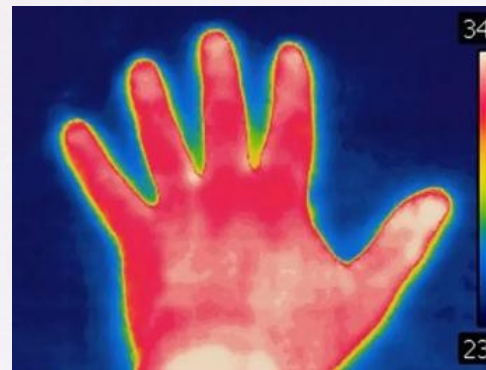
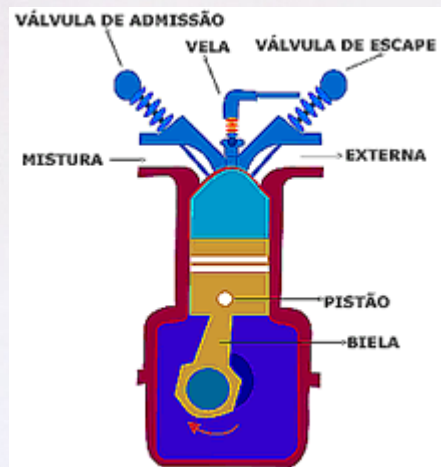
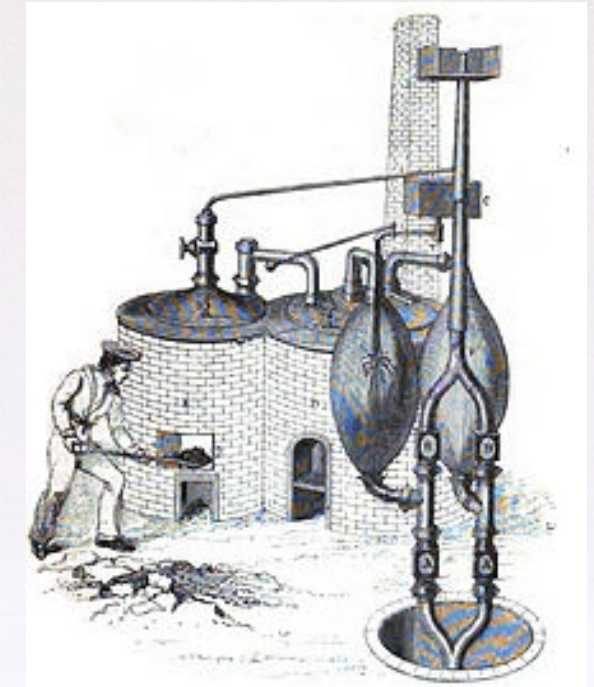
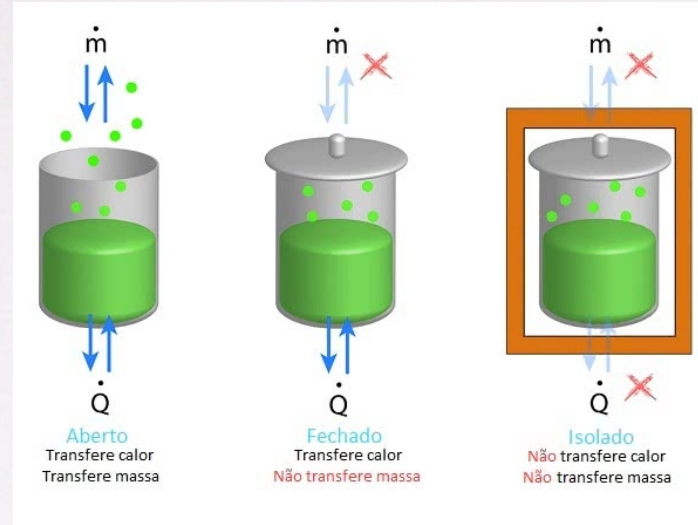
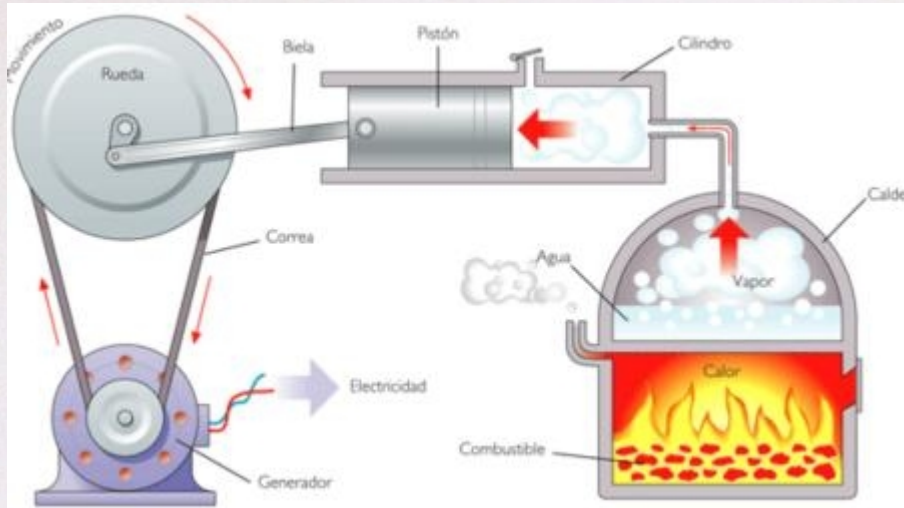


