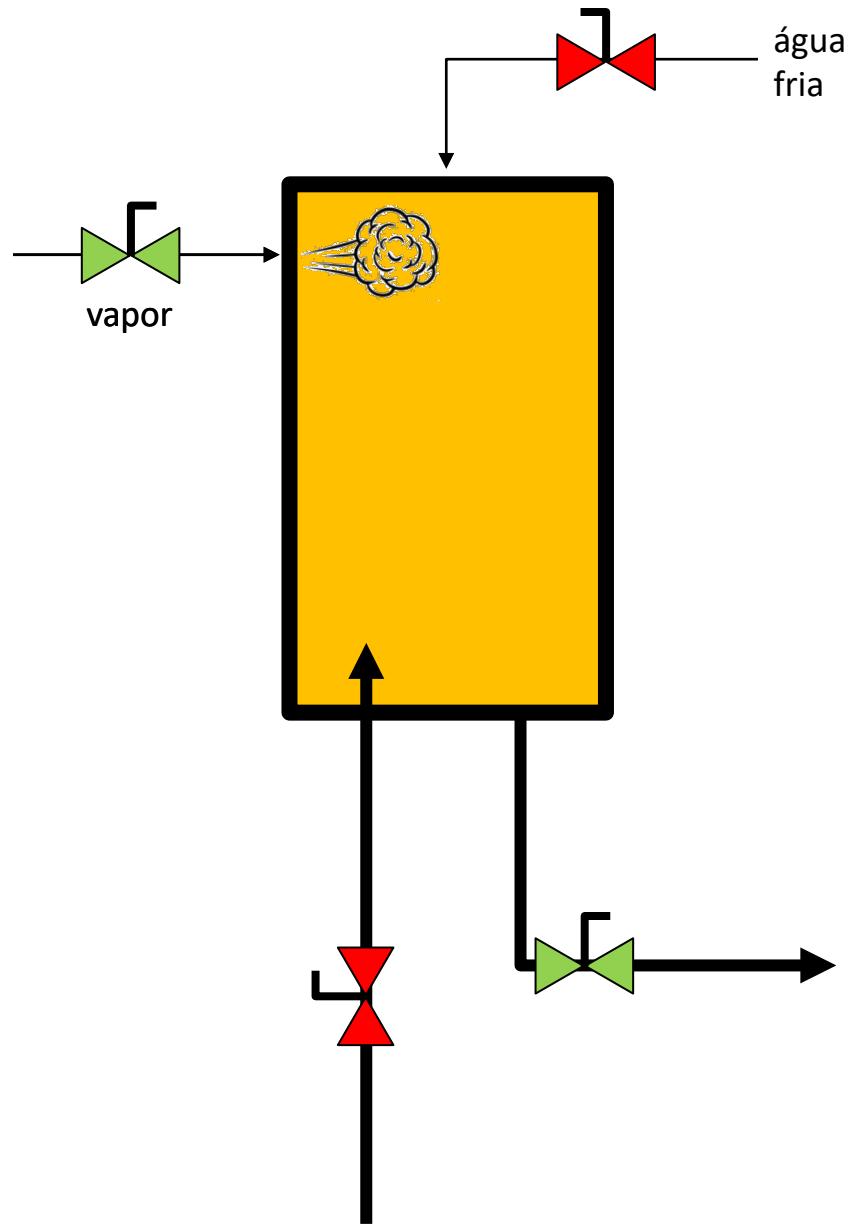
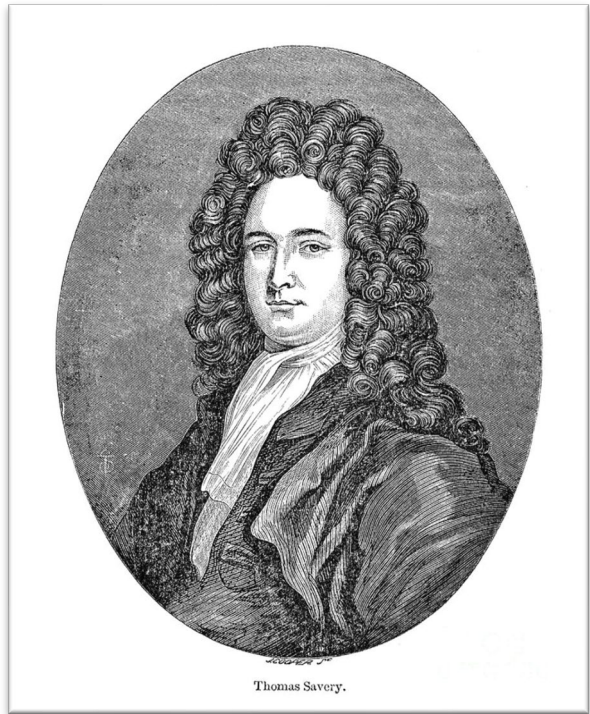


# Thomas Savery (1698)



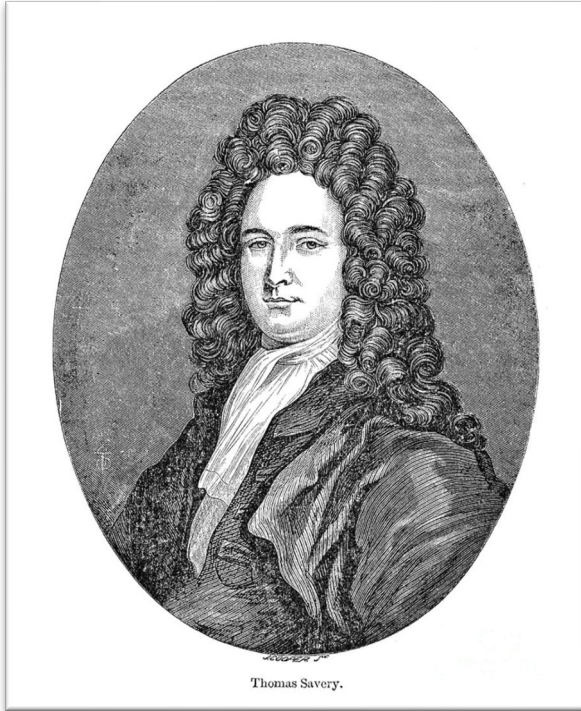


# Thomas Savery (1698)

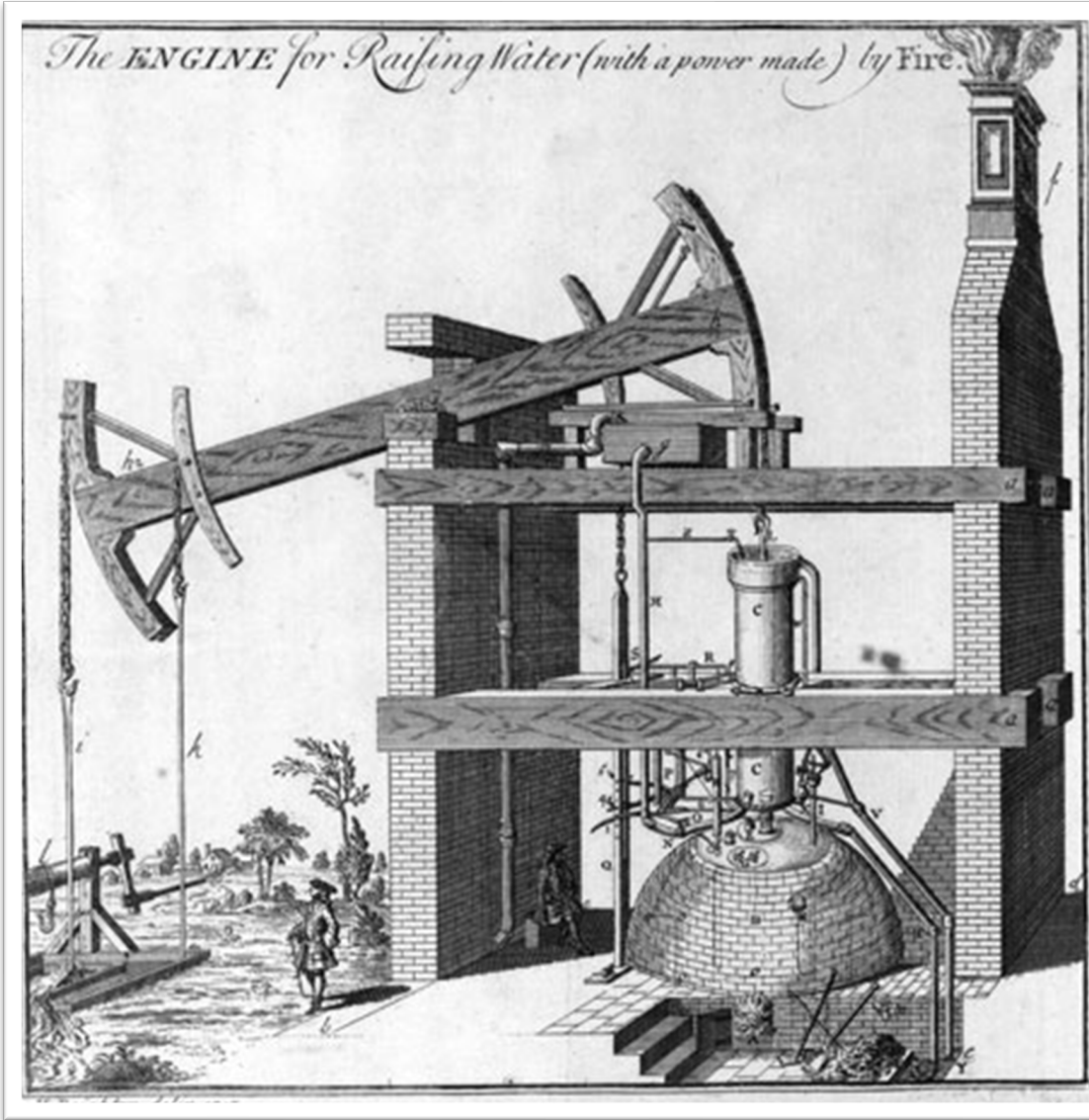
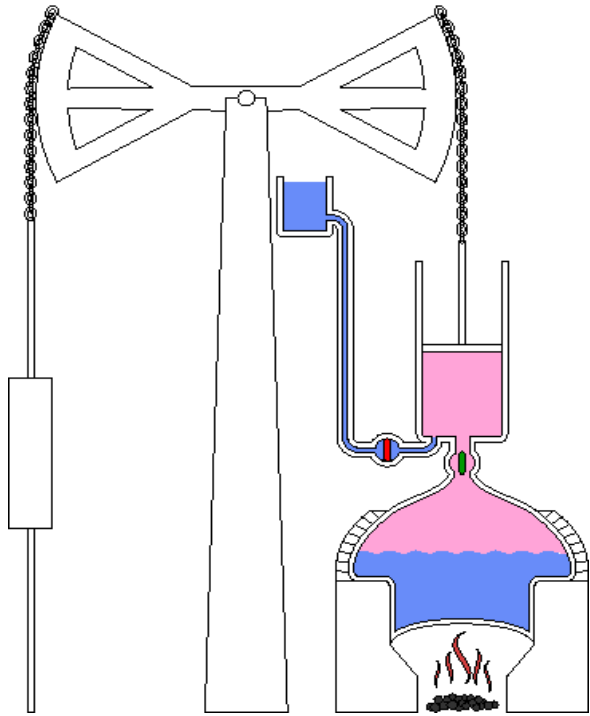




# Thomas Savery (1698)

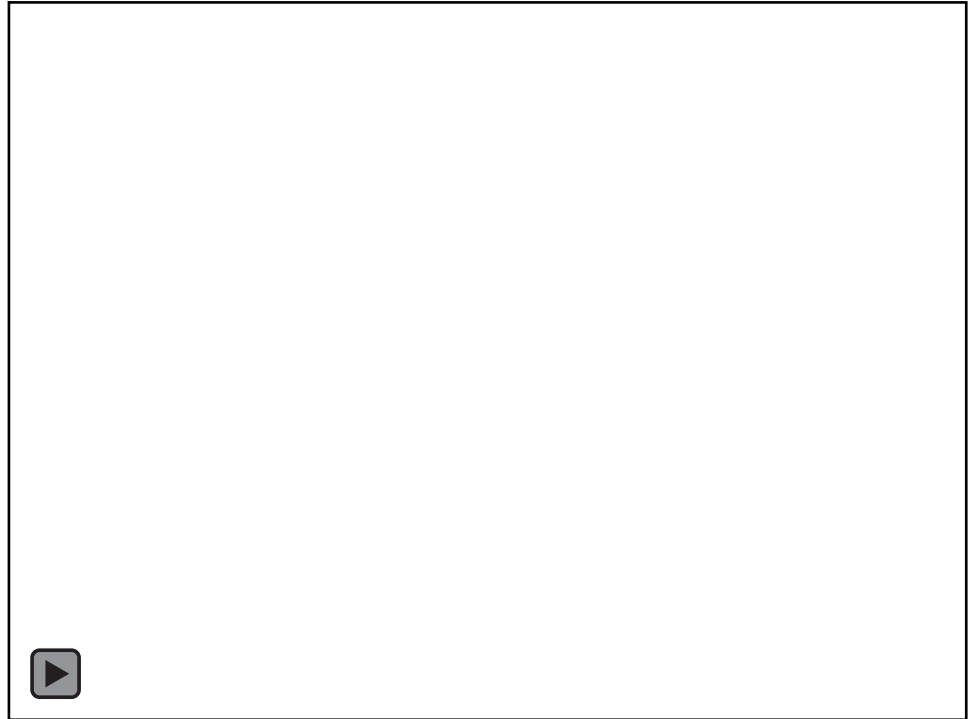
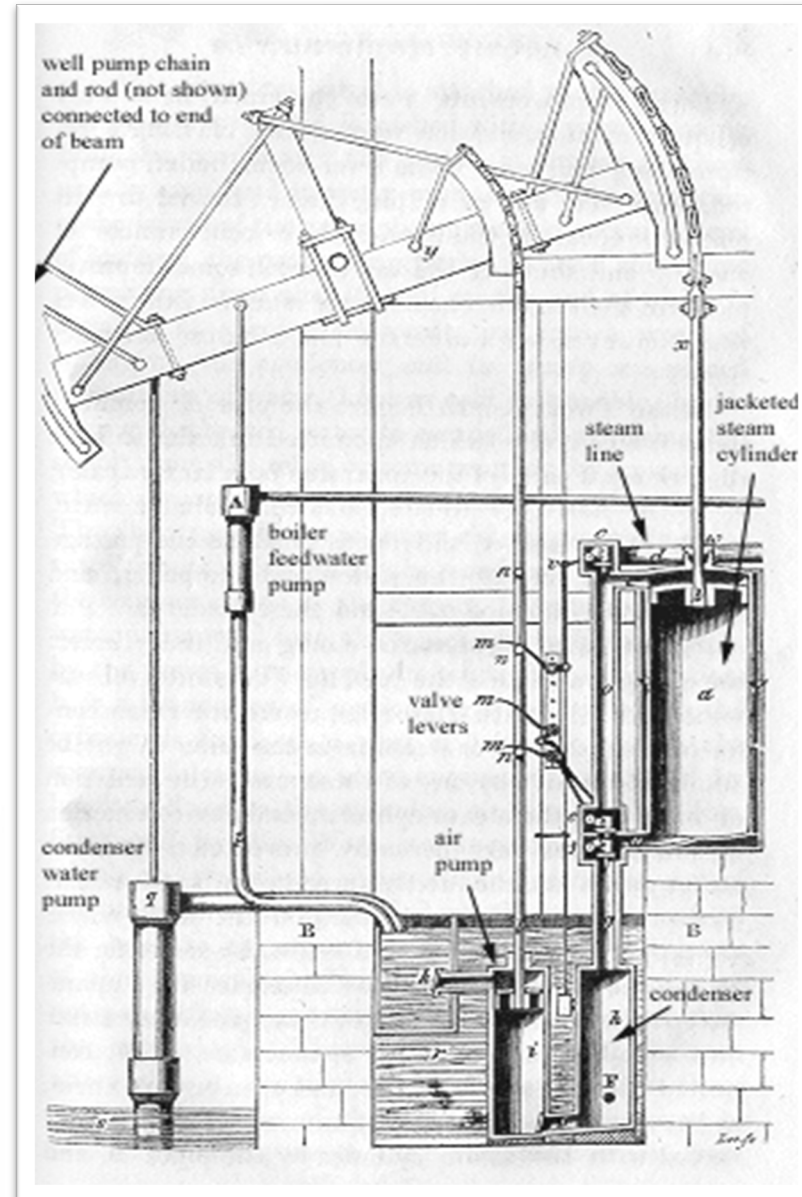
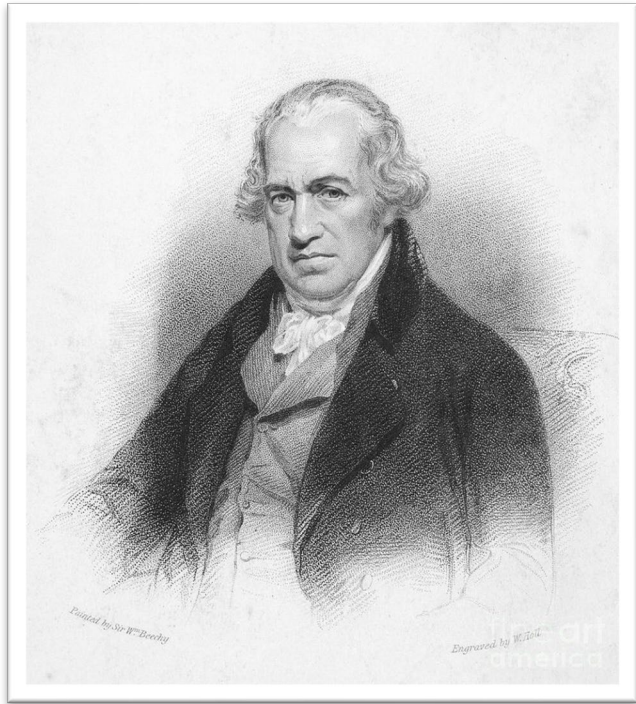


# Thomas Newcomen (1712)



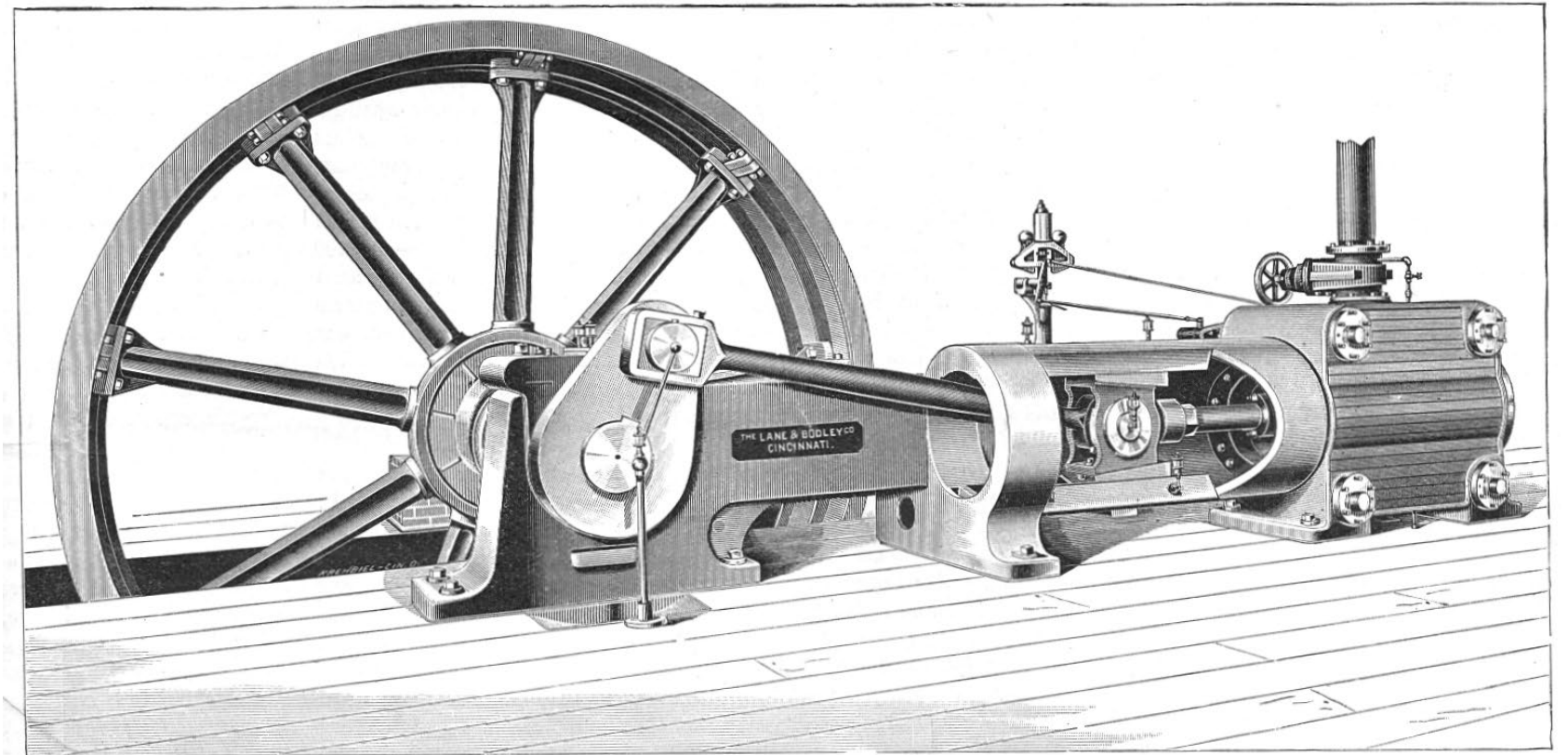
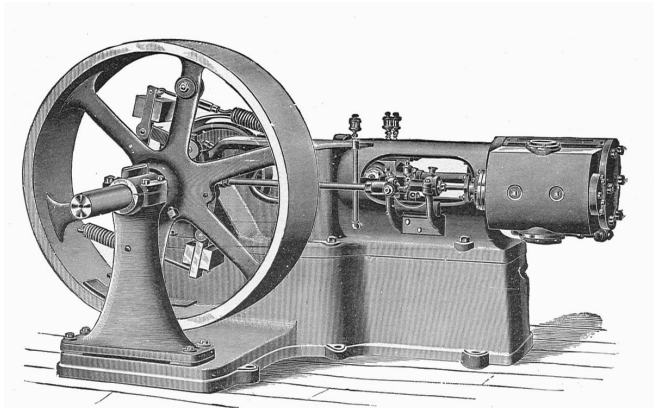


# James Watt (1763)



O vaso de condensação é separado do sistema pistão/cilindro acionado pelo vapor...

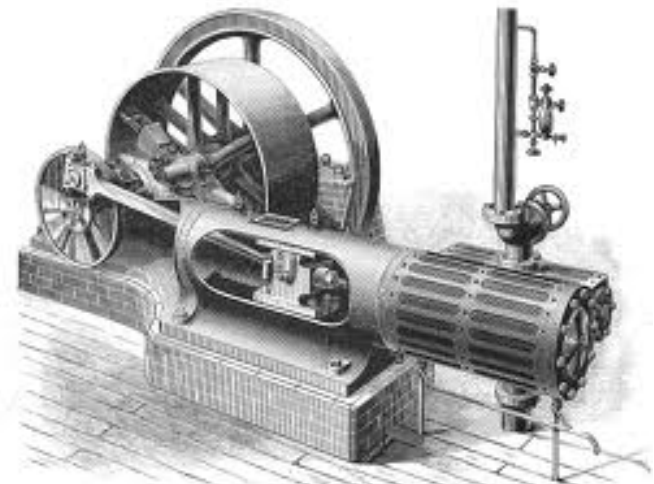
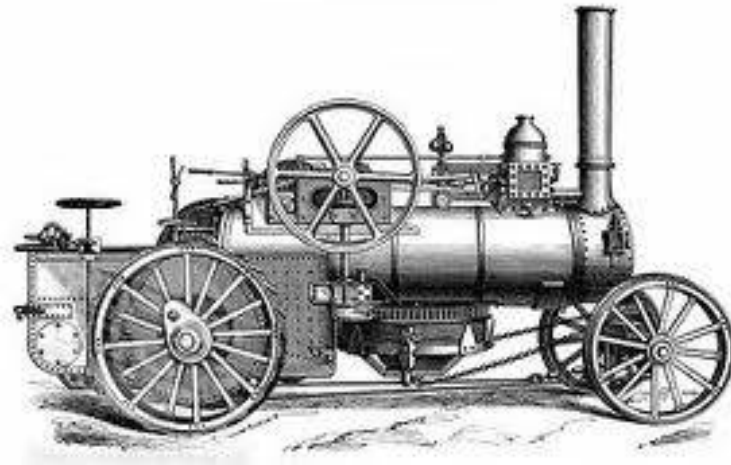
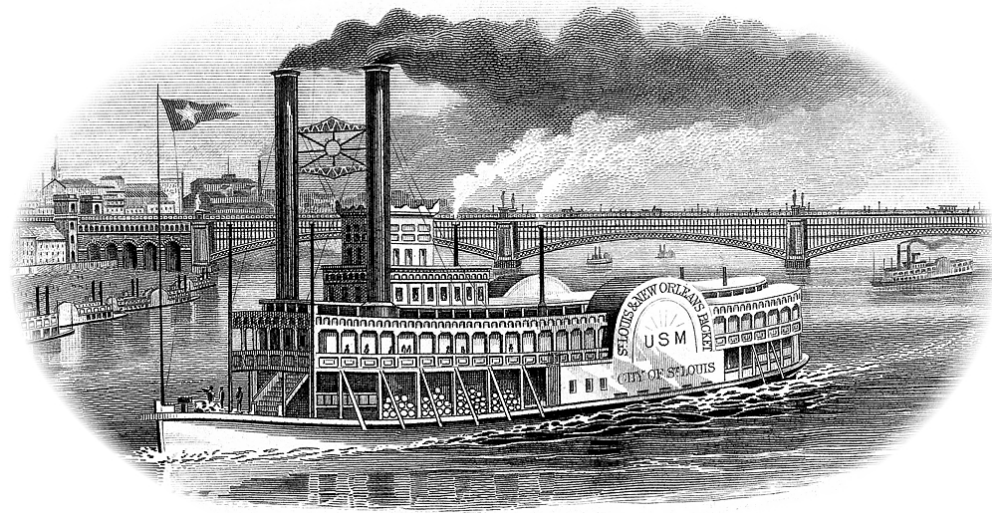
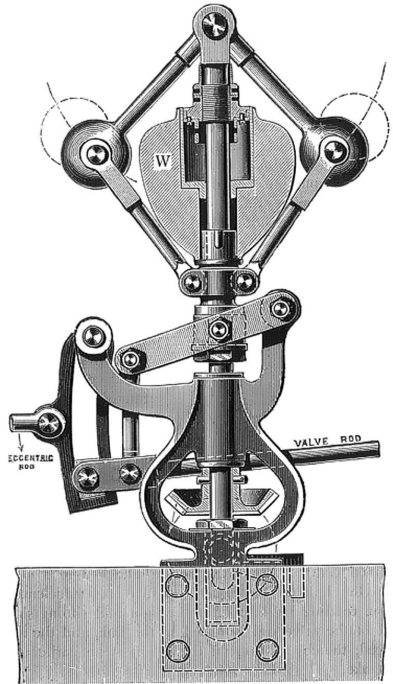
# Motores para aplicações genéricas mais eficientes, mais robustos e compactos



THE LANE & BODLEY "COLUMBIAN" CORLISS ENGINE.