# TERMODINÂMICA



Prof. Rafael Cavagnoli

DF/UFPel



# TERMODINÂMICA

Vamos estudar:

- Temperatura e Calor
- Mecanismos do Calor  
(Mecanismos de transferência da energia térmica)
- Transições de fases
- Gás ideal e Teoria Cinética
- Leis da Termodinâmica

# TERMODINÂMICA

A Termodinâmica é uma teoria clássica para sistemas macroscópicos em equilíbrio.

→ abordagem macroscópica : Termodinâmica (Clássica)

→ abordagem microscópica : Mecânica Estatística (ou Termodinâmica Estatística) <   
Clássica  
Quântica



# TERMODINÂMICA

**Termo** (lembra temperatura; calor) + **dinâmica** (trata do movimento e suas causas)  
[originalmente: **therme** (calor) + **dynamis** (poder) = poder do calor, ou “poder do fogo”]



# TERMODINÂMICA

**Termo** (lembra temperatura; calor) + **dinâmica** (trata do movimento e suas causas)  
[originalmente: **therme** (calor) + **dynamis** (poder) = poder do calor, ou “poder do fogo”]

Deve-se ressaltar que a Termodinâmica não trata de movimento! Trata de interações onde ocorrem trocas de energia entre sistemas macroscópicos – interações que são mediadas por calor e trabalho - e que podem resultar em mudanças de fases.

# TERMODINÂMICA

**Termo** (lembra temperatura; calor) + **dinâmica** (trata do movimento e suas causas)

[originalmente: **therme** (calor) + **dynamis** (poder) = poder do calor, ou “poder do fogo”]

Deve-se ressaltar que a Termodinâmica não trata de movimento! Trata de interações onde ocorrem trocas de energia entre sistemas macroscópicos – interações que são mediadas por calor e trabalho - e que podem resultar em mudanças de fases.

Na Dinâmica (dentro da Mecânica) lidamos com forças, acelerações, velocidades – dentre outras grandezas – assim como calculamos o tempo envolvido nos processos.

Na Termodinâmica não calculamos os tempos envolvidos nas interações entre sistemas e suas transformações.



# TERMODINÂMICA

**Termo** (lembra temperatura; calor) + **dinâmica** (trata do movimento e suas causas)  
[originalmente: **therme** (calor) + **dynamis** (poder) = poder do calor, ou “poder do fogo”]

Deve-se ressaltar que a Termodinâmica não trata de movimento! Trata de interações onde ocorrem trocas de energia entre sistemas macroscópicos – interações que são mediadas por calor e trabalho - e que podem resultar em mudanças de fases.

Na Dinâmica (dentro da Mecânica) lidamos com forças, acelerações, velocidades – dentre outras grandezas – assim como calculamos o tempo envolvido nos processos.

Na Termodinâmica não calculamos os tempos envolvidos nas interações entre sistemas e suas transformações.

▶ ▶ ▶ Em certo sentido, podemos dizer que existe pouca “dinâmica” na Termodinâmica!

A Termodinâmica é construída a partir da observação de fenômenos, através de experimentos. Por isso podemos dizer que é uma disciplina fenomenológica.