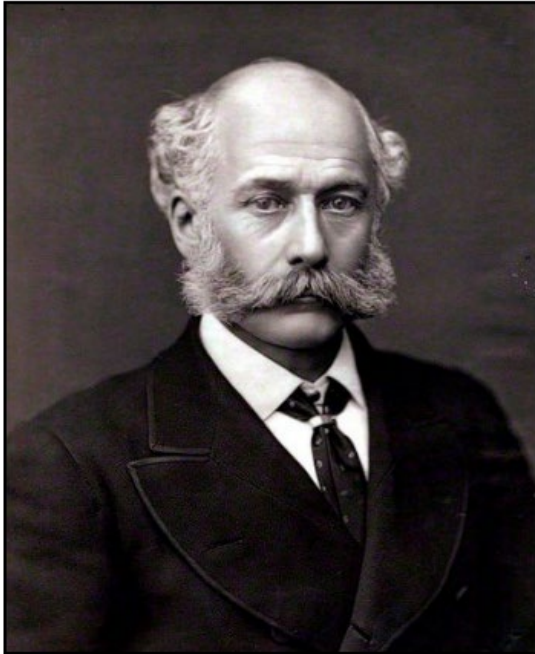


# Transportes de cargas e passageiros

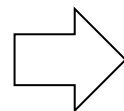
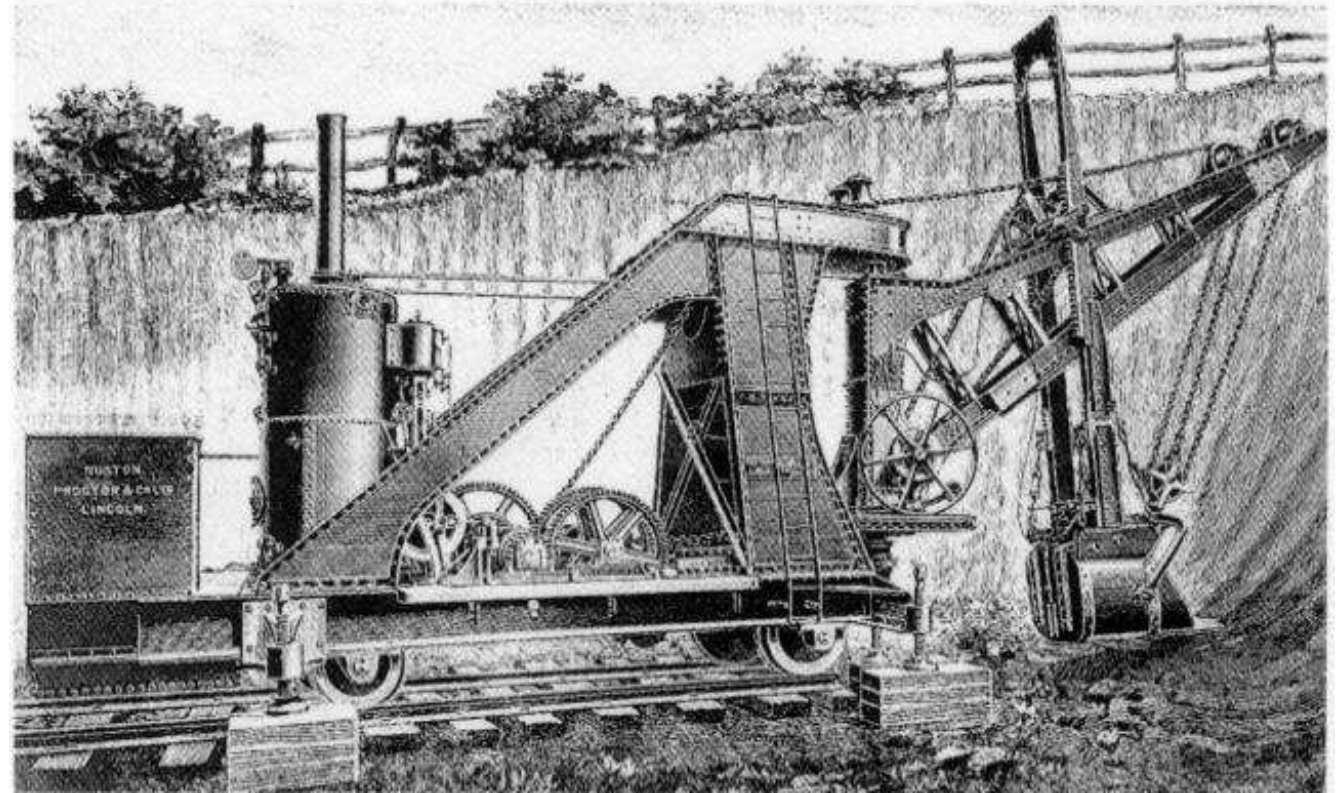


THE BAKER AUTOMATIC CUT-OFF ENGINE—VERTICAL AND HORIZONTAL TYPES.

# Escavadeiras (canais, sistemas de esgoto...)



Joseph William Bazalgette, 1819-91



Crossness Pumping Station:

<https://youtu.be/gvKSpH4ua6Y?si=ykleXSV8ZJmfb9TR&t=22>



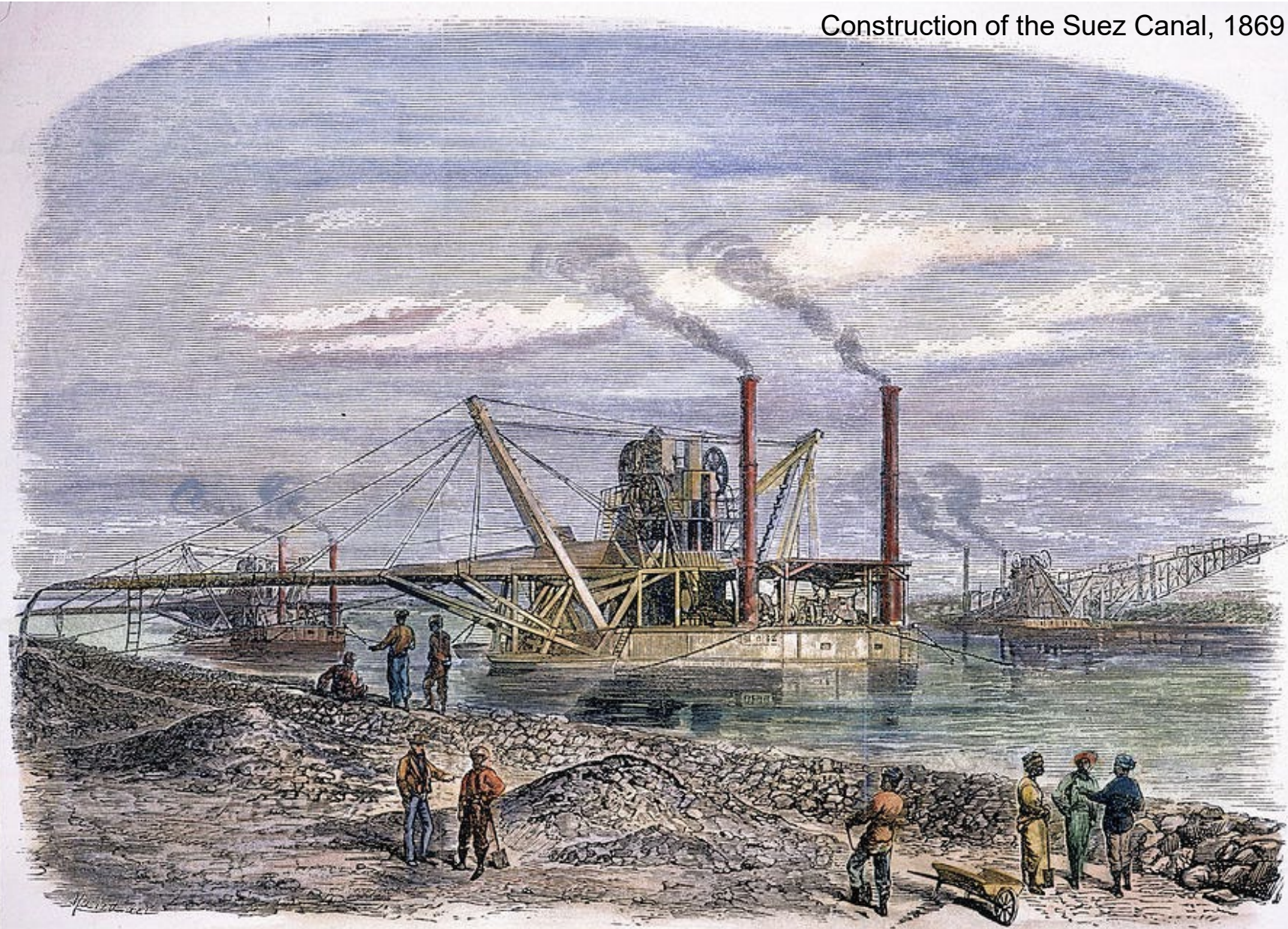
# HARPER'S WEEKLY

JOURNAL OF CIVILIZATION

NEW YORK, WEDNESDAY, JULY 14, 1869



Construction of the Suez Canal, 1869



THE ISTHMUS OF SUEZ MARITIME CANAL: DREDGES AND ELEVATORS AT WORK.





HELD UP THE WRONG MAN

Construction of the Panama Canal, 1881-1914



<http://www.vintag.es/2015/08/the-panama-canal-construction-process.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=k9OAKSR7WUs>





**HELD UP THE WRONG MAN**



Theodore Roosevelt

Construction of the Panama Canal, 1881-1914



<http://www.vintag.es/2015/08/the-panama-canal-construction-process.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=k9OAKSR7WUs>





THE FIRST MOUNTAIN TO BE REMOVED  
© 2001 HARPWEEK®



Construction of the Panama Canal, 1881-1914



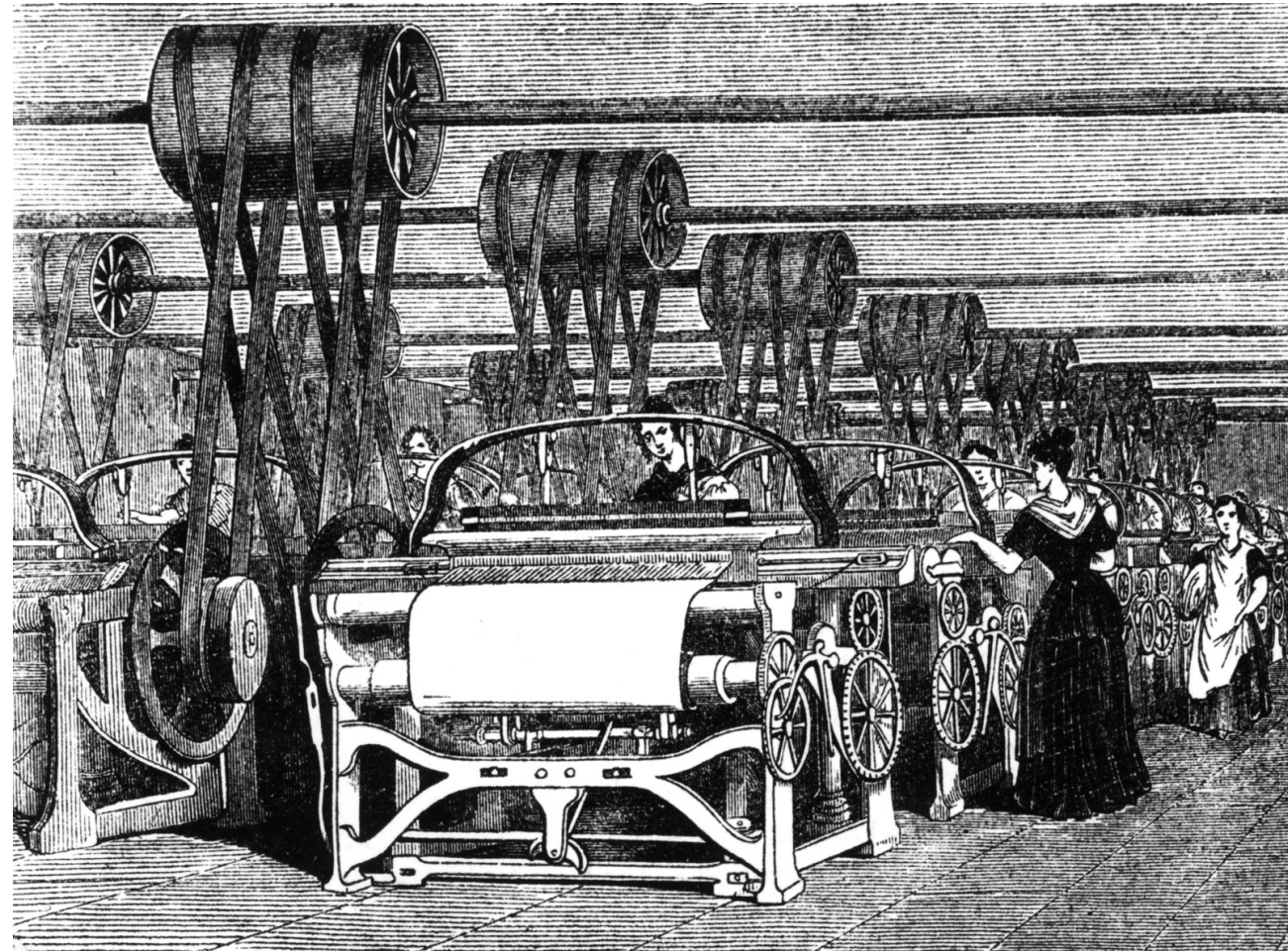
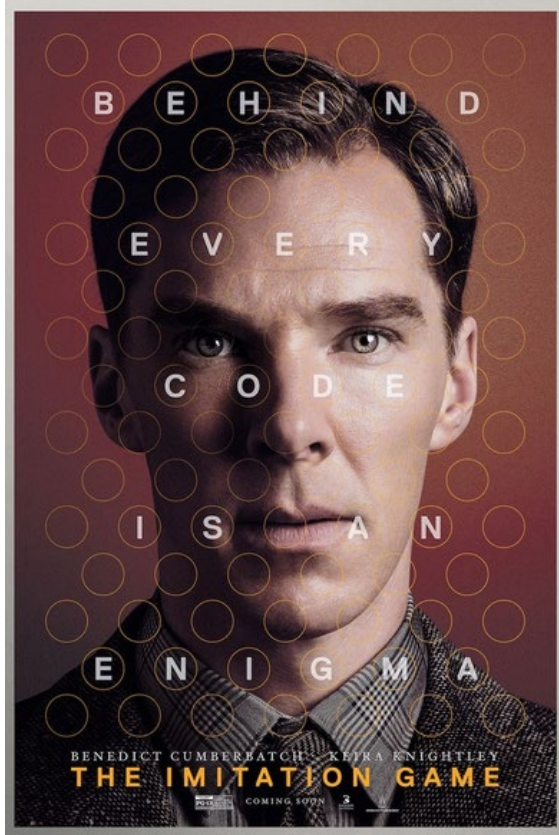
<http://www.vintag.es/2015/08/the-panama-canal-construction-process.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=k9OAKSR7WUs>



# Teares mecânicos

## Exemplos históricos



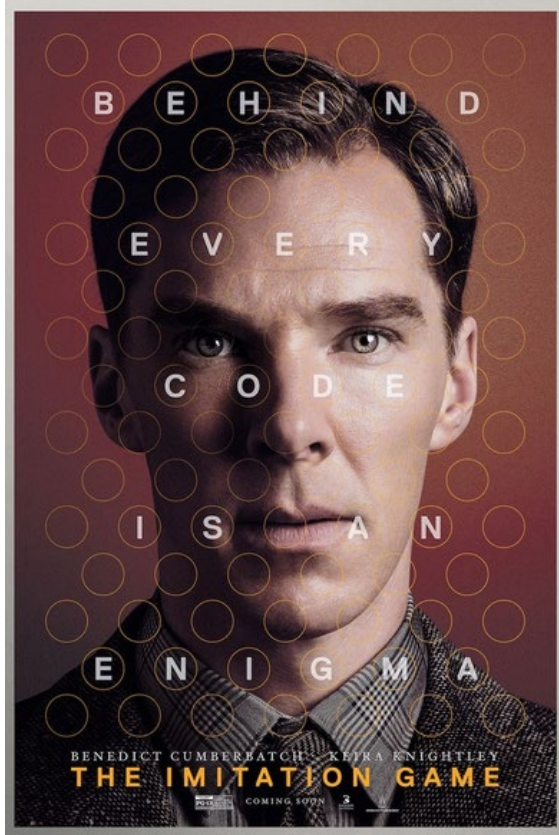
Jacquard





# Teares mecânicos

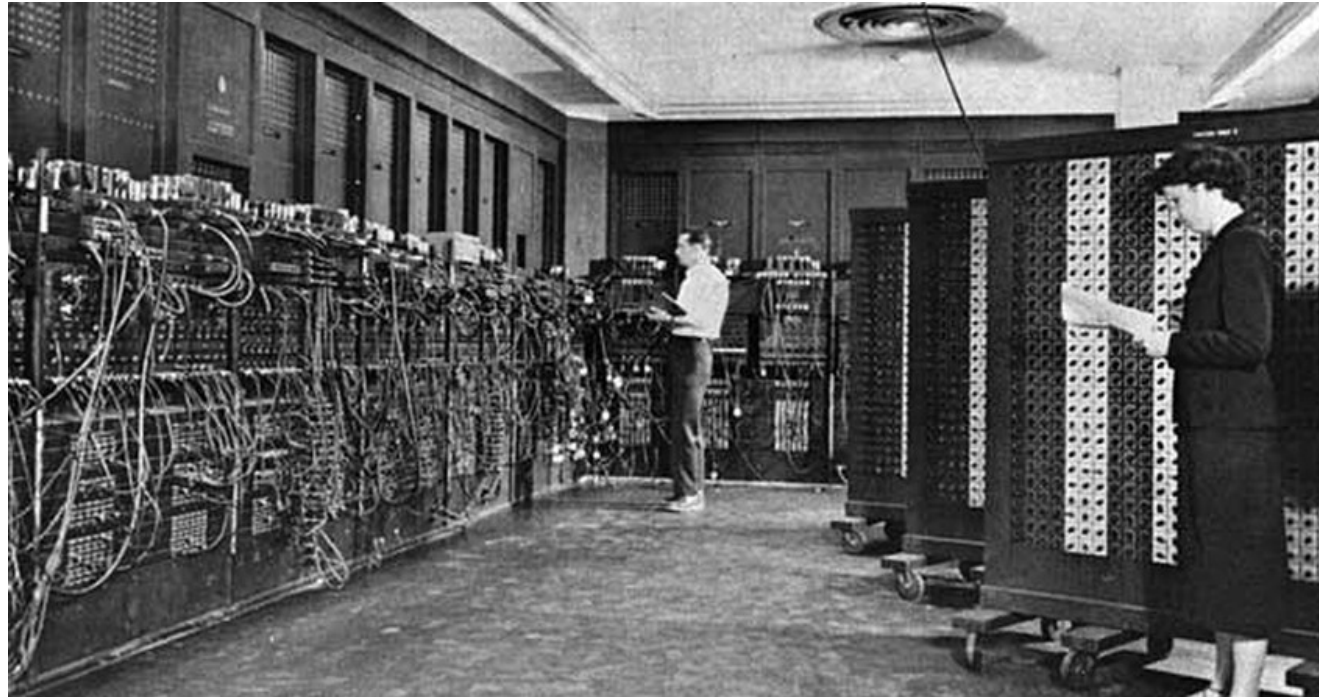
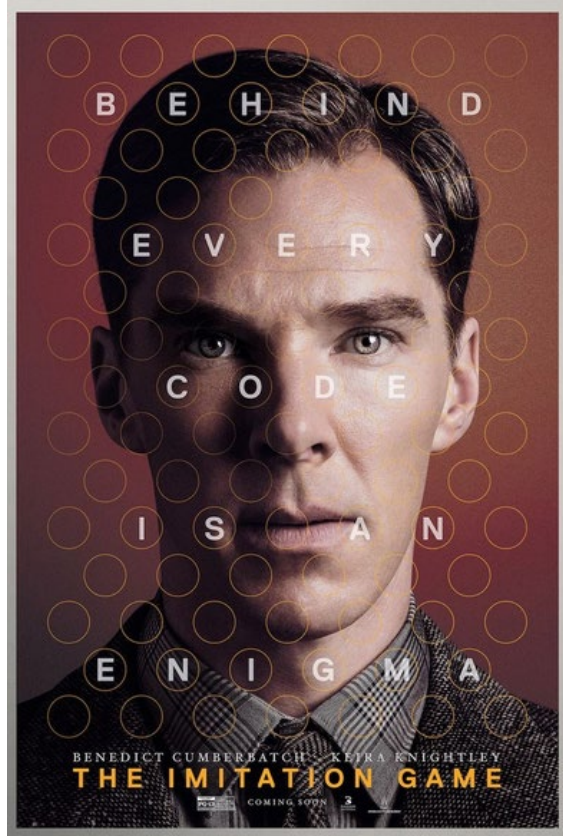
## Exemplos históricos



Jacquard



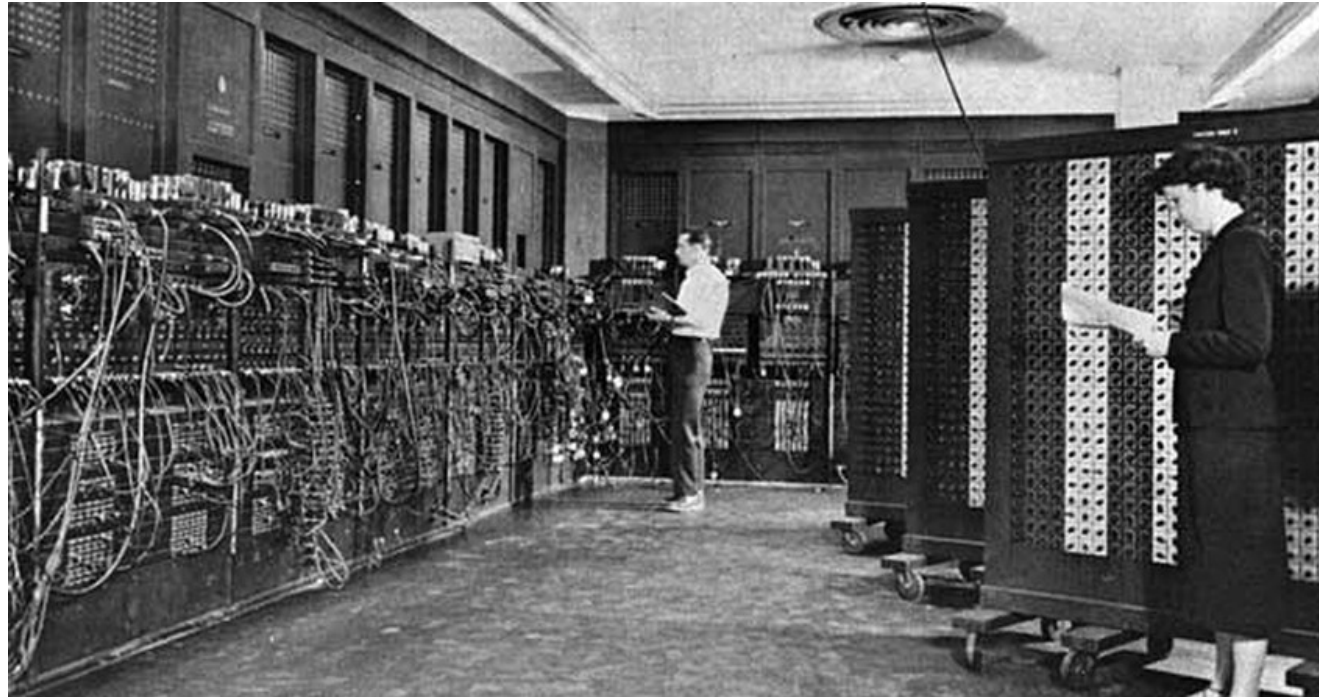
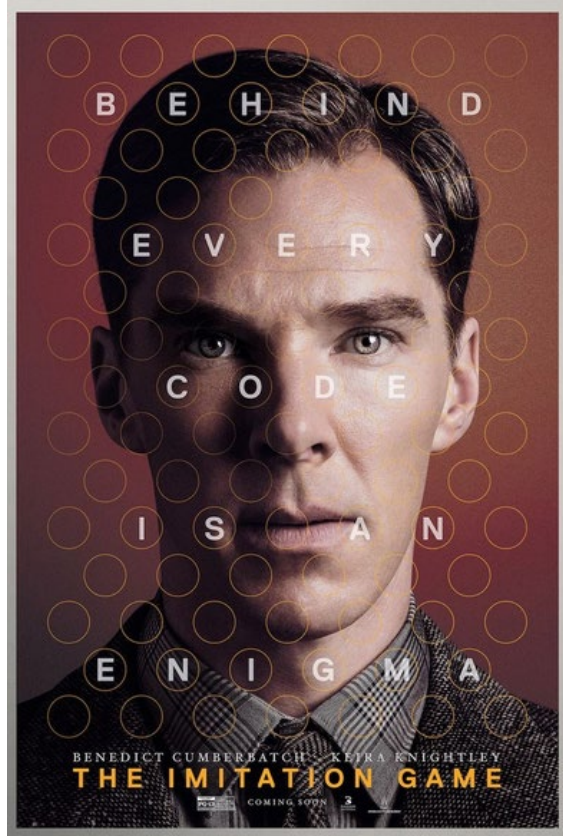




Jacquard







Jacquard





# ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



## Avanços disruptivos no uso da energia

Energia (trabalho mecânico, eletricidade) para a produção em larga escala de bens de consumo, alimentos, vestuário, utensílios, etc., e ampliação dos serviços de transportes, iluminação, aquecimento, etc.



## REVOLUÇÃO INDUSTRIAL



## QUALIDADE DE VIDA

$$\text{IDH} = \frac{1}{3}(\text{Longevidade} + \text{Educação} + \text{Renda})$$



**THE HISTORY CHANNEL**





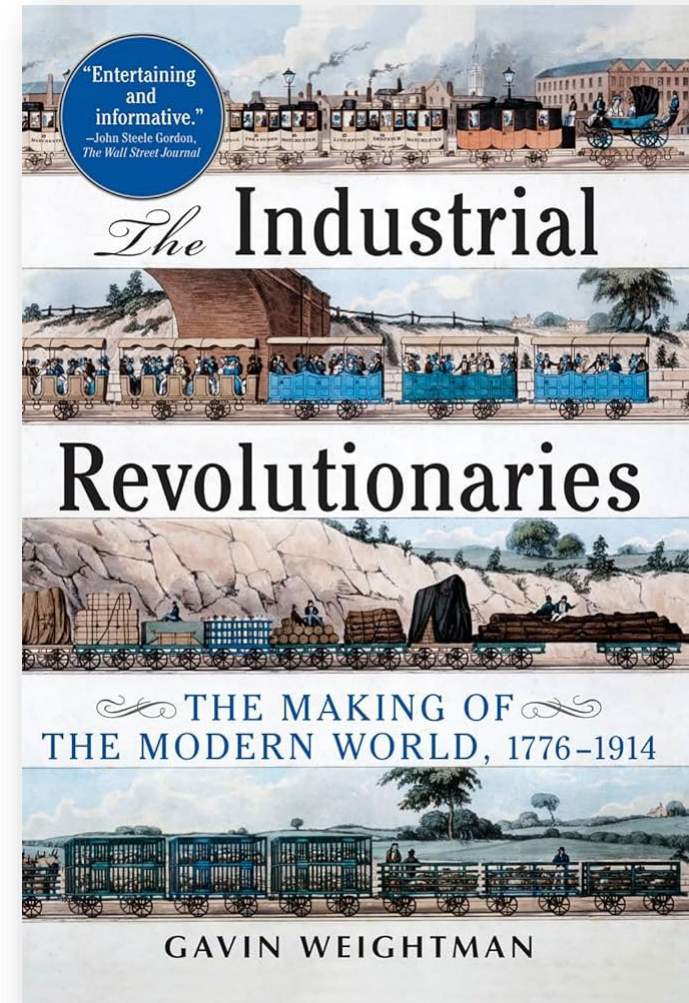
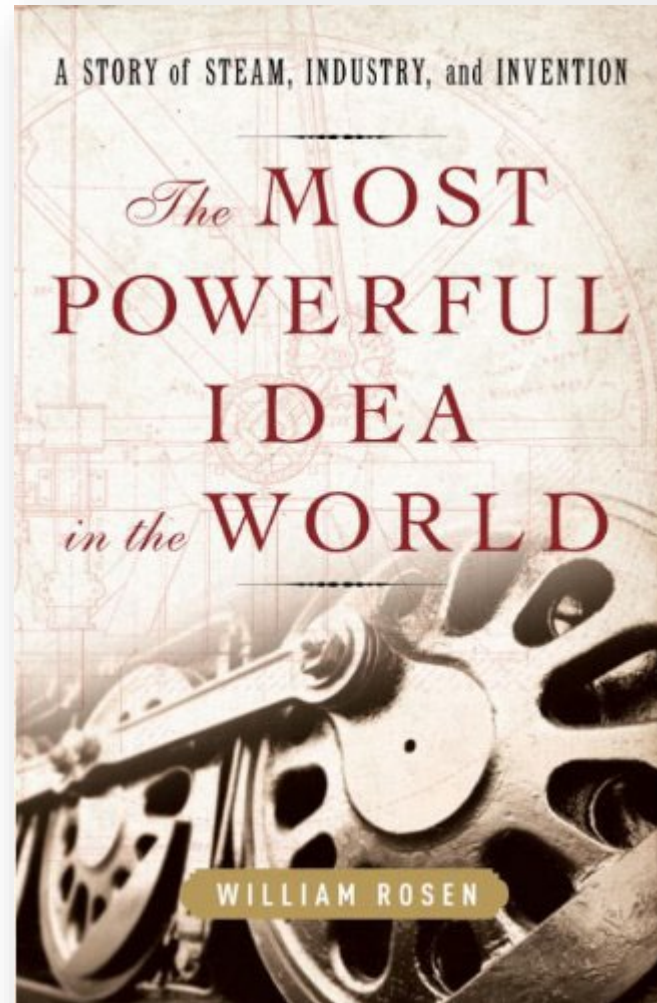
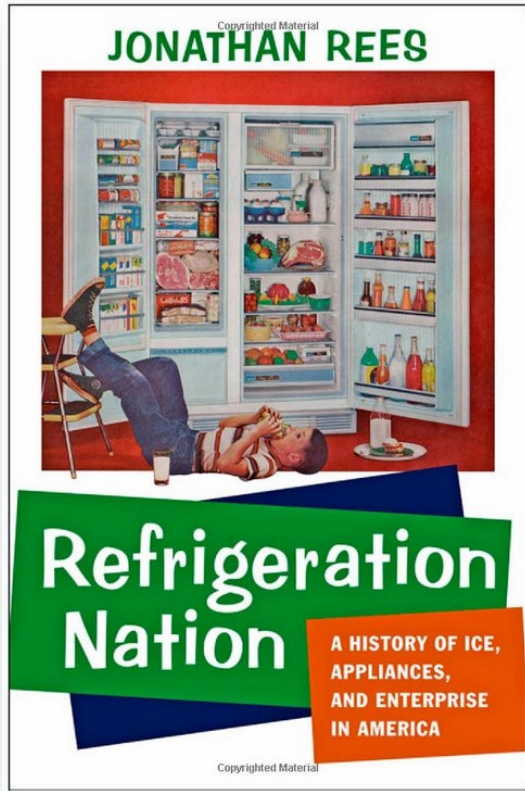
Q#1: por que se considera que o desenvolvimento das máquinas térmicas desencadeou a revolução industrial ?

- A) Porque permitiu a automação e o aumento da produção, transformando radicalmente os processos industriais e impulsionando o crescimento econômico... (ChatGPT)
- B) Porque as MT's mitigam as mudanças climáticas e o aquecimento global...
- C) Porque permitiu a erradicação das doenças infecciosas...
- D) Porque permite produzir grandes quantidades de energia de acionamento (organizada) a partir de fontes de energia desorganizada e abundante (calor)...
- E) É impossível saber...



Obs.: coloque esta pergunta no Chat GPT e solicite uma resposta em uma única frase.

1



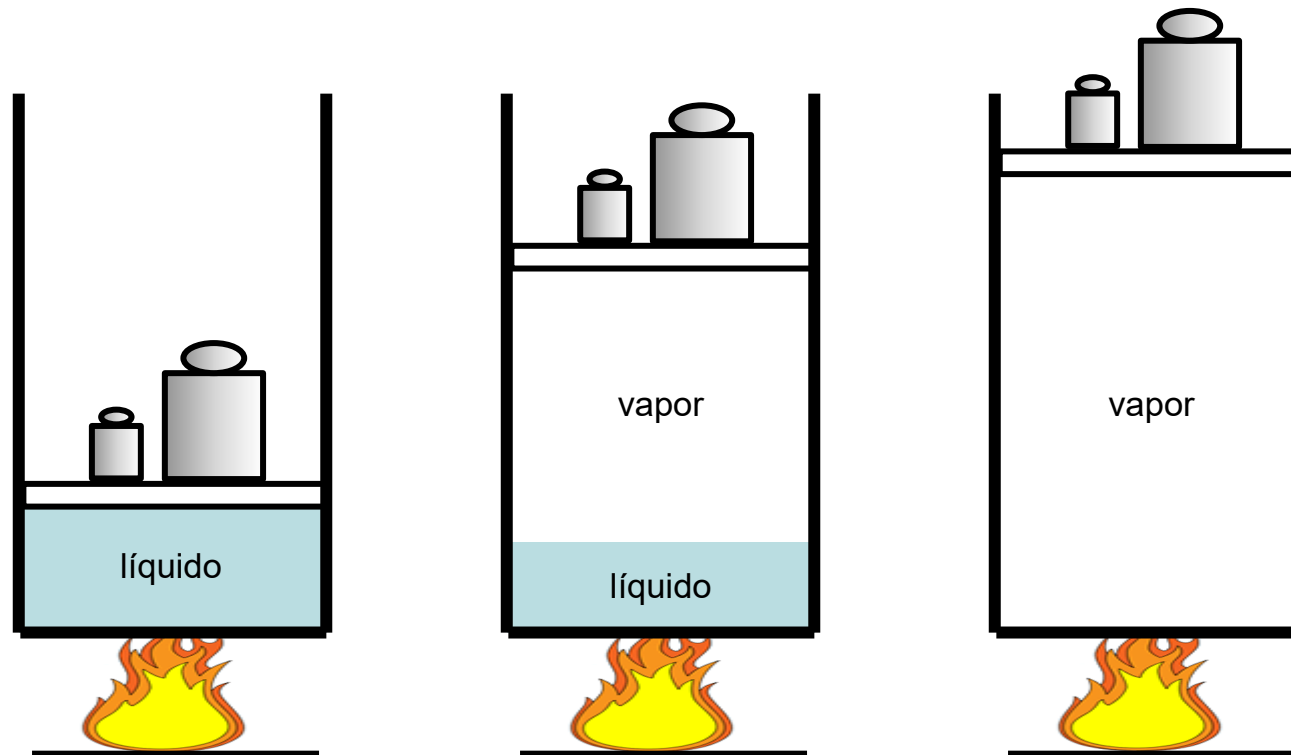


# Termodinâmica: Definições de trabalho...

# SISTEMAS E VOLUMES DE CONTROLE...

## Definições:

1. Sistema: quantidade de matéria selecionada para estudo
2. Vizinhança: massa ou região fora do sistema
3. Fronteira: interface que separa o sistema de sua vizinhança

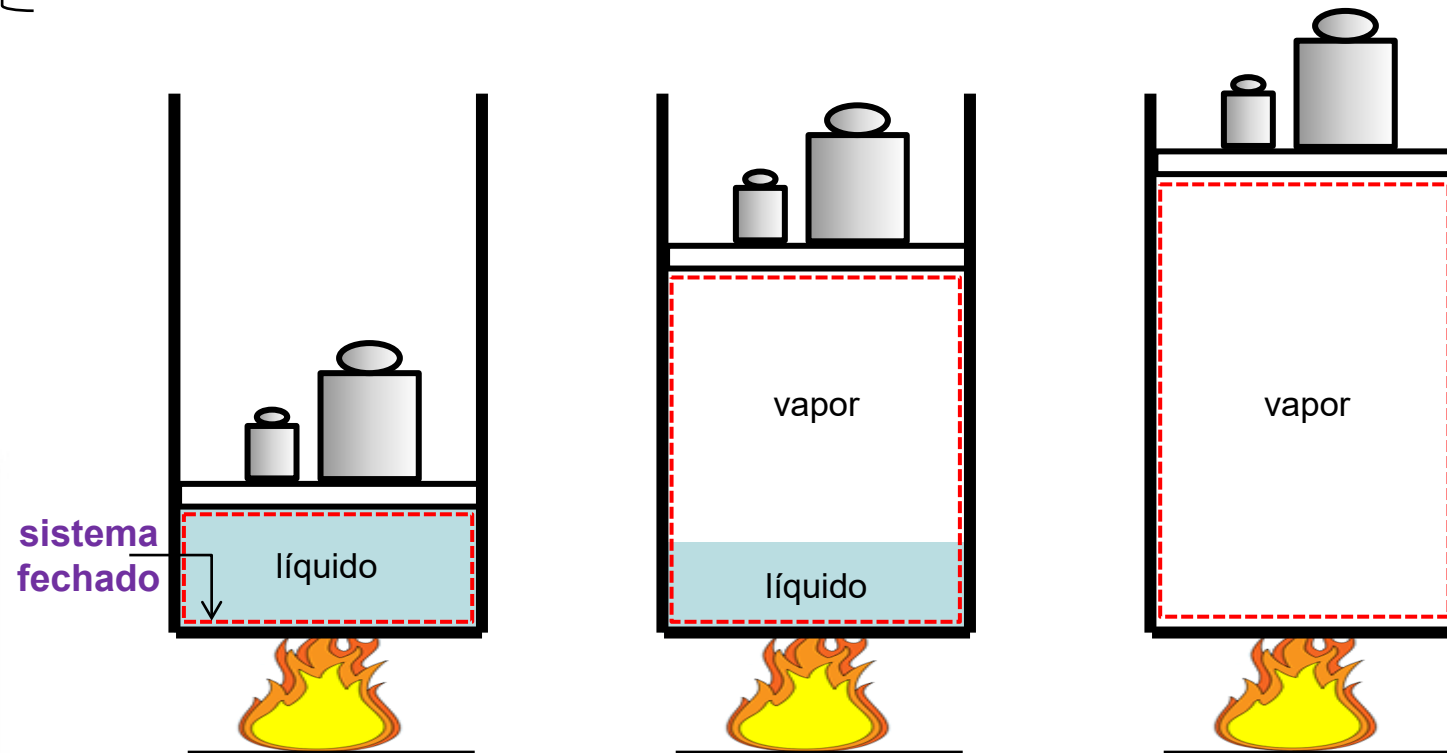




# SISTEMAS E VOLUMES DE CONTROLE...

## Definições:

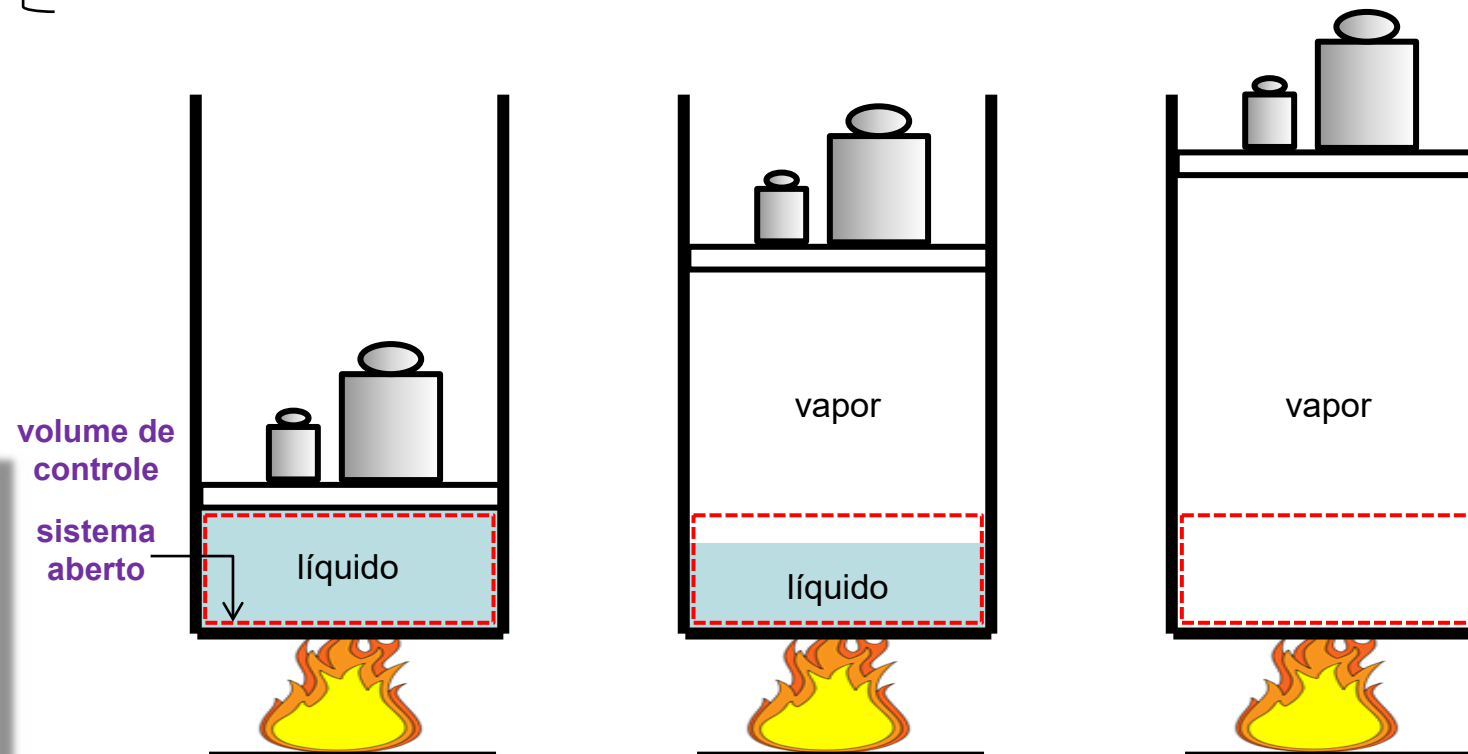
1. Sistema: quantidade de matéria selecionada para estudo
2. Vizinhança: massa ou região fora do sistema
3. Fronteira: interface que separa o sistema de sua vizinhança



# SISTEMAS E VOLUMES DE CONTROLE...

## Definições:

1. Sistema: quantidade de matéria selecionada para estudo
2. Vizinhança: massa ou região fora do sistema
3. Fronteira: interface que separa o sistema de sua vizinhança



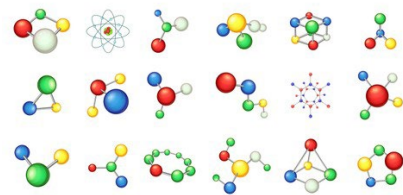


# EQ. TERMODINÂMICO: MUNDOS MICROSCÓPICO E MACROSCÓPICO

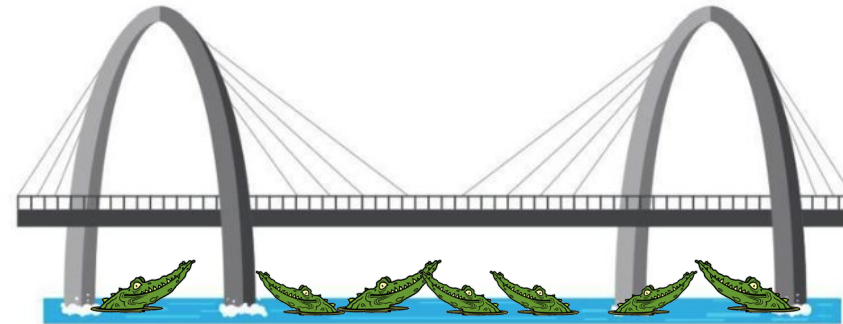


Ludwig Boltzmann (1844-1906)

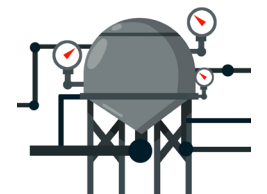
Temperatura existe ?



mundo  
microscópico



termodinâmica estatística

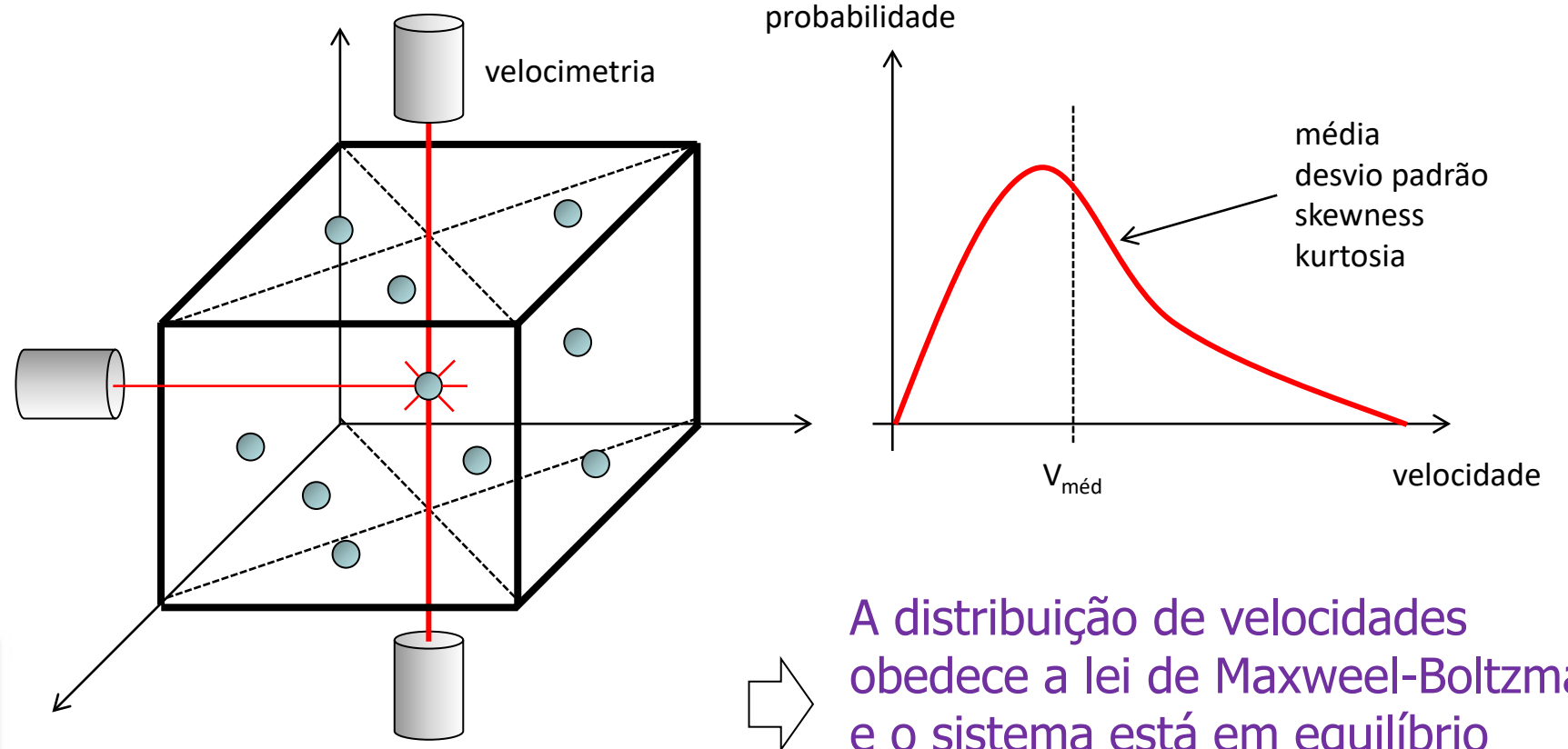


mundo  
macroscópico

# EQ. TERMODINÂMICO: MUNDOS MICROSCÓPICO E MACROSCÓPICO



Ludwig Boltzmann (1844-1906)



A distribuição de velocidades obedece a lei de Maxweel-Boltzmann e o sistema está em equilíbrio termodinâmico



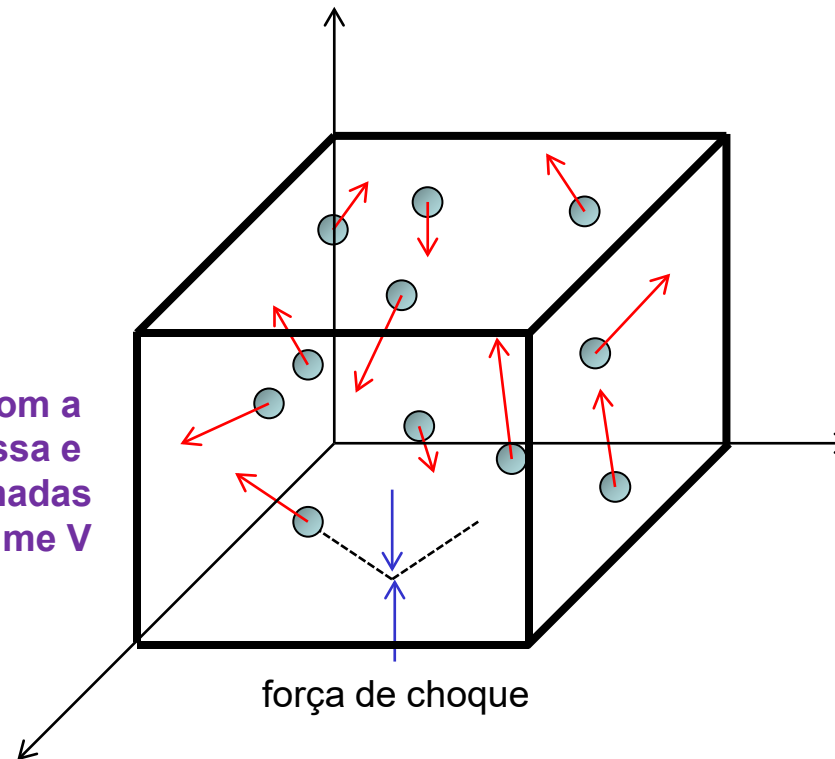
# EQ. TERMODINÂMICO: MUNDOS MICROSCÓPICO E MACROSCÓPICO

## Propriedades canônicas

↩	{	Volume:	volume geométrico definido pelo sistema	}	extensivas
		Temperatura:	energia cinética média das partículas		}
		Pressão:	força média de choque das partículas		

$$Prop. Macro = \int pdf(Vel)f(Vol)dVol$$

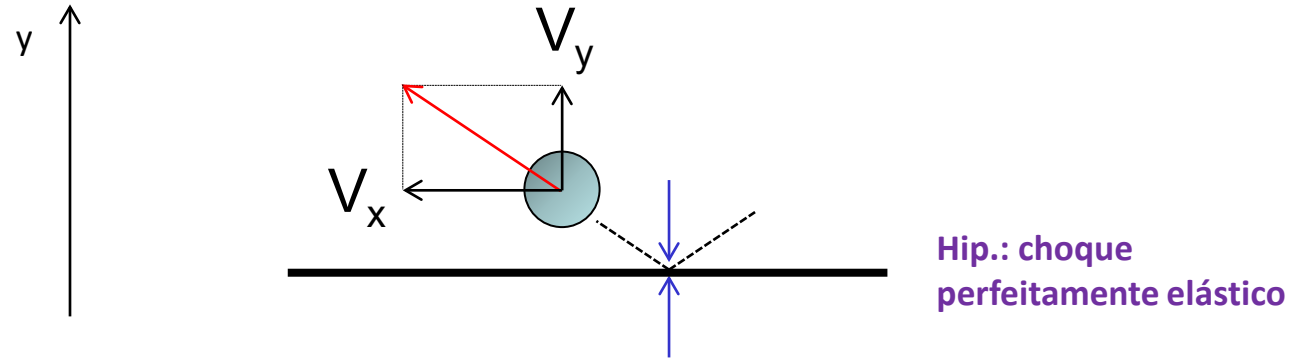
N partículas com a mesma massa e velocidade, confinadas em um volume V



As propriedades de um sistema (canônicas) são independentes ?

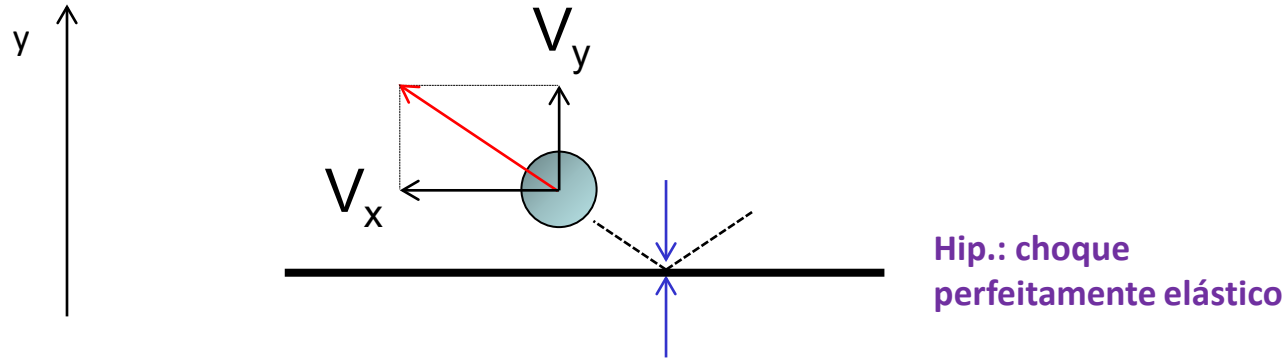


# Varição da quantidade de movimento na direção y



$$\Delta(mV) = mV_{\text{final}} - mV_{\text{inicial}}$$

# Variação da quantidade de movimento na direção y



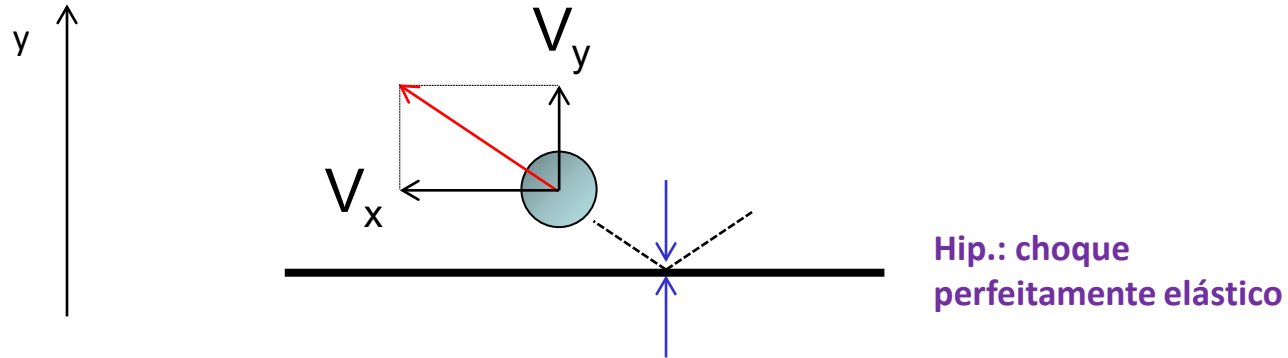
$$\Delta(mV) = mV_{\text{final}} - mV_{\text{inicial}}$$

$$\Delta(mV)^{\text{hip}} = (+mV_y) - (-mV_y)$$





# Variação da quantidade de movimento na direção y



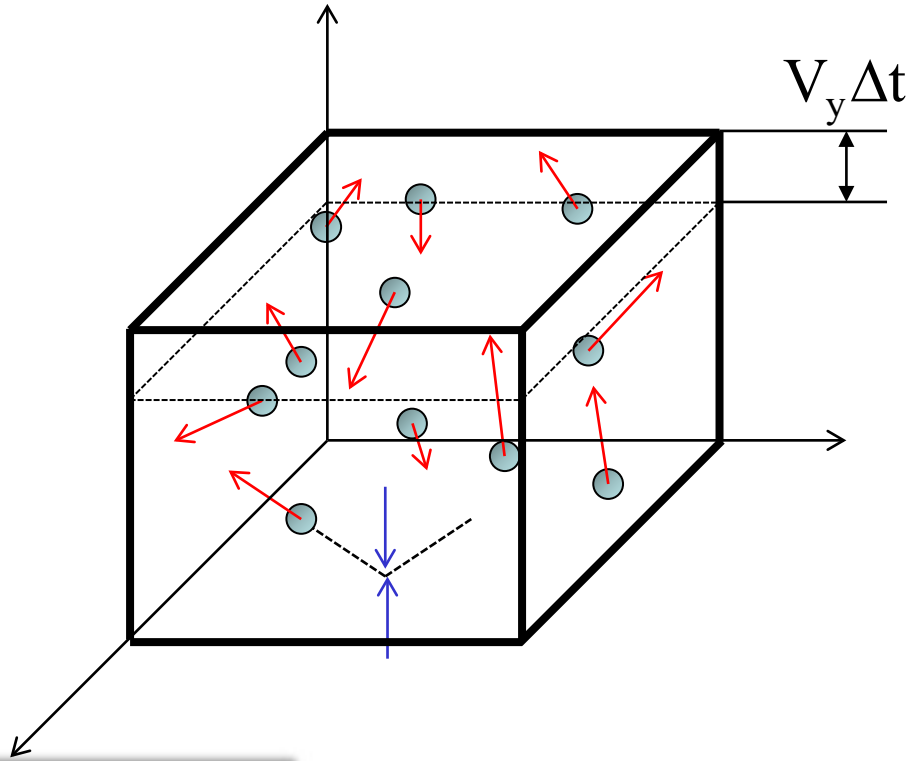
$$\Delta(mV) = mV_{\text{final}} - mV_{\text{inicial}}$$

$$\Delta(mV)^{\text{hip}} = (+mV_y) - (-mV_y)$$

$$\Delta(mV) = +2mV_y$$



# Quantidade de partículas que se chocarão com a face superior do sistema



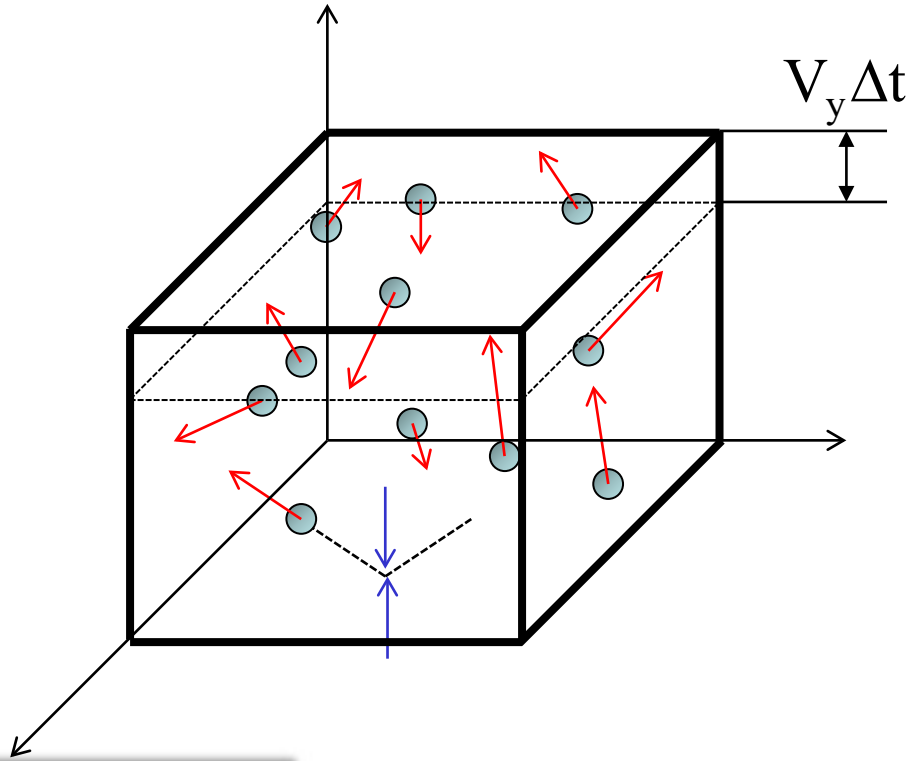
$$\# \text{partículas} = \frac{N}{2} \cdot \left( \frac{\text{volume}}{\text{volume total}} \right)$$

Hip.: meio contínuo;  
apenas metade das  
partículas têm  $V_y$  no  
mesmo sentido do eixo  
 $y$

$$\# \text{partículas} = \frac{1}{2} \frac{N}{V} \cdot AV_y \Delta t$$



# Quantidade de partículas que se chocarão com a face superior do sistema



$$\# \text{partículas} = \frac{N}{2} \cdot \left( \frac{\text{volume}}{\text{volume total}} \right)$$

Hip.: meio contínuo;  
apenas metade das  
partículas têm  $V_y$  no  
mesmo sentido do eixo  
 $y$

$$\# \text{partículas} = \frac{1}{2} \frac{N}{\cancel{V}} \cdot AV_y \Delta t$$

## Variation total da quantidade de movimento

$$\Delta QDM = (\# \text{partículas}) \cdot (\Delta QDM_{\text{partícula}})$$



Les SLIDES suivantes sont  
**ANTI-PÉDAGOGIQUE**

Soyez attentif à la séquence  
logique, pas nécessairement à la  
manipulation mathématique...



## Variação total da quantidade de movimento

$$\Delta QDM = (\# \text{ partículas}) \cdot (\Delta QDM_{\text{partícula}})$$

$$\Delta QDM = \left( \frac{1}{2} \frac{N}{V} \cdot A V_y \Delta t \right) \cdot (2mV_y)$$

## Variação total da quantidade de movimento

$$\Delta QDM = (\# \text{ partículas}) \cdot (\Delta QDM_{\text{partícula}})$$

$$\Delta QDM = \left( \frac{1}{2} \frac{N}{V} \cdot A V_y \Delta t \right) \cdot (2mV_y)$$

$$\Delta QDM = \frac{N}{V} \cdot mV_y^2 \cdot A \Delta t$$



## Segunda lei de Newton

$$\text{Força} = \frac{\Delta QDM}{\Delta t}$$



## Segunda lei de Newton

$$\text{Força} = \frac{\Delta \text{QDM}}{\Delta t}$$



$$\Delta \text{QDM} = \frac{N}{V} \cdot m V_y^2 \cdot A \Delta t \quad \Rightarrow \quad \text{Força} = \frac{N}{V} \cdot m V_y^2 \cdot A$$



## Segunda lei de Newton

$$\text{Força} = \frac{\Delta QDM}{\Delta t}$$



$$\Delta QDM = \frac{N}{V} \cdot mV_y^2 \cdot A\Delta t \Rightarrow \text{Força} = \frac{N}{V} \cdot mV_y^2 \cdot A$$

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \Rightarrow \text{Pressão} = \frac{N}{V} \cdot mV_y^2$$

## Segunda lei de Newton

$$\text{Força} = \frac{\Delta \text{QDM}}{\Delta t}$$



$$\Delta \text{QDM} = \frac{N}{V} \cdot m V_y^2 \cdot A \Delta t \Rightarrow \text{Força} = \frac{N}{V} \cdot m V_y^2 \cdot A$$

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \Rightarrow \text{Pressão} = \frac{N}{V} \cdot m V_y^2$$

$$P V = N \cdot m V_y^2 \Rightarrow P V = 2N \cdot \left( m V_y^2 / 2 \right)_{\text{médio}}$$

Quando as partículas  
têm velocidades diferentes

## Isotropia e escala absoluta de temperatura

$$PV = 2N \cdot \left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{m\u00e9dio}}$$



## Isotropia e escala absoluta de temperatura

$$PV = 2N \cdot \left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{m\u00e9dio}}$$

$$\left( \frac{mV_x^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}} = \left( \frac{mV_y^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}} = \left( \frac{mV_z^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}}$$

## Isotropia e escala absoluta de temperatura

$$PV = 2N \cdot \left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{m\u00e9dio}}$$

$$\left( \frac{mV_x^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}} = \left( \frac{mV_y^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}} = \left( \frac{mV_z^2}{2} \right)_{\text{m\u00e9d}}$$

$$\left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{m\u00e9dio}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} k \cdot T \quad \Rightarrow \quad \left( mV^2 / 2 \right)_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

## Isotropia e escala absoluta de temperatura

$$PV = 2N \cdot \left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{médio}}$$

$$\left( \frac{mV_x^2}{2} \right)_{\text{méd}} = \left( \frac{mV_y^2}{2} \right)_{\text{méd}} = \left( \frac{mV_z^2}{2} \right)_{\text{méd}}$$

$$\left( mV_y^2 / 2 \right)_{\text{médio}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} k \cdot T \Rightarrow \left( mV^2 / 2 \right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$PV = \frac{2N}{3} \cdot \left( mV^2 / 2 \right)_{\text{médio}}$$

constante de Boltzmann  
 $k = 1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$



## Relação entre pressão, volume e temperatura

$$PV = \frac{2N}{3} \cdot \left( mV^2 / 2 \right)_{\text{médio}}$$



$$PV = Nk \cdot T$$

$$\left( mV^2 / 2 \right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

Quanto maior a velocidade, maior a energia cinética translacional e, conseqüentemente, maior a temperatura. As energias cinéticas associadas aos movimentos de rotação e vibração molecular não alteram a pressão.

## Eliminando N através da massa molecular...

$$\left(mV^2 / 2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2}k \cdot T$$

## Eliminando N através da massa molecular...

$$\left(mV^2 / 2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$\left(V^2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{m} \cdot kT \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

número de Avogadro



## Eliminando N através da massa molecular...

$$\left(mV^2 / 2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$\left(V^2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{m} \cdot kT \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

número de Avogadro

$$\left(V^2\right)_{\text{médio}} = 3T \cdot \frac{kN_A}{mN_A}$$

constante dos gases  
 $R=8.3145 \text{ J/mol/K}$

massa molecular, i.e. a  
massa de um mol de  
partículas

## Eliminando N através da massa molecular...

$$\left(mV^2 / 2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{2} k \cdot T$$

$$\left(V^2\right)_{\text{médio}} = \frac{3}{m} \cdot kT \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

número de Avogadro

$$\left(V^2\right)_{\text{médio}} = 3T \cdot \frac{kN_A}{mN_A}$$

constante dos gases  
 $R=8.3145 \text{ J/mol/K}$

massa molecular, i.e. a  
massa de um mol de  
partículas

$$V_{\text{méd}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

# Lei dos gases perfeitos

$$PV = Nk \cdot T$$



## Lei dos gases perfeitos

$$PV = Nk \cdot T$$

$$PV = Nk \cdot T \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

## Lei dos gases perfeitos

$$PV = Nk \cdot T$$

$$PV = Nk \cdot T \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

$$PV = \frac{N}{N_A} k N_A \cdot T$$

## Lei dos gases perfeitos

$$PV = Nk \cdot T$$

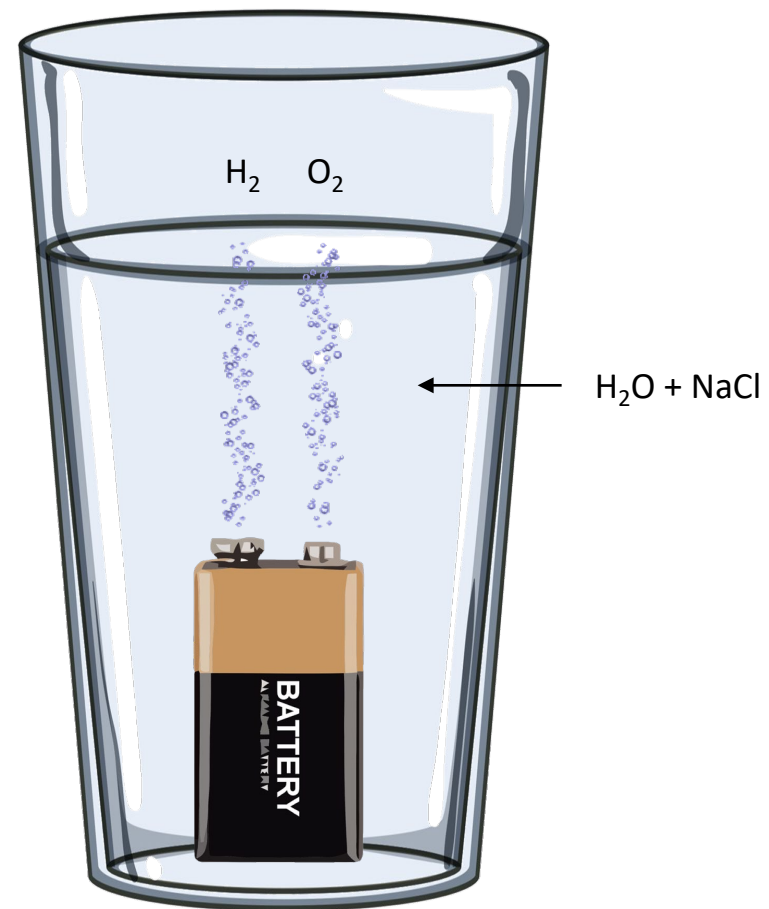
$$PV = Nk \cdot T \cdot \frac{N_A}{N_A}$$

$$PV = \frac{N}{N_A} k N_A \cdot T$$

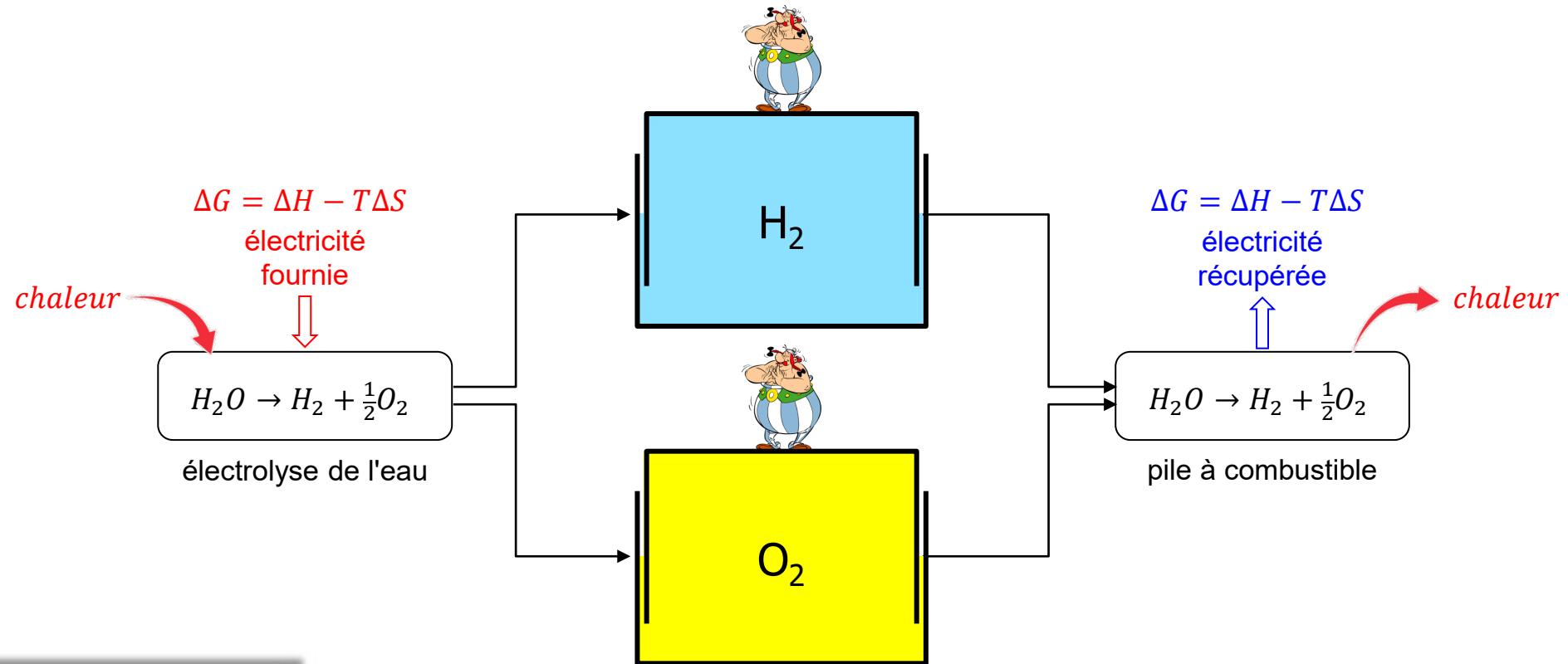
$$PV = nR \cdot T$$



$$PV = nR \cdot T$$



# stockage d'énergie: hydrogène électrolytique



Haute efficacité, haute densité énergétique...

Échanges thermiques et l'effet Joule peuvent dégrader l'efficacité...

Il existe une relation algébrique  
reliant la pression, le volume et la  
température...



... les propriétés d'un système ne  
sont pas indépendantes !

As propriedades de um sistema  
definem seu estado !

# EQUILÍBRIO TERMODINÂMICO

## LEI DOS GASES PERFEITOS

$$f(P, V, T) = 0$$

$$PV = nRT$$

## EQUAÇÃO DE VAN DER WAALS

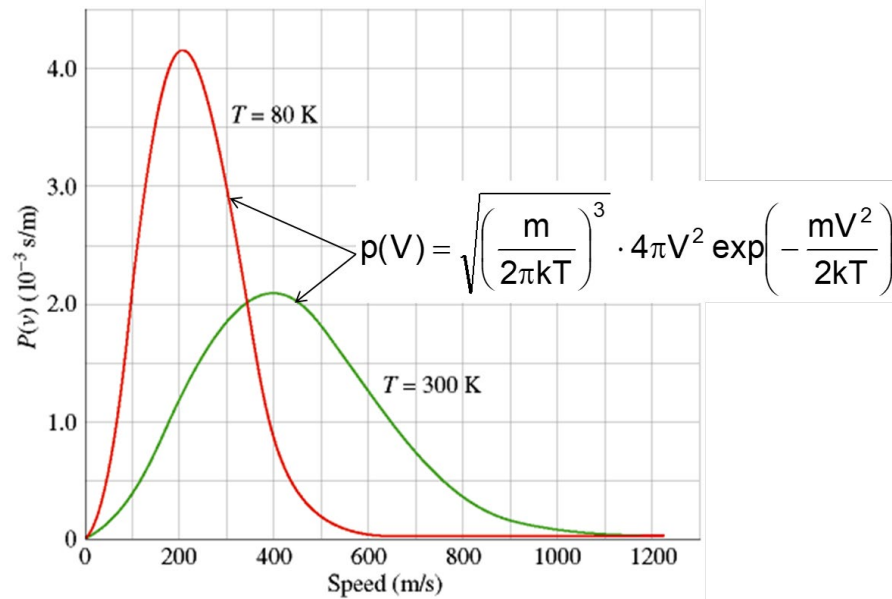
$$P + \frac{a}{V^2} (V - b) = nRT$$

⋮

## EQUAÇÃO DE ESTADO VIRIAL

$$\frac{PV}{nRT} = A + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots$$

⇒ **MODELOS: (TABELAS, SOFTWARE, ETC.)**







Q#2: a equação dos gases perfeitos resulta de quais hipóteses sobre a interação entre as partículas constituintes ?

- A) Efeitos quânticos e relativísticos resultante das altas velocidades características do movimento browniano...
- B) Influência das mudanças climáticas e do aquecimento global...
- C) Não há forças intermoleculares e os choques são perfeitamente elásticos...
- D) As forças intermoleculares são proporcionais ao quadrado da velocidade da luz...
- E) É impossível saber...



Chat GPT

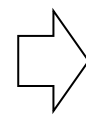
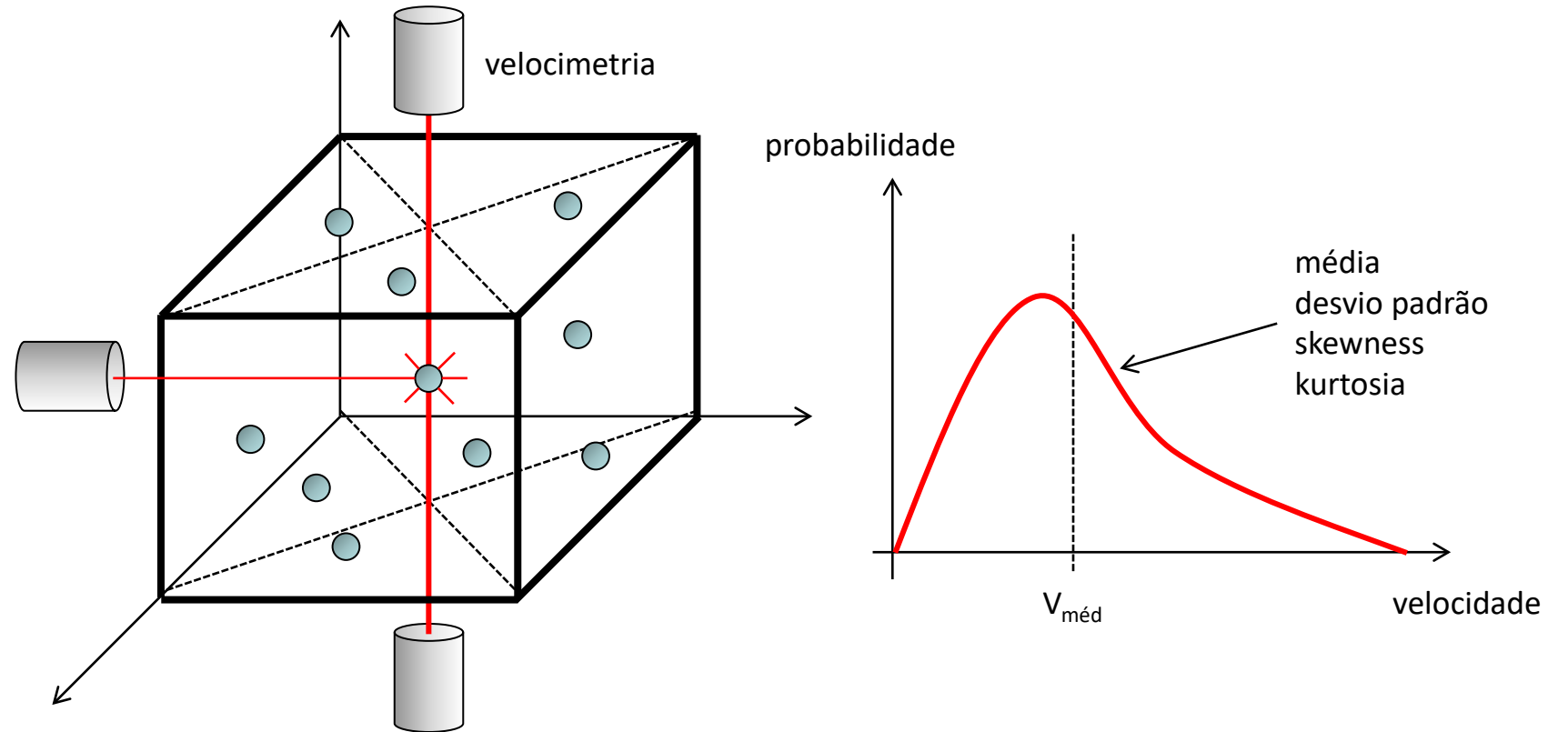
Obs.: coloque esta pergunta no Chat GPT e solicite uma resposta em uma única frase.

2

# EQ. TERMODINÂMICO: MUNDOS MICROSCÓPICO E MACROSCÓPICO

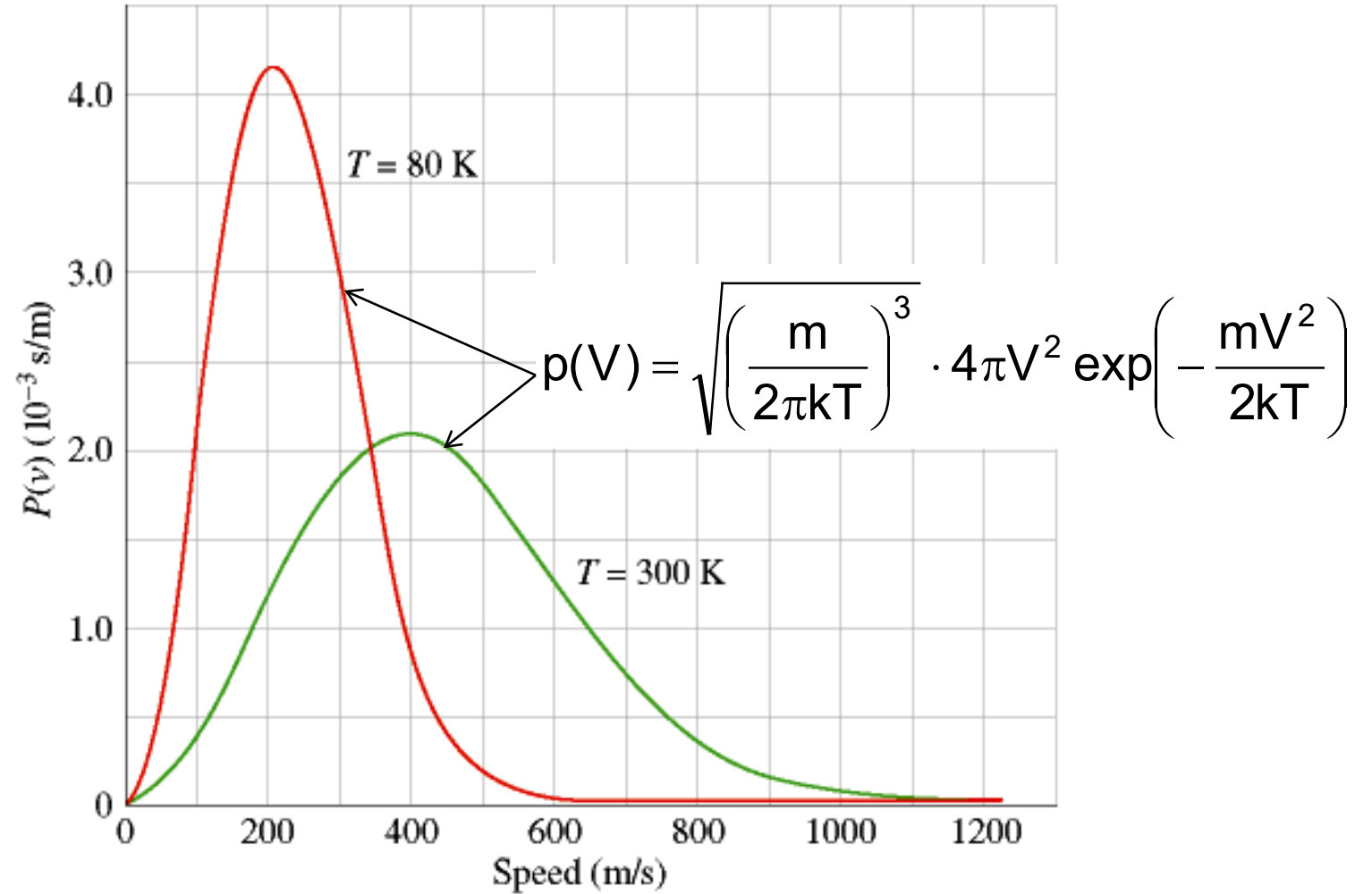


Ludwig Boltzmann (1844-1906)



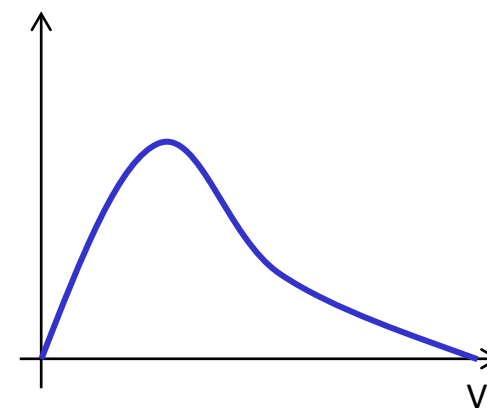
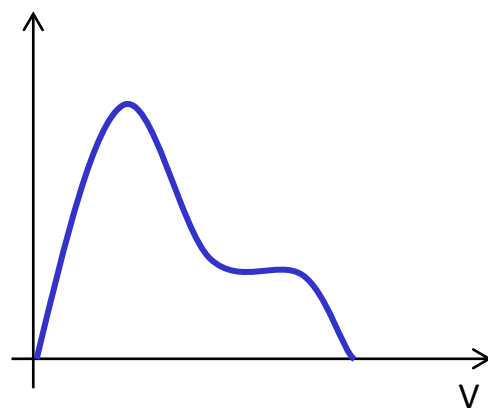
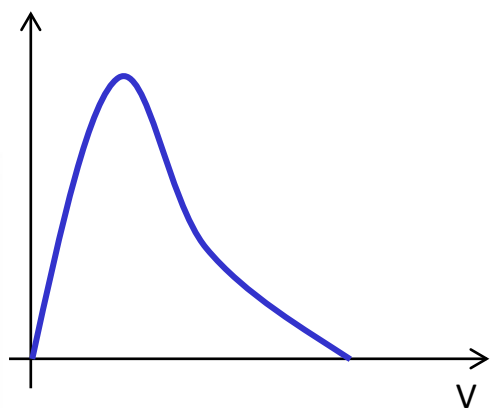
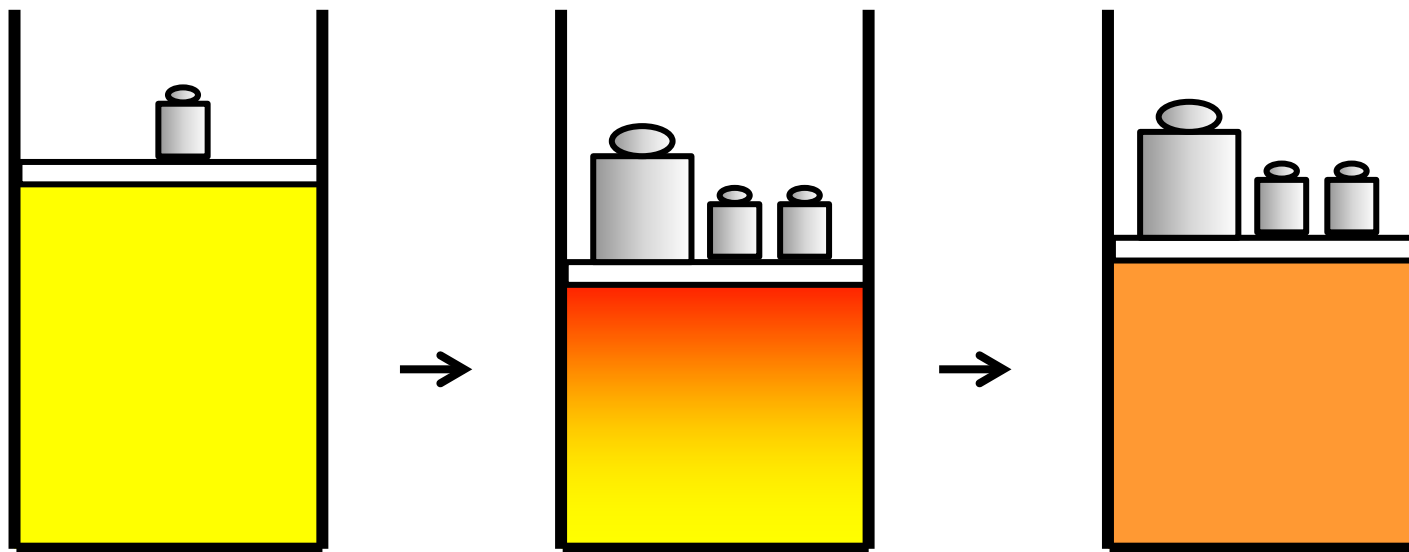
A distribuição de velocidades obedece a lei de Maxwell-Boltzmann e o sistema está em equilíbrio termodinâmico

# Distribuições de velocidades de equilíbrio

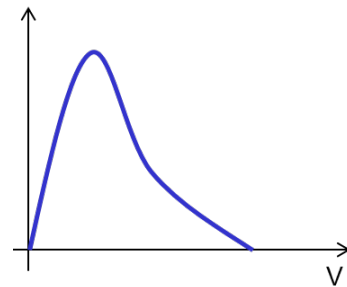
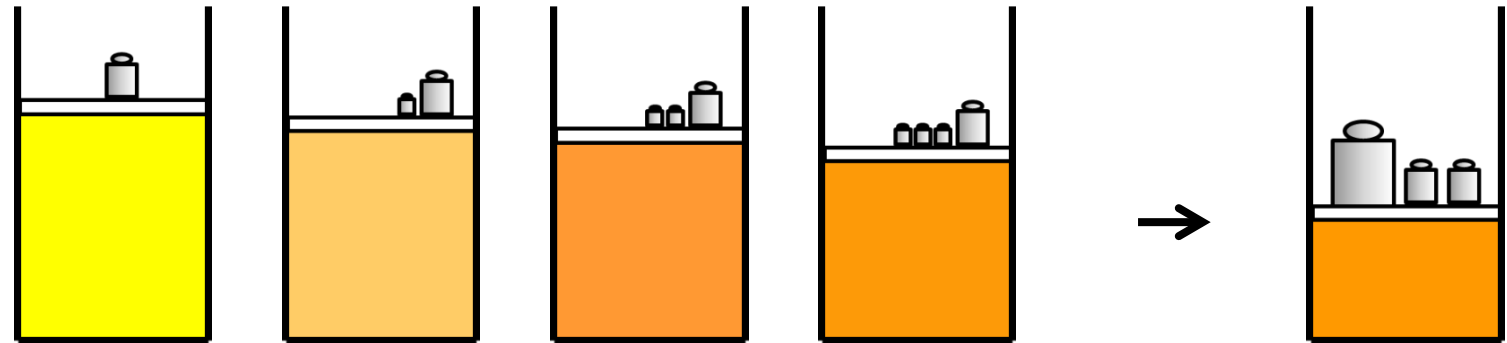




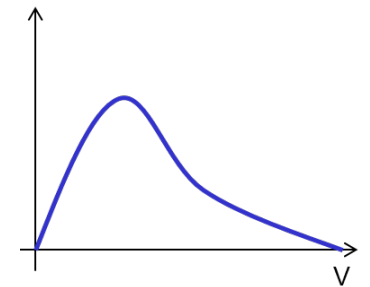
# Transformações de estado – tempo finito



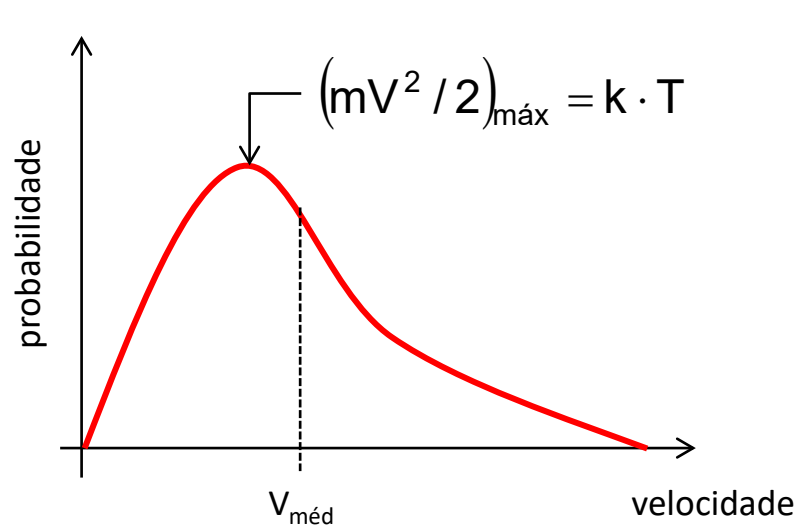
# Transformações de estado – tempo infinito



Em todos os momentos a distribuição de velocidades obedece a lei de Maxwell-Boltzmann: transformação "quase estática".



# Transformações quase estáticas



$$\left(\frac{mV^2}{2}\right)_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{3}{2}k \cdot T$$

$$p(V) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} \cdot 4\pi V^2 \exp\left(-\frac{mV^2}{2kT}\right)$$

$$p(V) = \sqrt{\frac{54}{\pi}} \cdot \frac{V^2}{V_{\text{m\u00e9d}}^3} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{V^2}{V_{\text{m\u00e9d}}^2}\right)$$

A distribuição de velocidades é definida por único parâmetro, p.e. TEMPERATURA.

Uma outra propriedade é necessária para definir completamente o estado, p.e. PRESSÃO.

ORDEM      okay  
                 ↓  
                 →      DESORDEM



*"I blame entropy."*

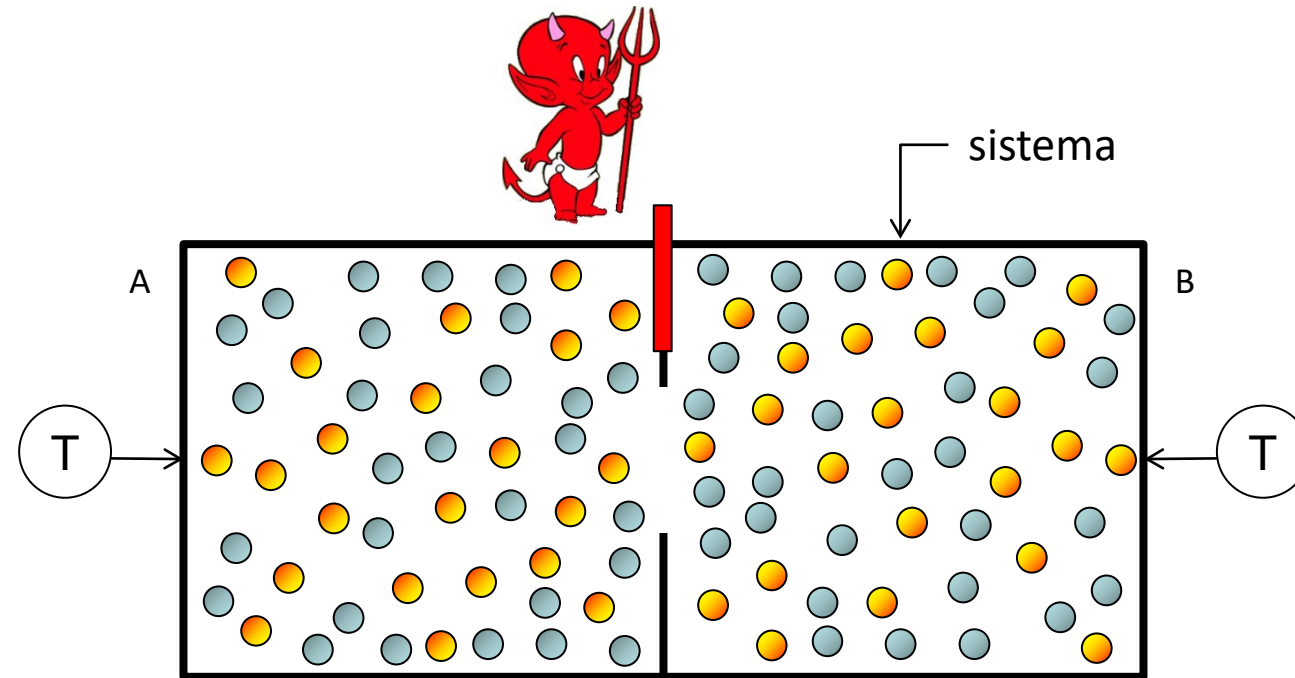


DESORDEM  $\xrightarrow{E?}$  ORDEM

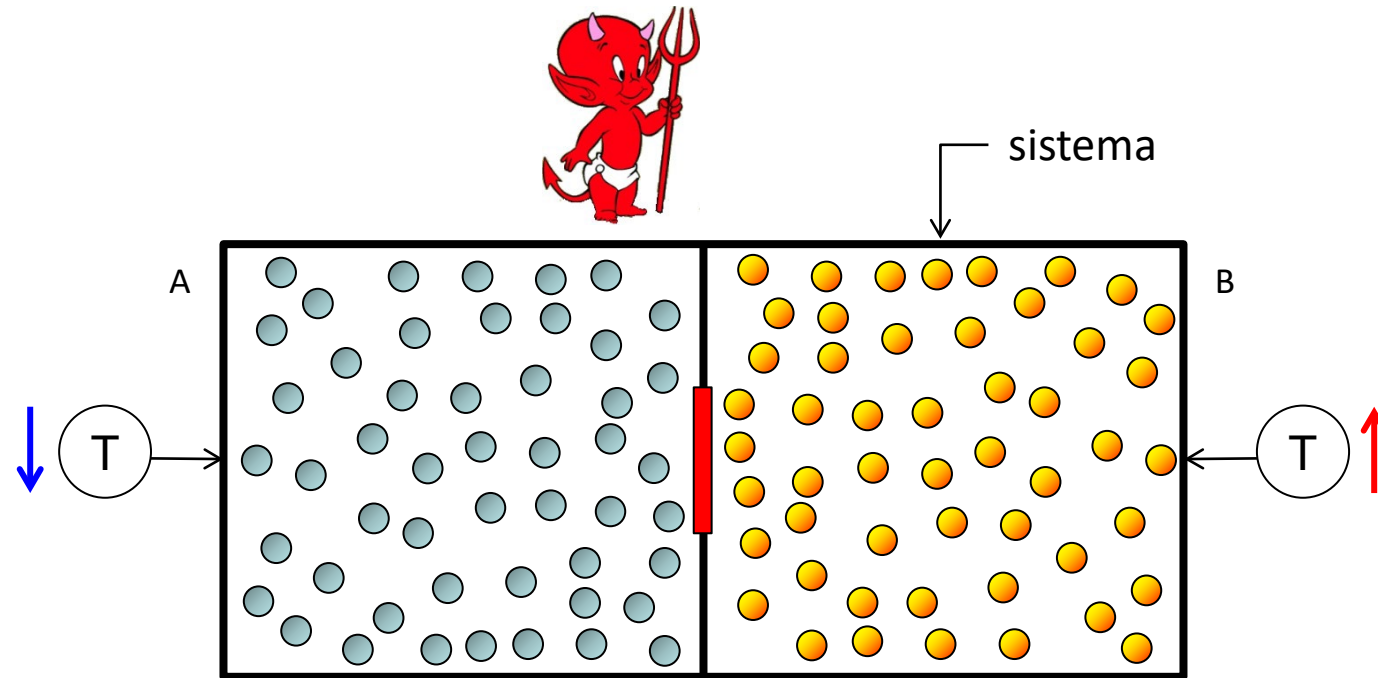


*"I blame entropy."*

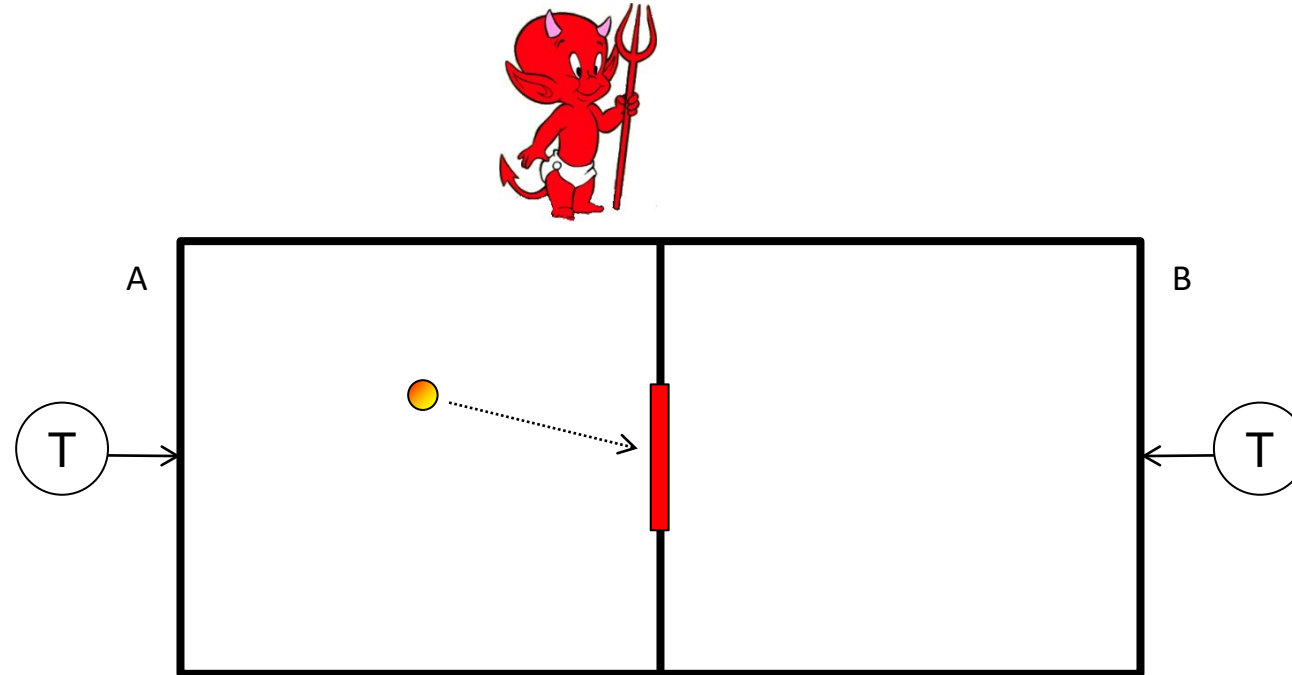
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental

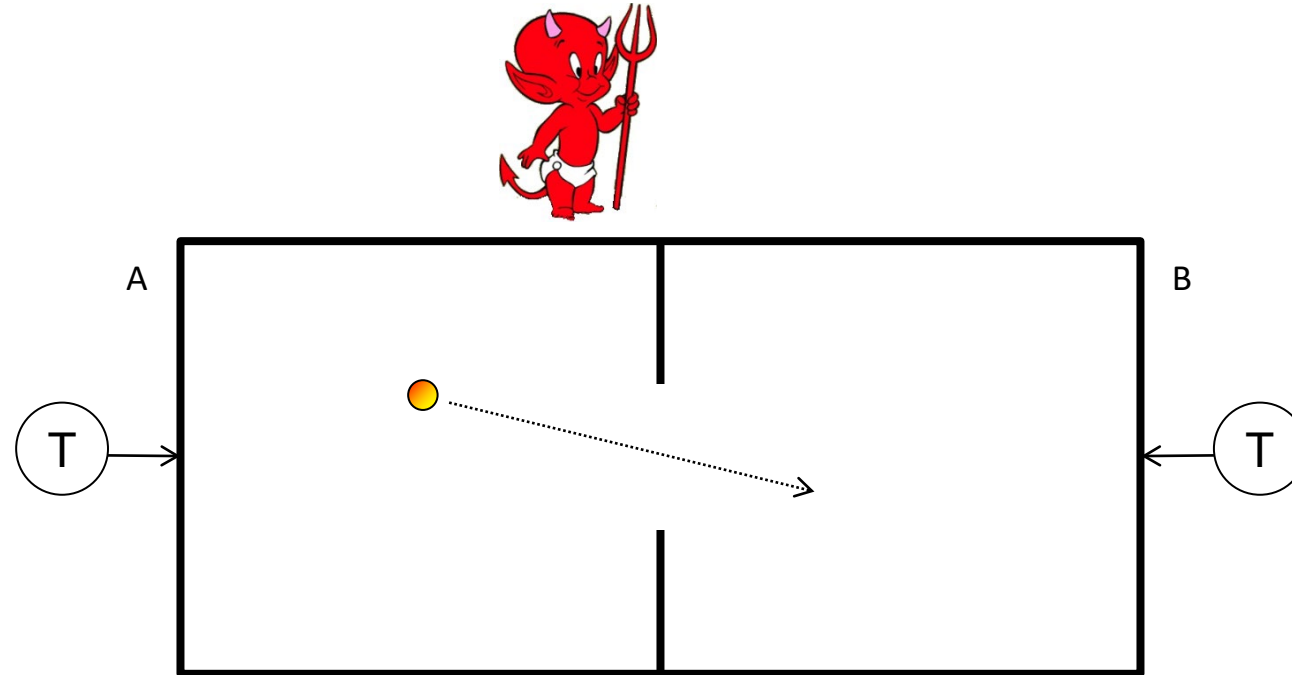


# O demônio de Maxwell: um experimento mental

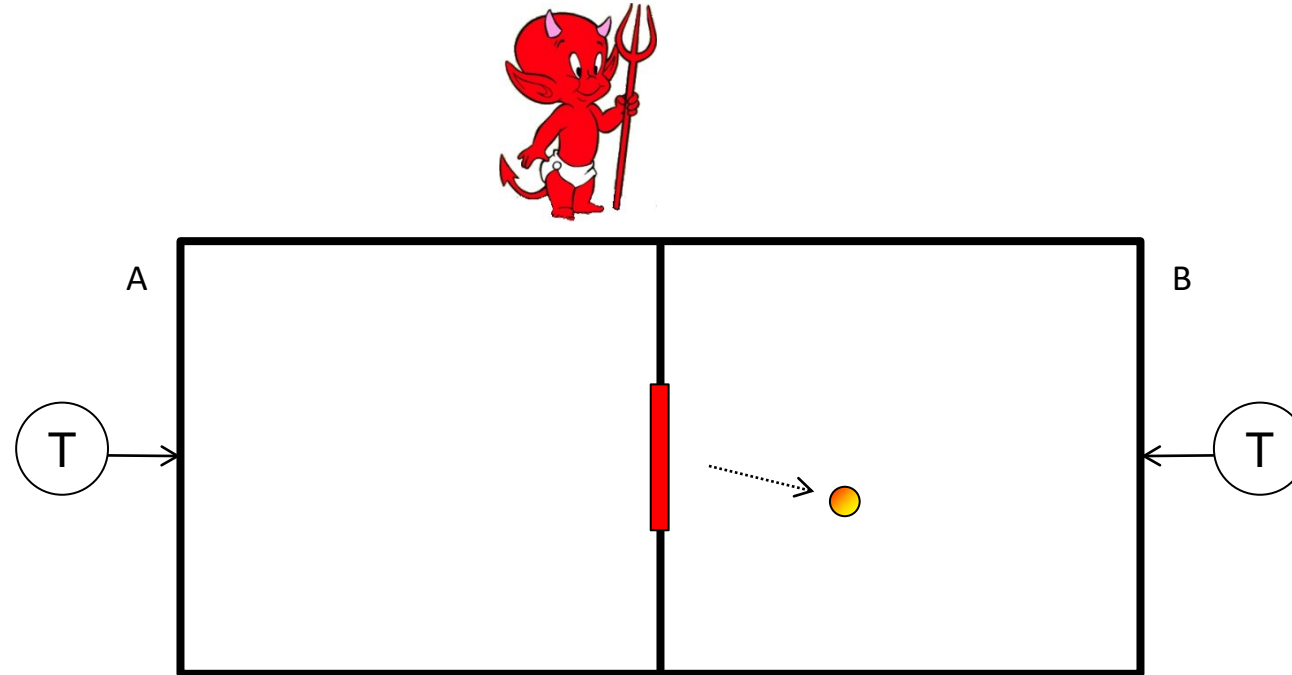




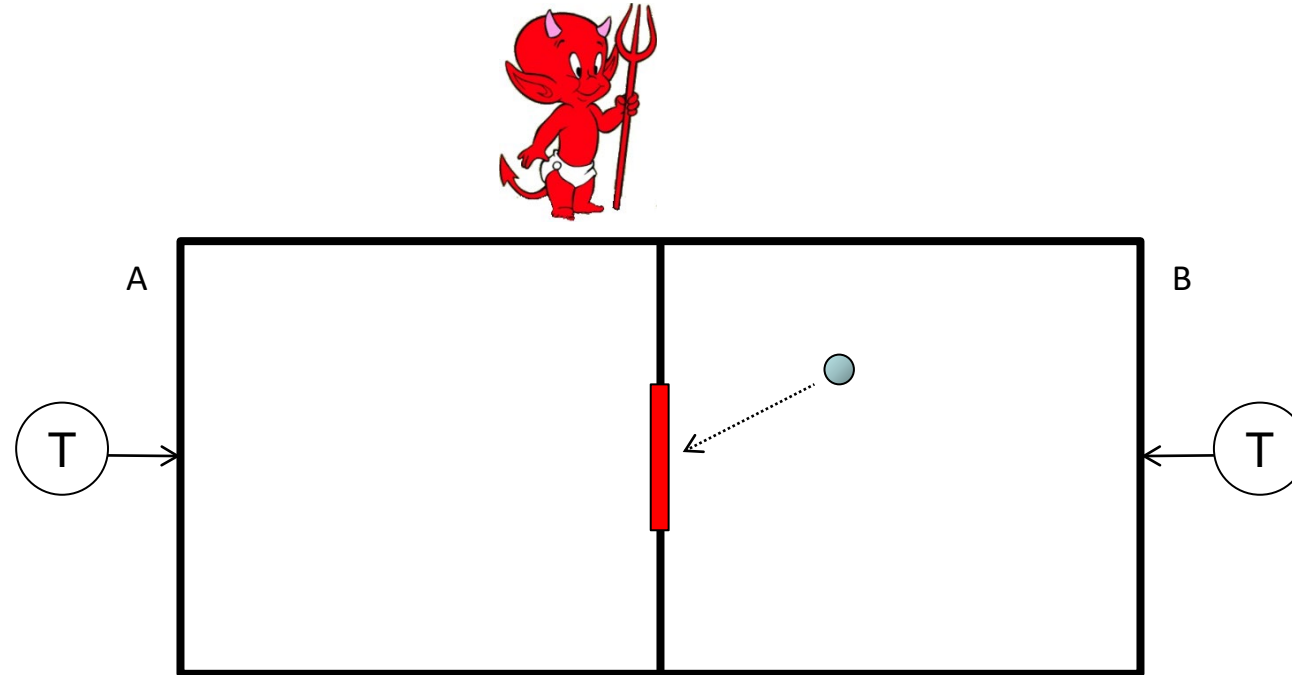
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



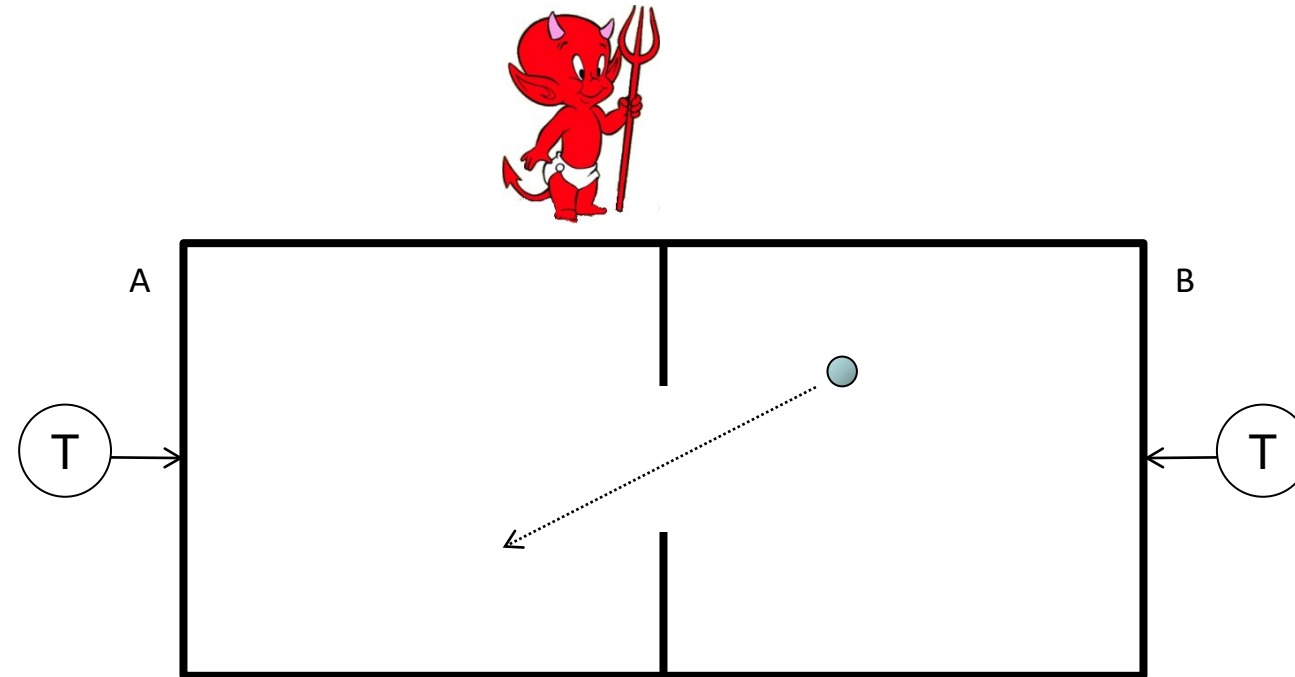
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental

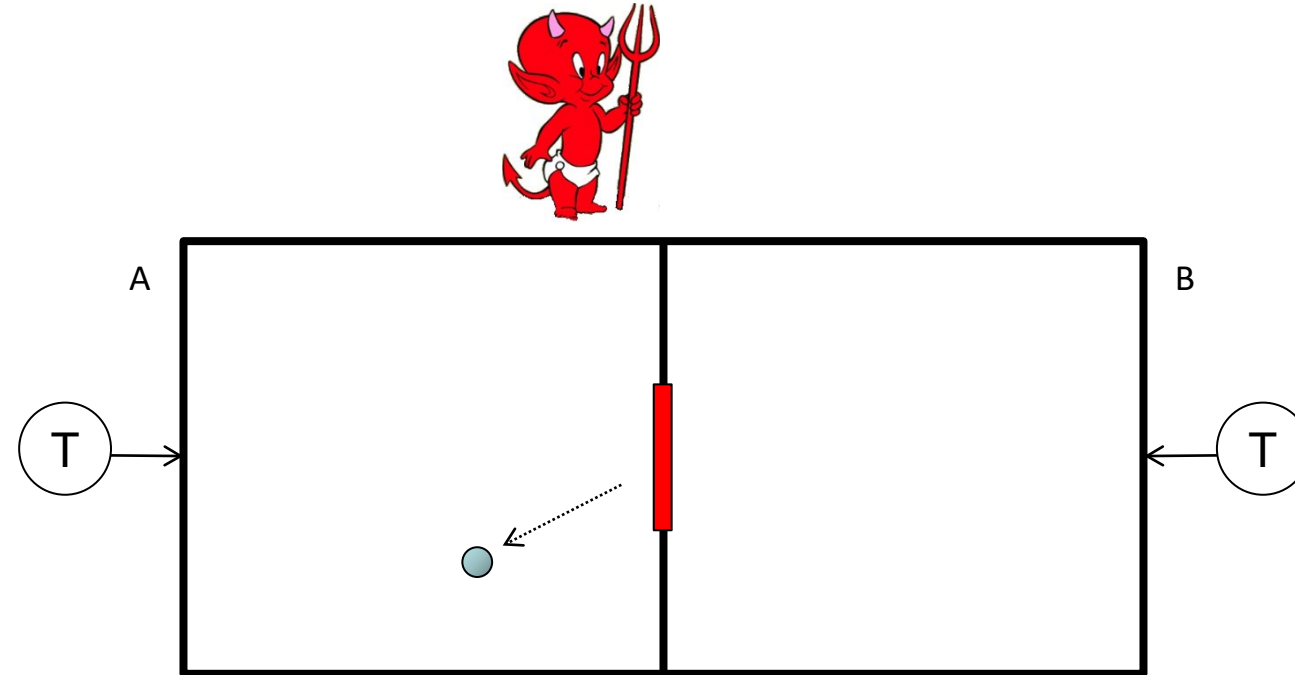


# O demônio de Maxwell: um experimento mental

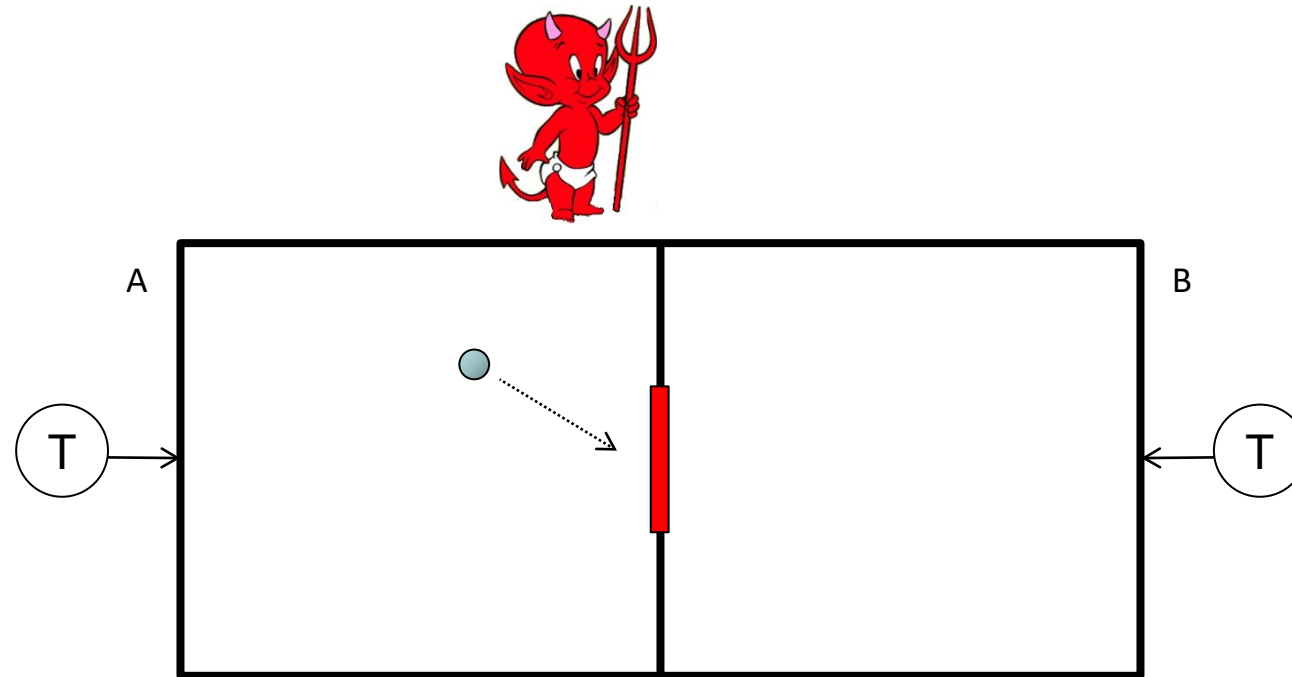




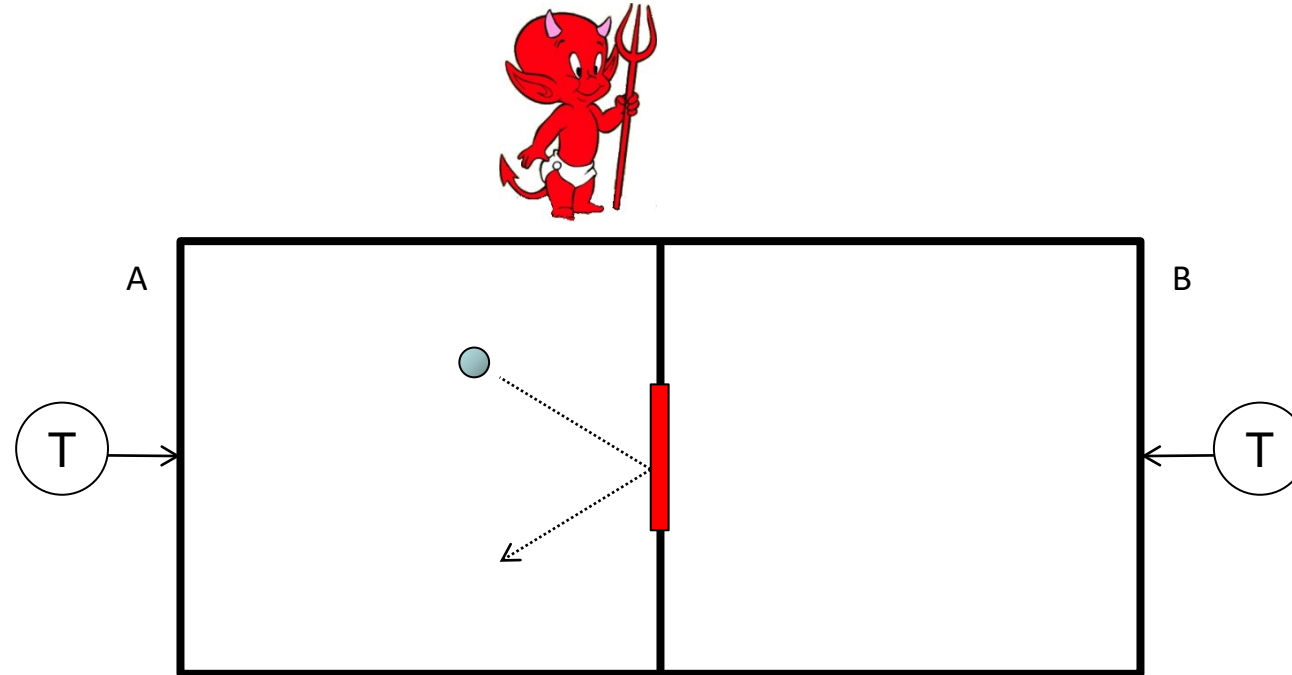
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



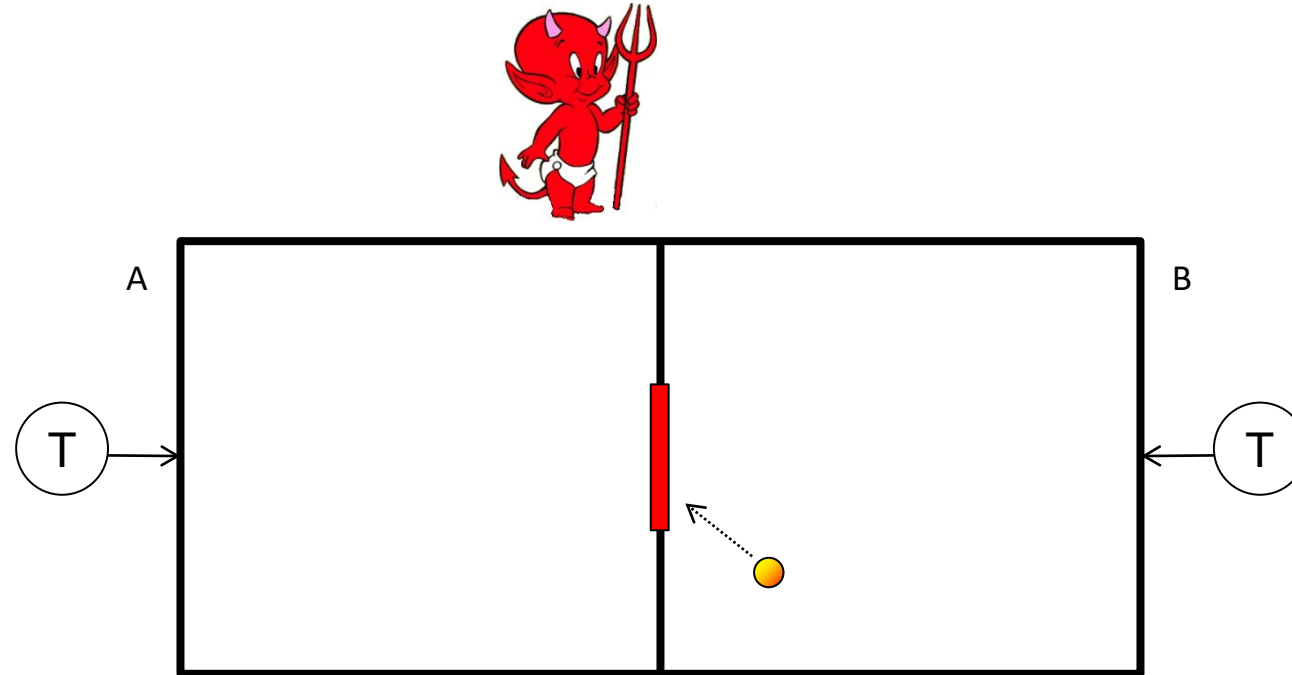
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental

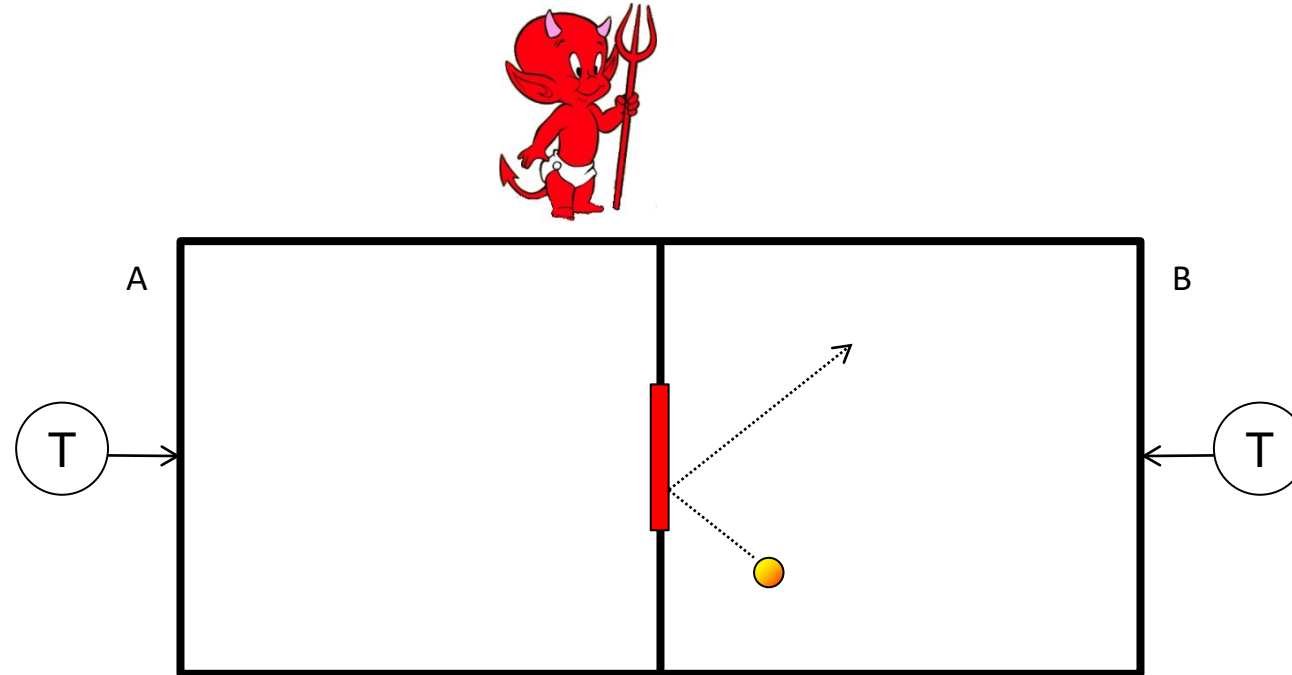


# O demônio de Maxwell: um experimento mental

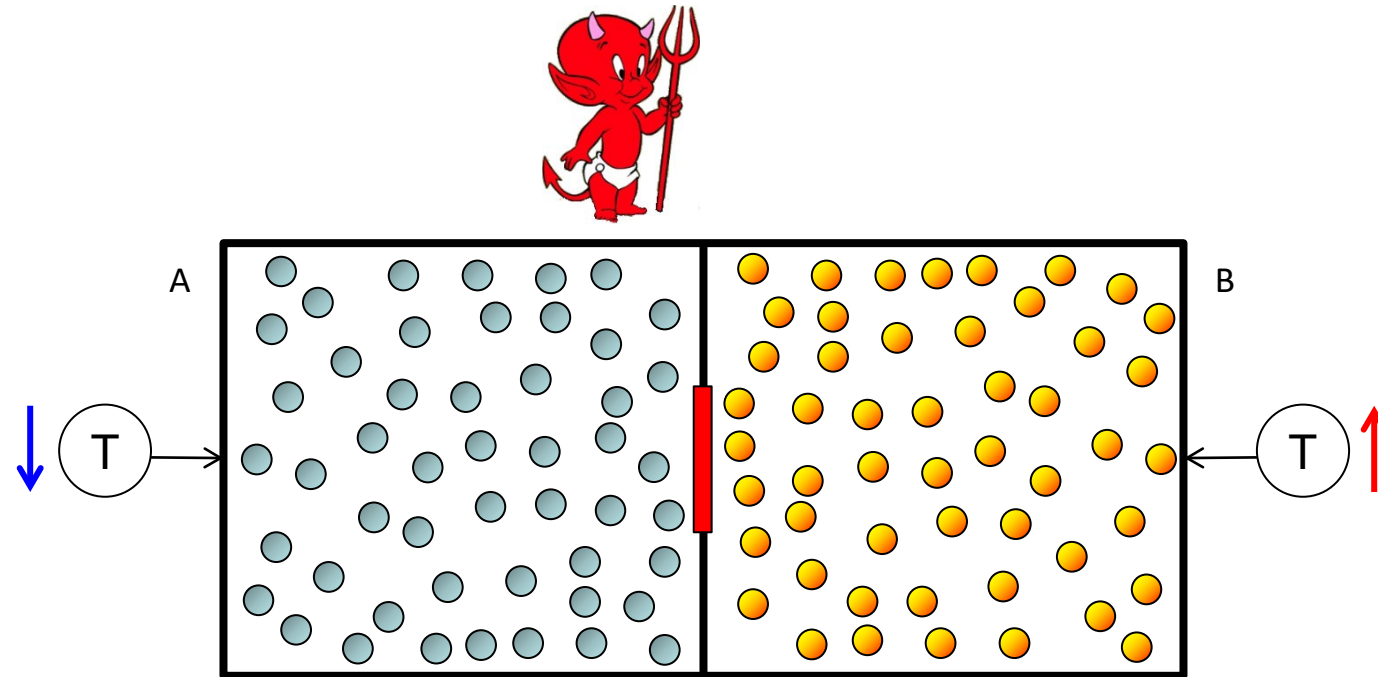




# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental



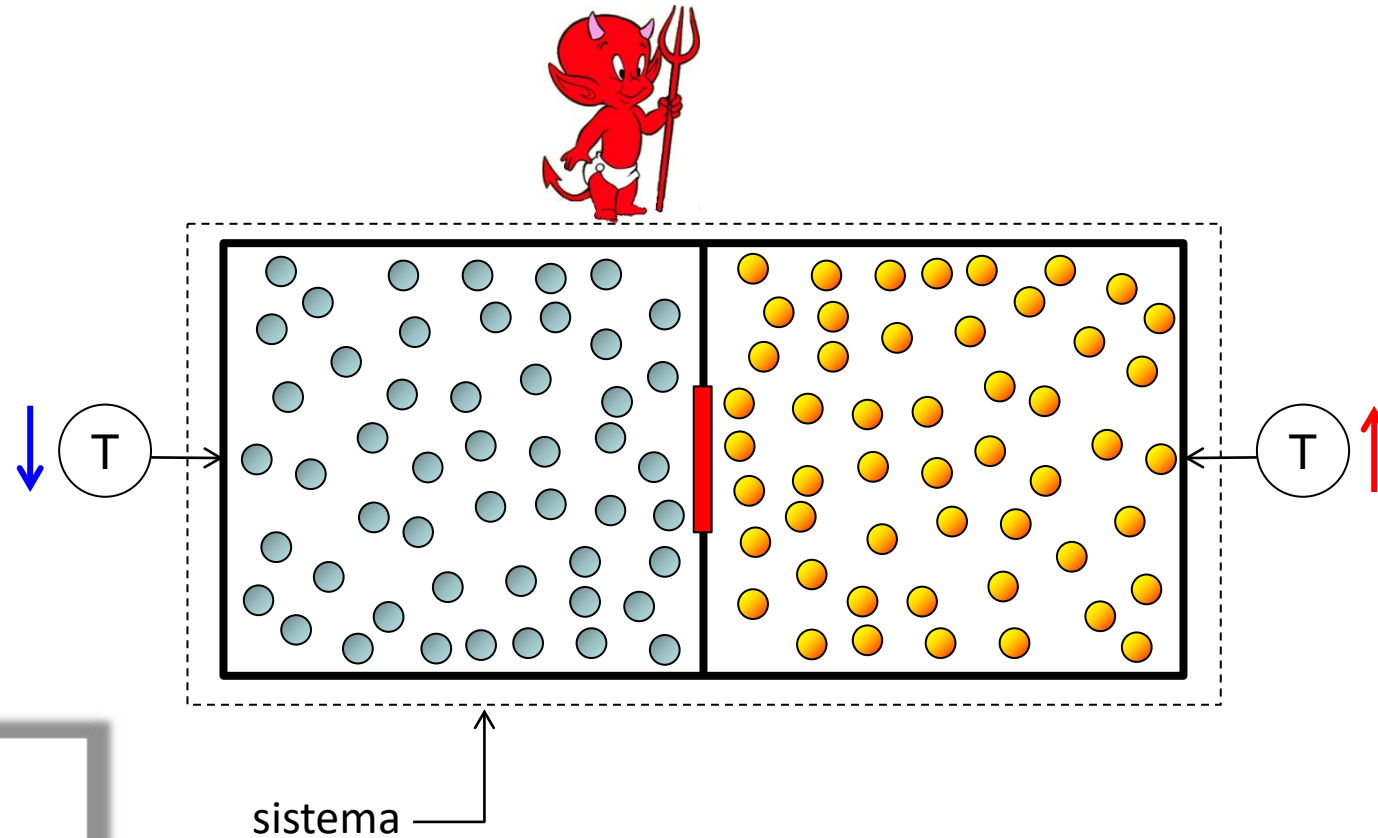
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



“He will thus, **without expenditure of work**, raise the temperature of B and lower that of A, in contradiction to the second law of thermodynamics...”

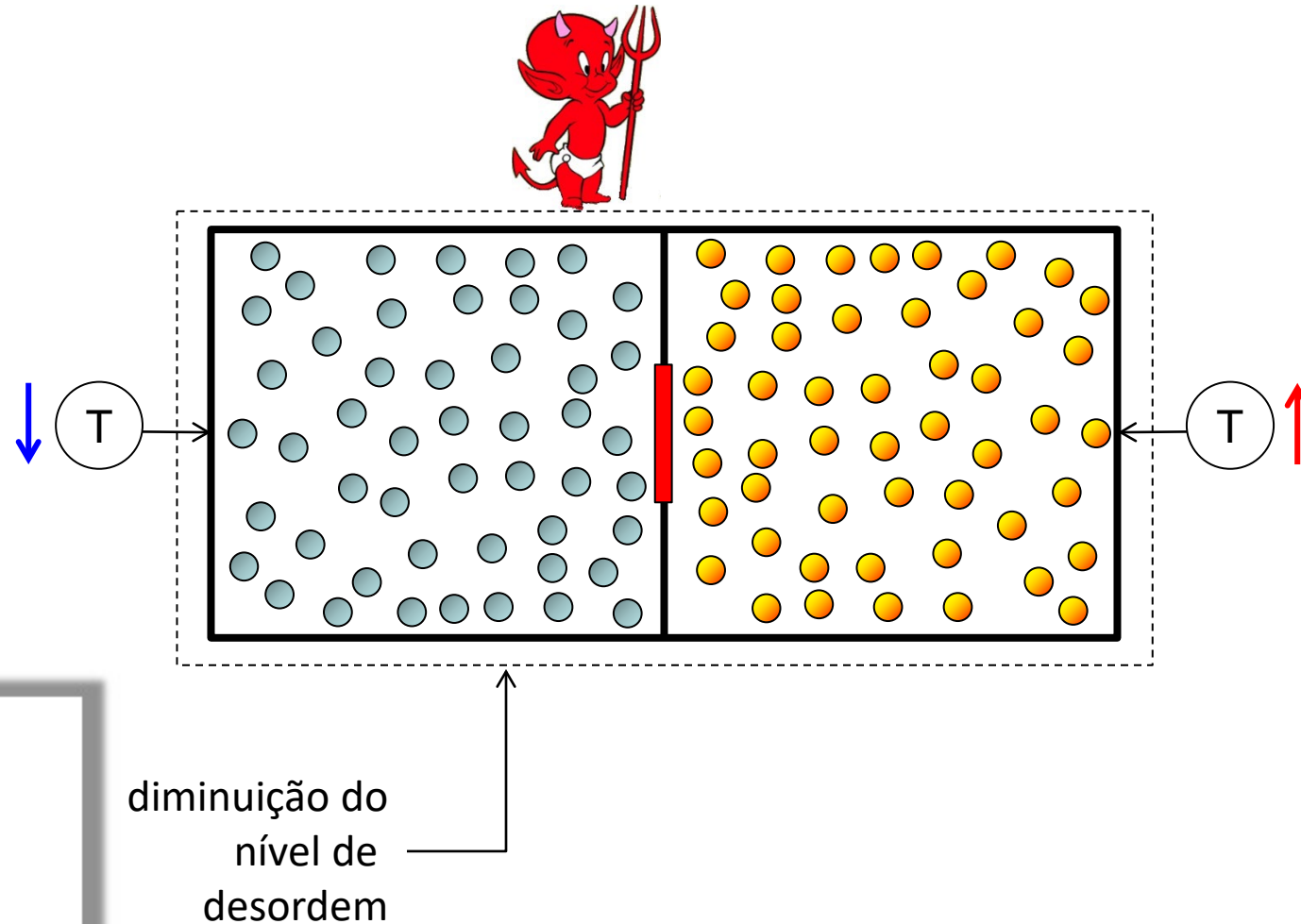
Maxwell

# O demônio de Maxwell: um experimento mental

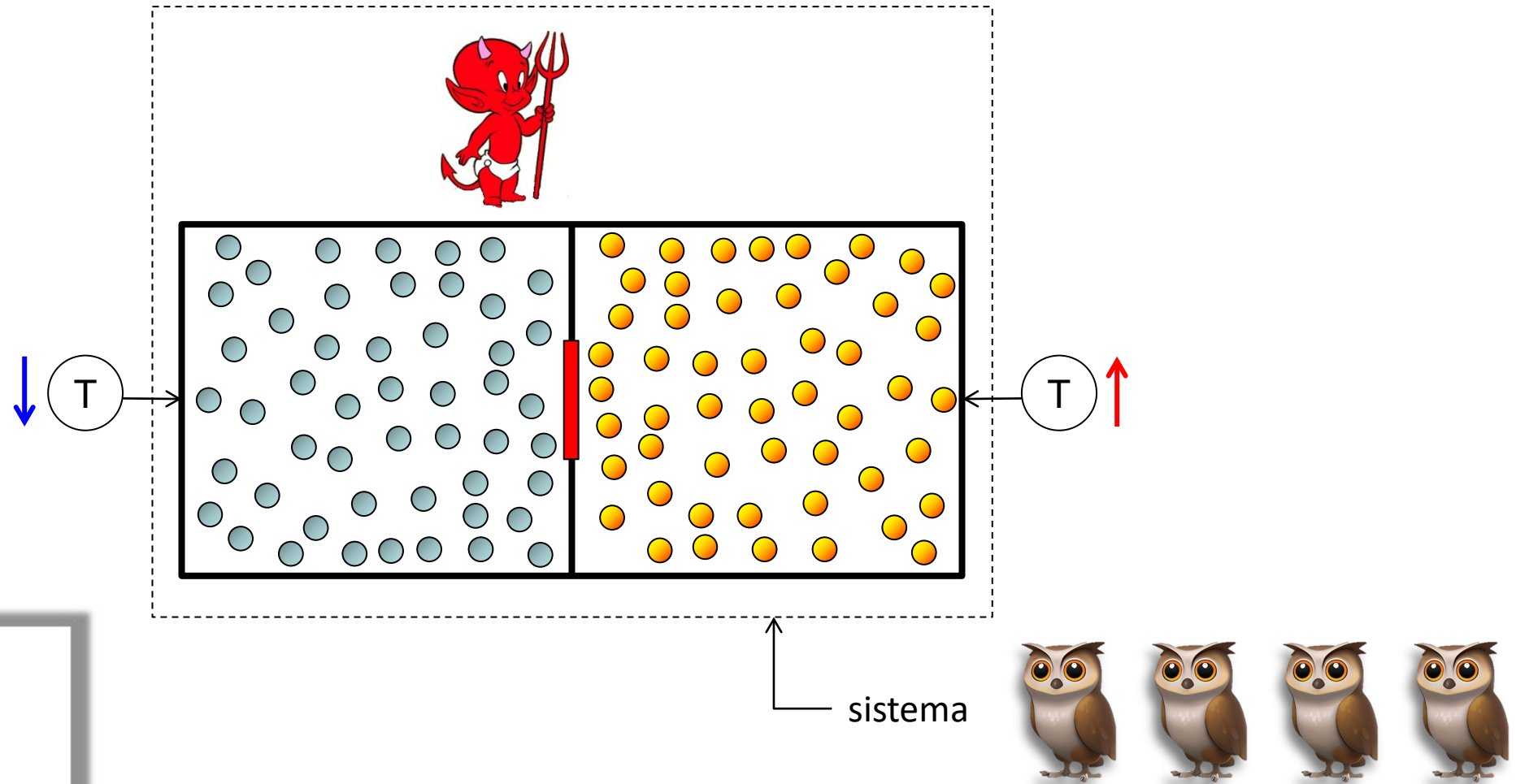




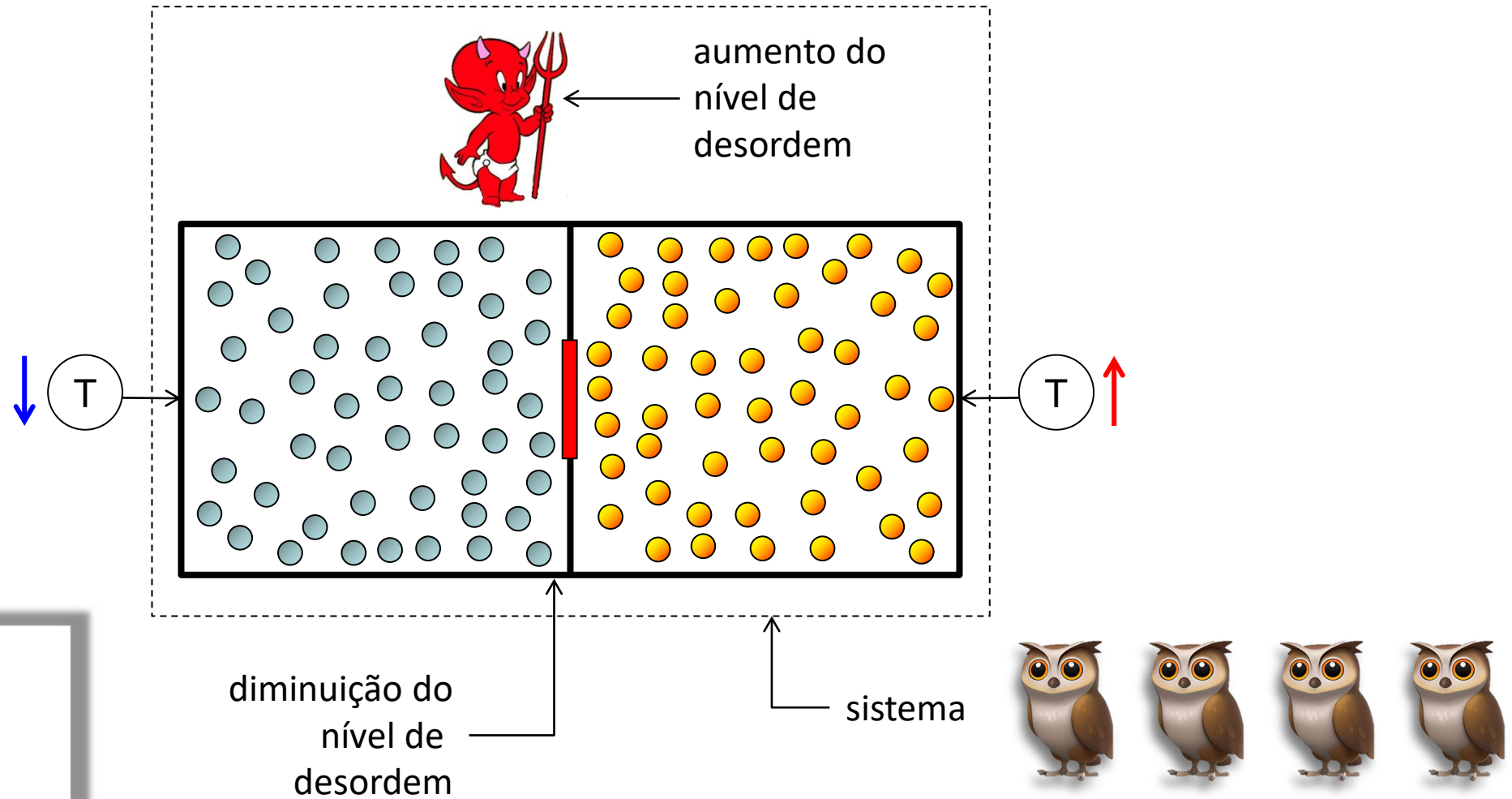
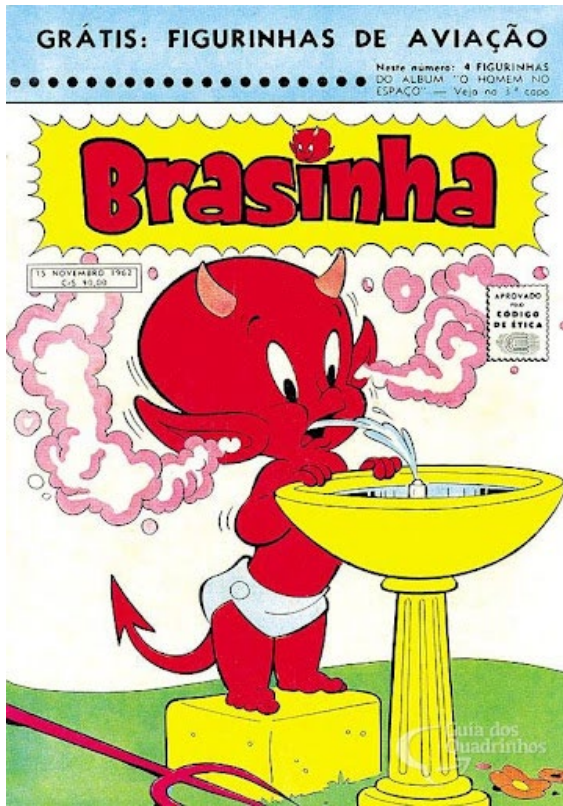
# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental



# O demônio de Maxwell: um experimento mental





Q#3: Por que o experimento de Maxwell dá origem a um falso paradoxo ?

- A) Porque desconsidera os efeitos quânticos e relativísticos resultante das altas velocidades características do movimento browniano...
- B) Porque desconsidera Influência das mudanças climáticas e do aquecimento global...
- C) Porque desconsidera as forças e a natureza dos choques intermoleculares perfeitamente elásticos...
- D) Porque desconsidera a variação do nível de desordem do sistema completo (universo)...
- E) É impossível saber...

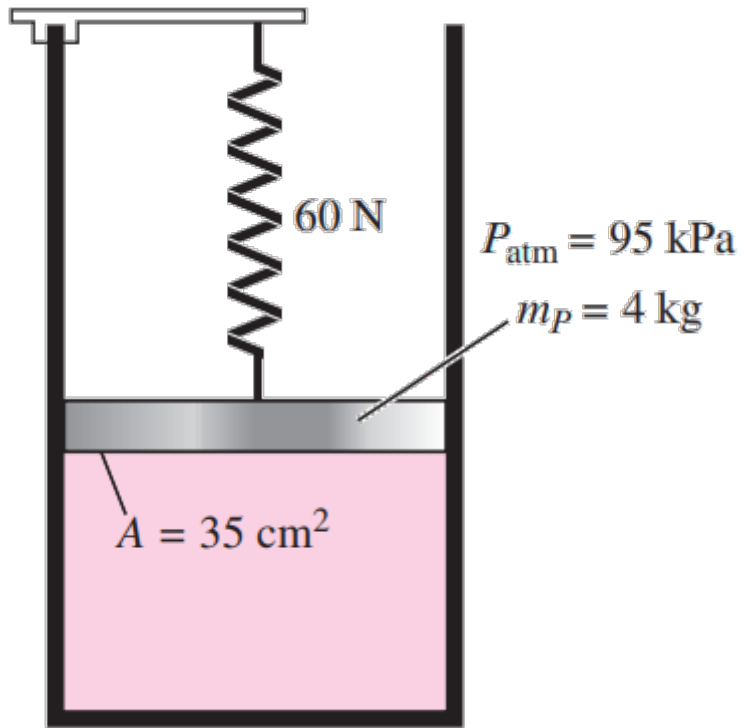


Chat GPT

Obs.: coloque esta pergunta no Chat GPT e solicite uma resposta em uma única frase.

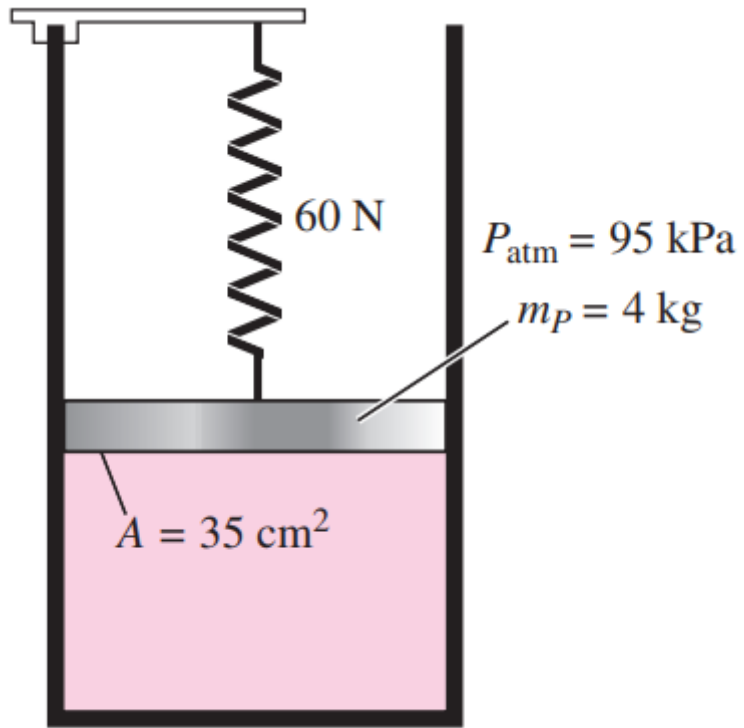
3



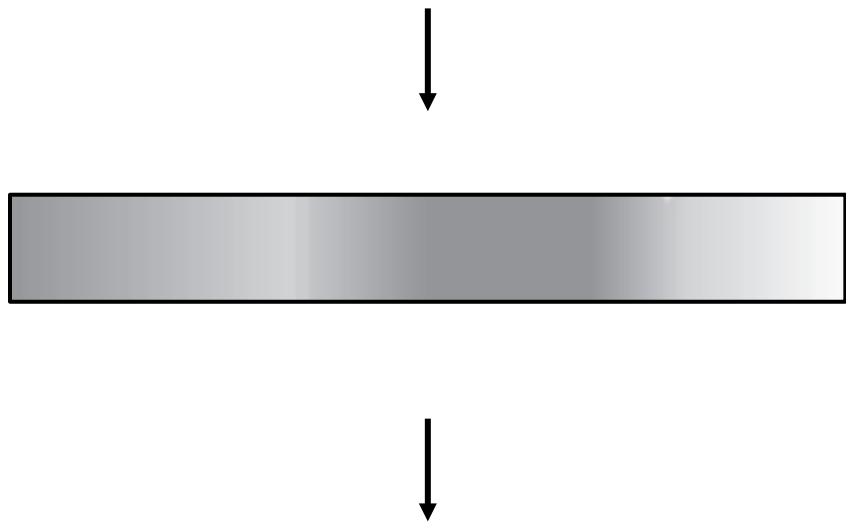


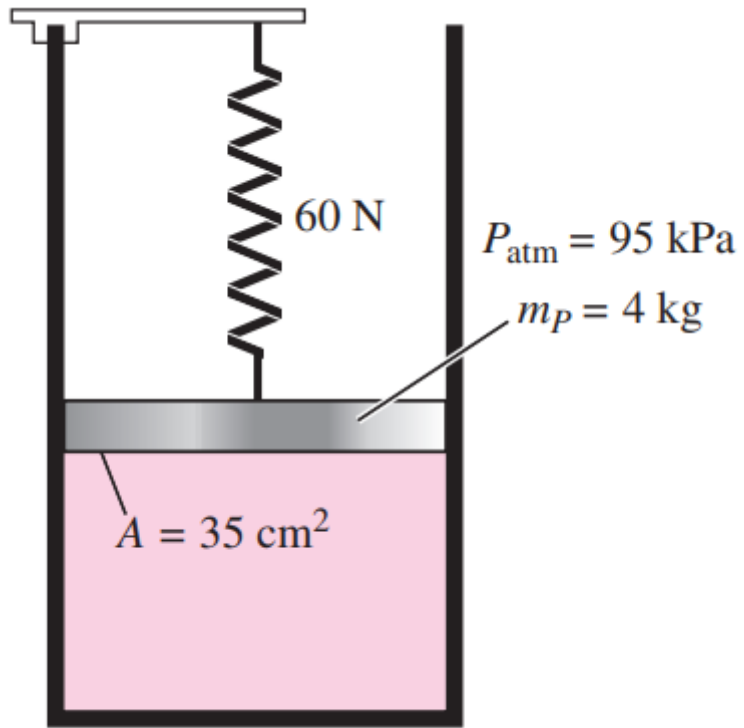
**1-57** A gas is contained in a vertical, frictionless piston–cylinder device. The piston has a mass of 4 kg and a cross-sectional area of  $35 \text{ cm}^2$ . A compressed spring above the piston exerts a force of 60 N on the piston. If the atmospheric pressure is 95 kPa, determine the pressure inside the cylinder. *Answer: 123.4 kPa*



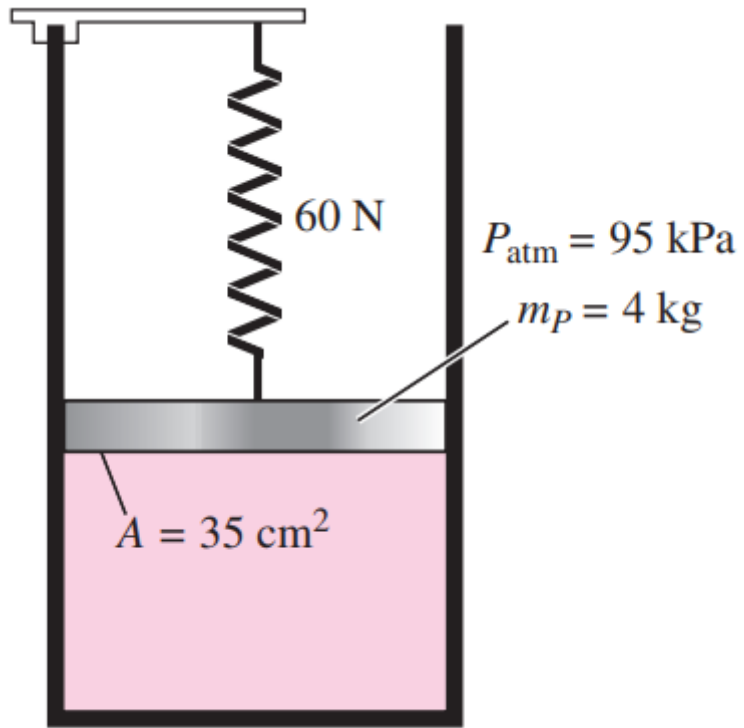


**1-57** A gas is contained in a vertical, frictionless piston-cylinder device. The piston has a mass of 4 kg and a cross-sectional area of  $35 \text{ cm}^2$ . A compressed spring above the piston exerts a force of 60 N on the piston. If the atmospheric pressure is 95 kPa, determine the pressure inside the cylinder. *Answer: 123.4 kPa*



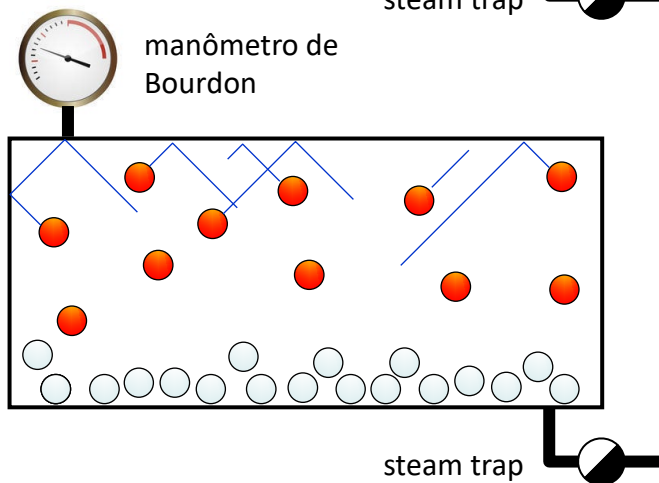
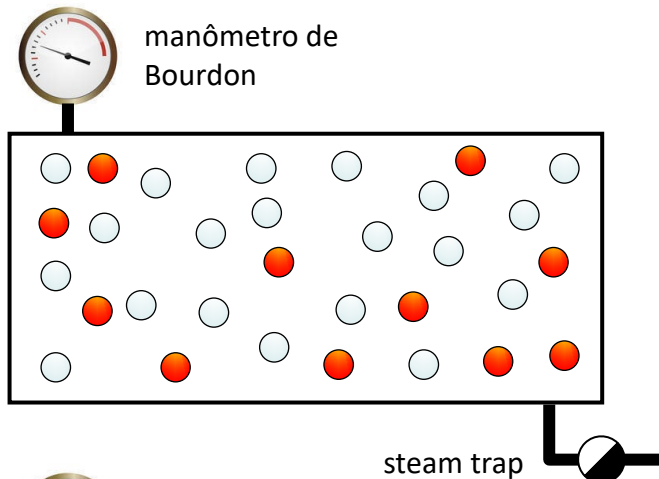


**1-57** A gas is contained in a vertical, frictionless piston–cylinder device. The piston has a mass of 4 kg and a cross-sectional area of 35 cm<sup>2</sup>. A compressed spring above the piston exerts a force of 60 N on the piston. If the atmospheric pressure is 95 kPa, determine the pressure inside the cylinder. *Answer: 123.4 kPa*



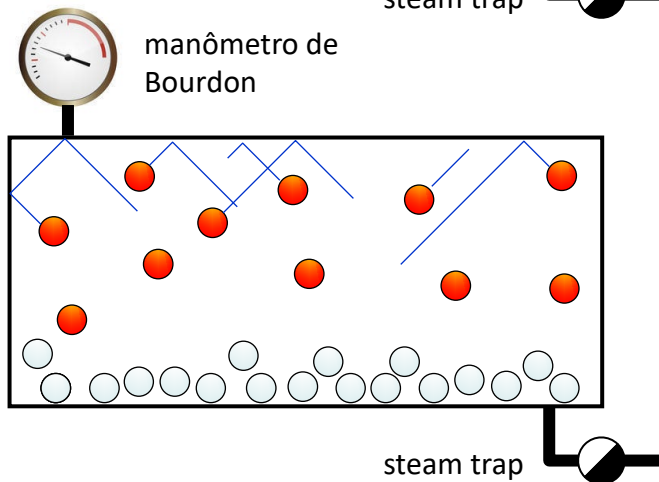
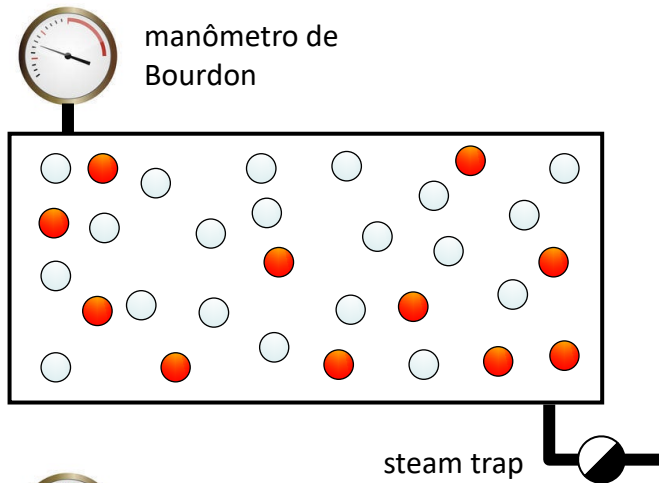
**1-57** A gas is contained in a vertical, frictionless piston–cylinder device. The piston has a mass of 4 kg and a cross-sectional area of 35 cm<sup>2</sup>. A compressed spring above the piston exerts a force of 60 N on the piston. If the atmospheric pressure is 95 kPa, determine the pressure inside the cylinder. *Answer: 123.4 kPa*



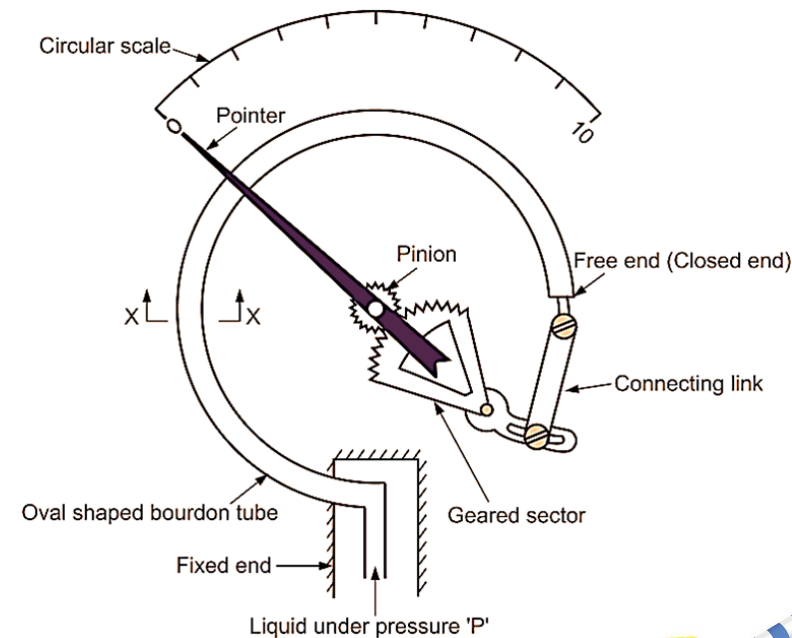
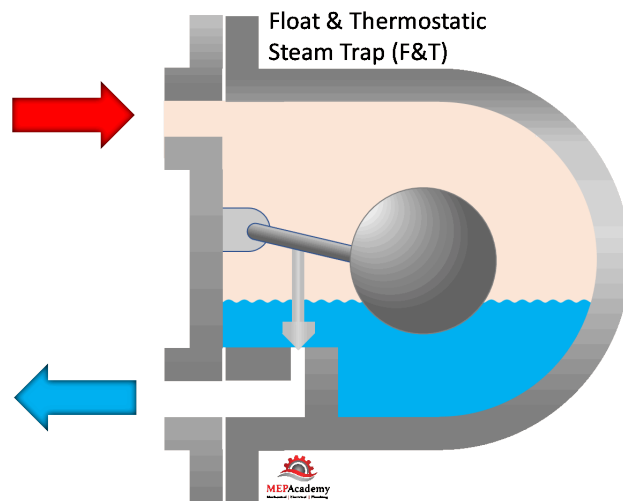


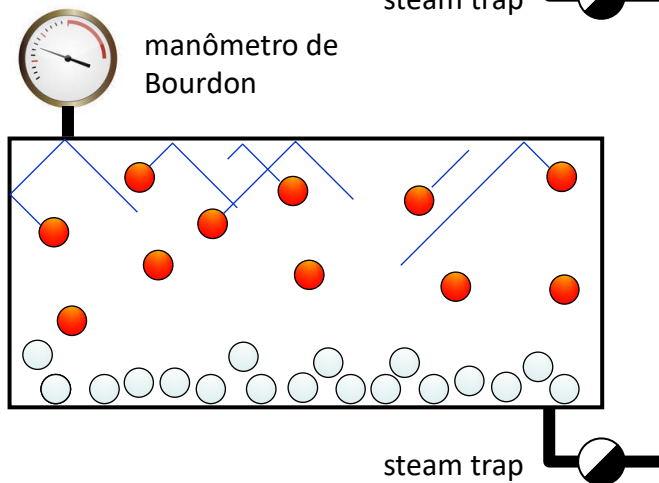
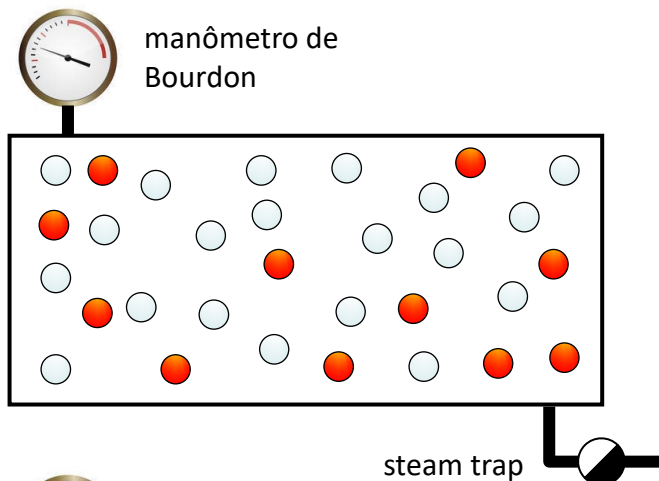
OBS

Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).

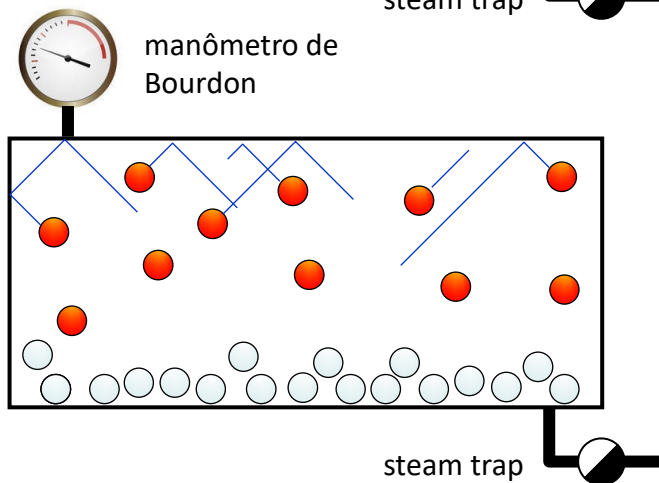
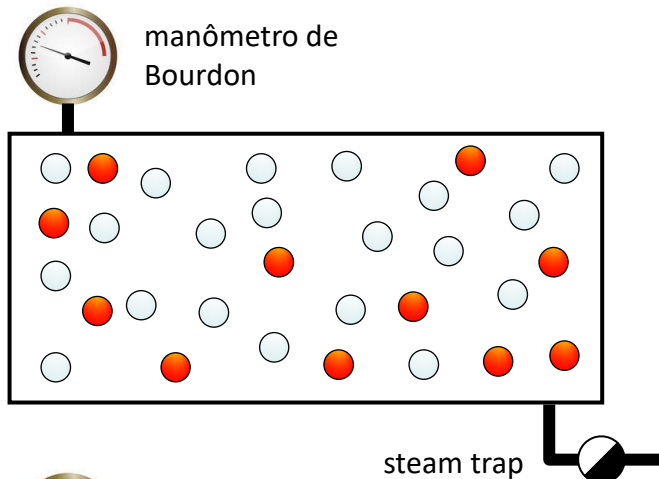


Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).



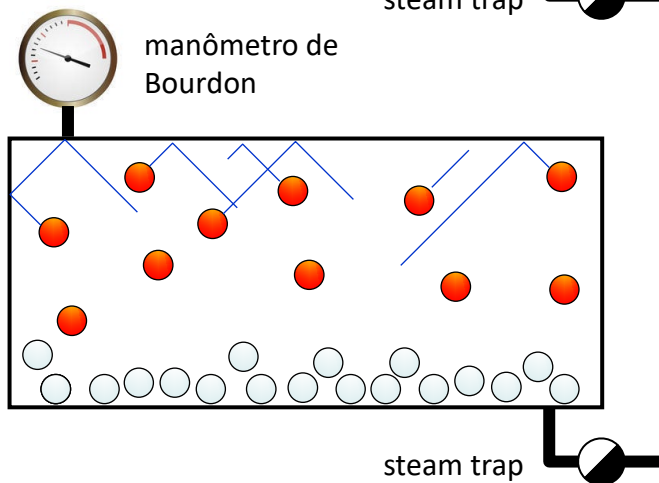
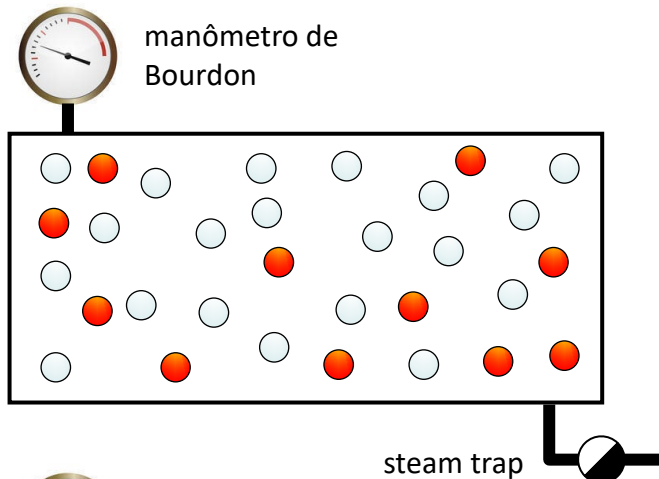


Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).

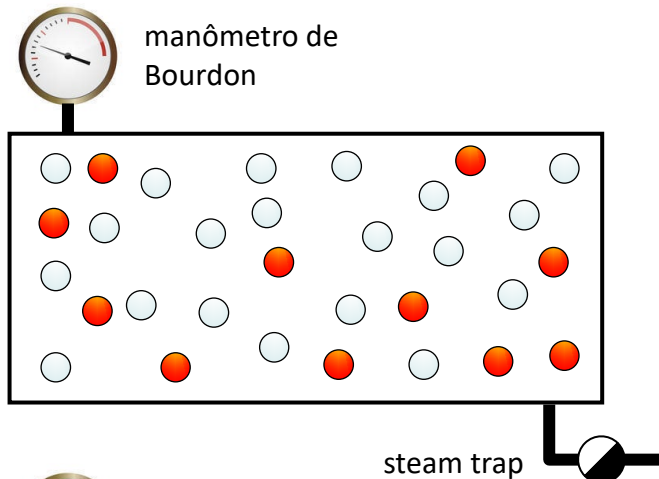


Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).

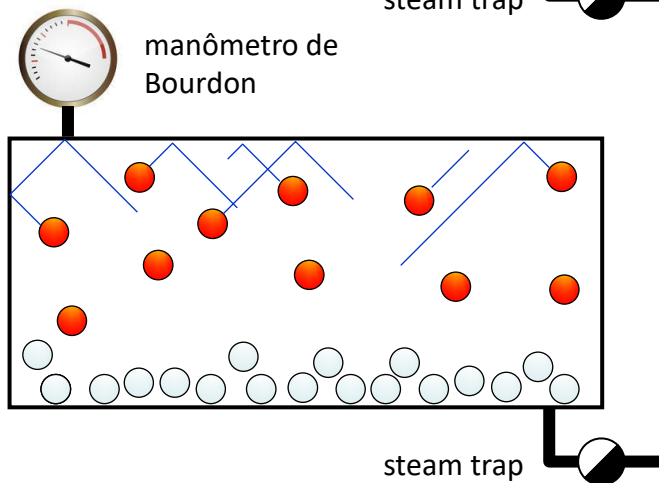


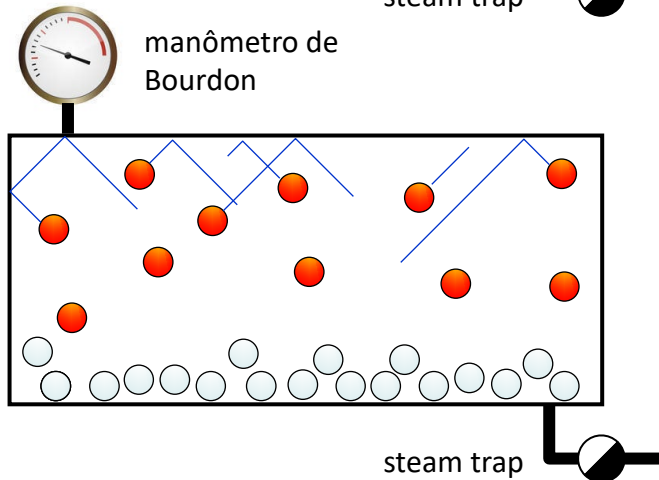
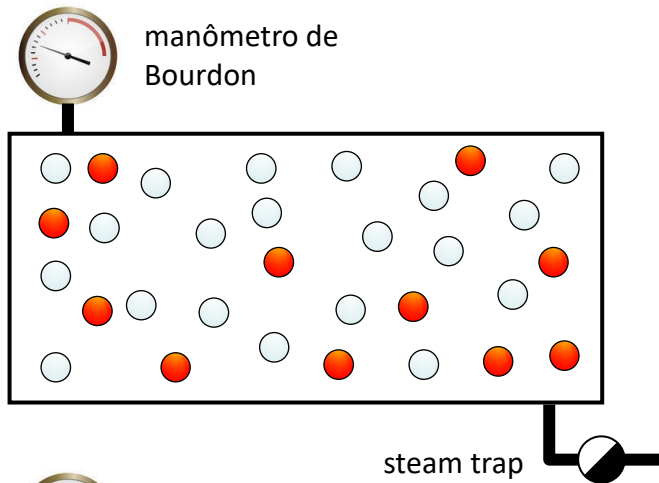


Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).



Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).





Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).

$$P_{\text{H}_2\text{O}} := 3 \cdot 10^5 \quad P_{\text{CO}_2} := P - P_{\text{H}_2\text{O}} \quad m_{\text{H}_2\text{O}} := 0.9 \quad m_{\text{CO}_2} := m - m_{\text{H}_2\text{O}}$$

Given

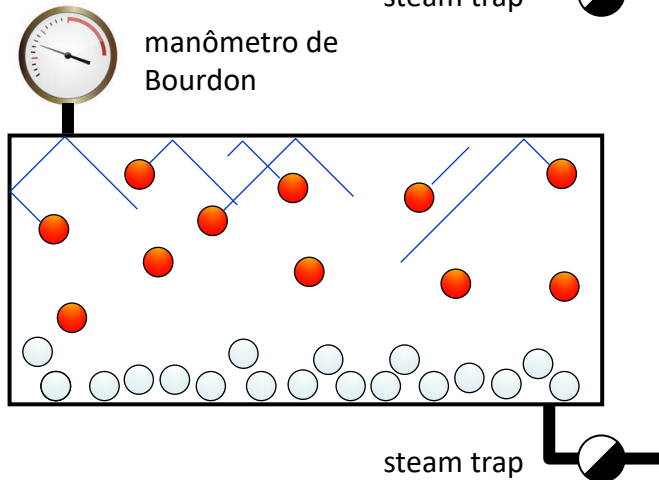
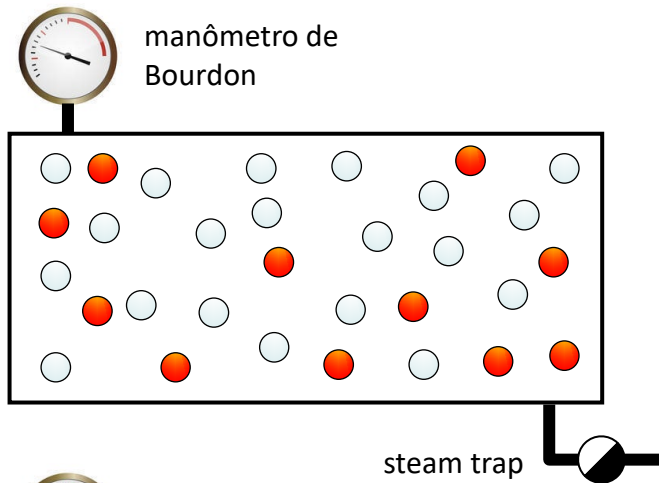
$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T$$

$$P_{\text{CO}_2} \cdot V = m_{\text{CO}_2} \cdot R_{\text{CO}_2} \cdot T$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2} = P$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{CO}_2} = m$$

$$\text{Find}(P_{\text{H}_2\text{O}}, P_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{CO}_2}) = \begin{pmatrix} 4.149 \times 10^5 \\ 7.997 \times 10^4 \\ 0.85 \\ 0.4 \end{pmatrix}$$



Um vaso de pressão com volume de 0,4m<sup>3</sup> contém 1,25kg de uma mistura formada por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O mantida a uma pressão barométrica total de 4,949bar e a uma temperatura de 150°C. Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{amb} = 100\text{kPa}$ ).

### LEI DOS GASES PERFEITOS

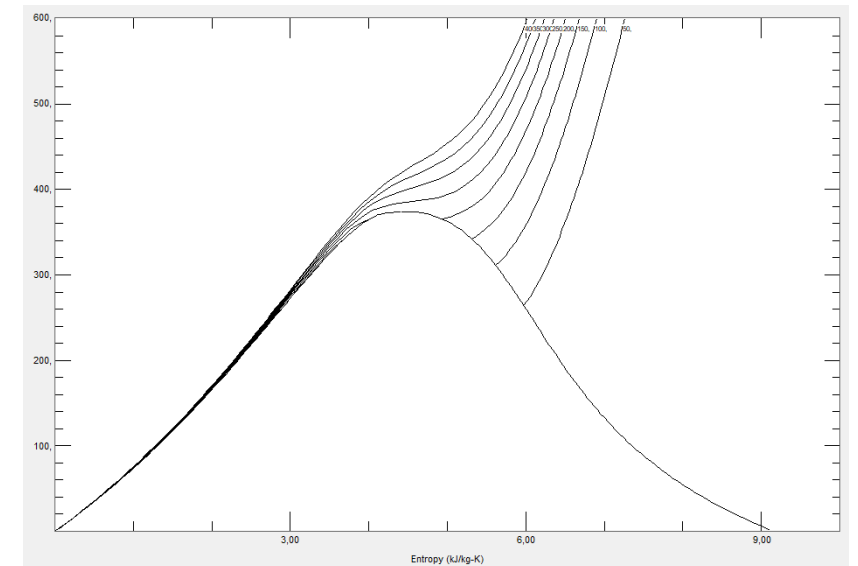
$$PV = nRT$$

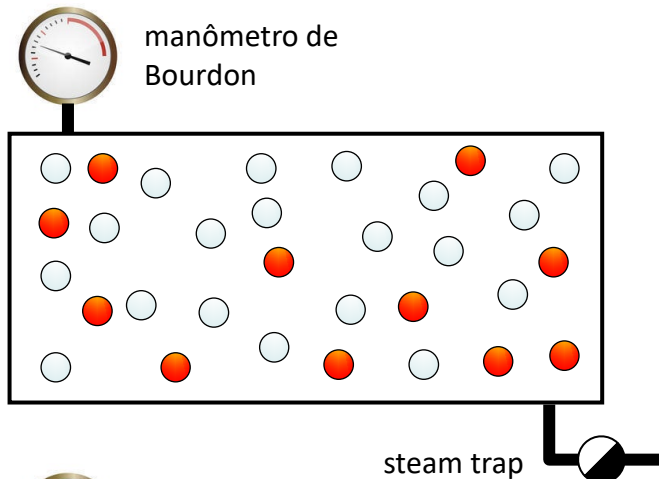
### EQUAÇÃO DE VAN DER WAALS

$$P + \frac{a}{V^2} (V - b) = nRT$$

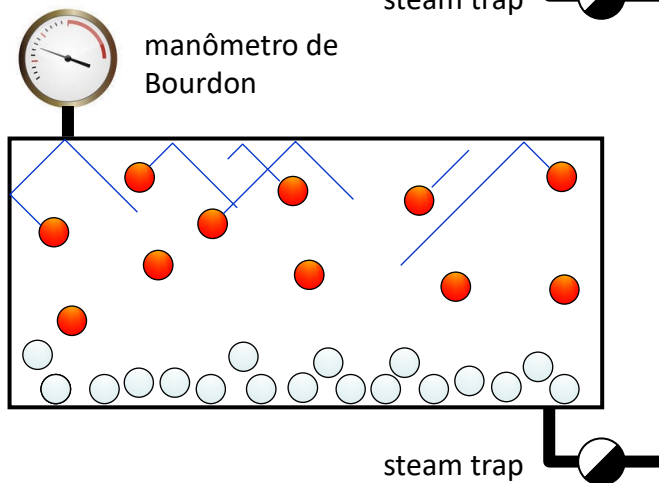
### EQUAÇÃO DE ESTADO VIRIAL

$$\frac{PV}{nRT} = A + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots$$

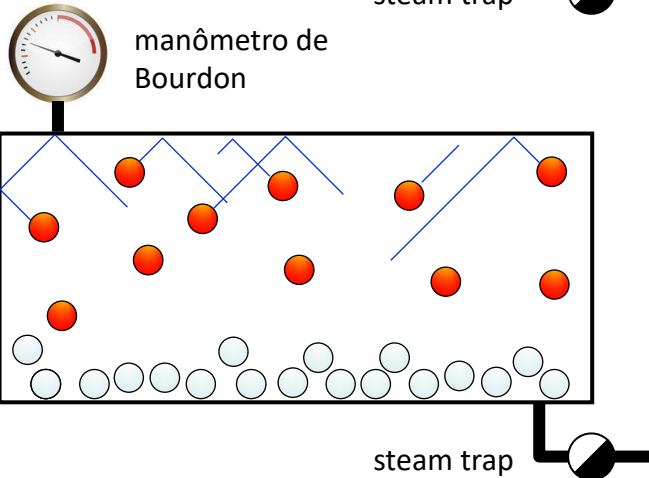
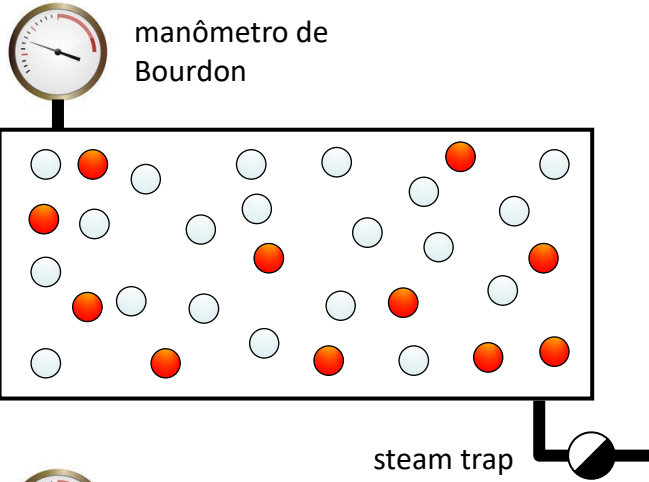




Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).







Um vaso de pressão com volume de  $0,4\text{m}^3$  contém  $1,25\text{kg}$  de uma mistura formada por  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  mantida a uma pressão barométrica total de  $4,949\text{bar}$  e a uma temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Dessa condição o vaso é arrefecido (resfriado) para condensar e remover o vapor d'água da mistura através de um purgador de boia. Nessas condições, calcule as massas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e a pressão final indicada no manômetro ( $P_{\text{amb}} = 100\text{kPa}$ ).



# Curso de Termodinâmica

# introdução



aula 01/20