# Definições

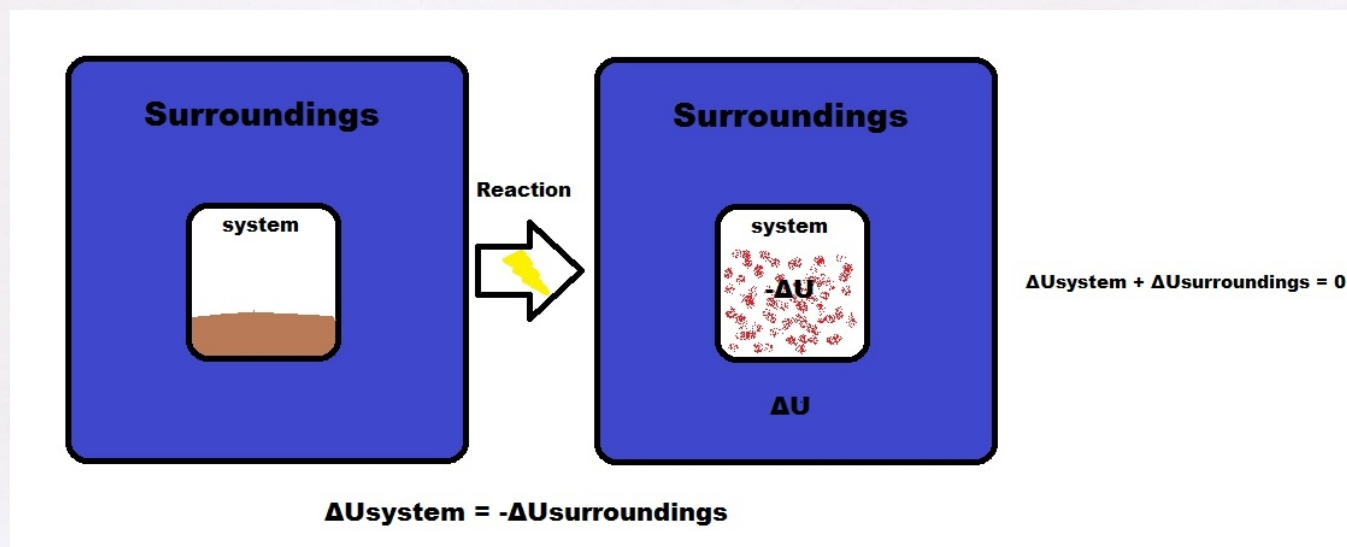


# Definições

**Sistema:** objeto principal da análise, normalmente é uma porção de matéria, mesmo que imaginária, tomada de forma separada e cujas propriedades nos interessam. Um sistema também pode ser dividido em subsistemas.

**Vizinhança:** todo o restante ao redor do “sistema”, também chamado de meio externo, exterior ou ambiente.

**Universo:** sistema + vizinhança.



[Figura: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Thermodynamics/Energies\\_and\\_Potentials/Internal\\_Energy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Internal_Energy)]

# Definições

## **Temperatura:**

Temos uma ideia intuitiva sobre “temperatura” como algo associado à nossa sensação de “quente” e “frio”. Nossos sentidos podem ser enganados, e assim, utilizamos propriedades de materiais que variam de acordo com nossa ideia de quente e frio em algumas situações, tomadas como referência, como o ponto de congelamento e ebulição da água (em uma dada pressão atmosférica).

Uma propriedade usada é a dilatação térmica de substâncias. Assim, construímos um termômetro, com uma certa escala em uma dada unidade de medida.

Voltaremos mais adiante ao assunto e veremos também como medir a temperatura



# Definições

**Energia:** é uma propriedade associada ao estado de um sistema assim como está envolvida nas transformações de estado deste ou de outro sistema através de interações.

(A palavra 'estado' é usada de forma generalizada, pode ser estado de movimento, estado físico da matéria; a transformação de estado também pode ser um decaimento, e assim por diante).

# Definições

**Energia:** é uma propriedade associada ao estado de um sistema assim como está envolvida nas transformações de estado deste ou de outro sistema através de interações.

(A palavra 'estado' é usada de forma generalizada, pode ser estado de movimento, estado físico da matéria; a transformação de estado também pode ser um decaimento, e assim por diante).

**Trabalho ( $W$ ):** é uma medida da energia transferida por um sistema. A transferência de energia é um processo, ao que podemos dizer que trabalho é uma espécie de **fluxo de energia**. Quando calculamos o trabalho como a variação da energia, não se pode confundir trabalho com energia. O trabalho quantifica a variação que ocorreu na energia por meio de algum processo, energia que entrou ou saiu do sistema, por isso a ideia de "fluxo de energia".



# Definições

**Energia:** é uma propriedade associada ao estado de um sistema assim como está envolvida nas transformações de estado deste ou de outro sistema através de interações.

(A palavra 'estado' é usada de forma generalizada, pode ser estado de movimento, estado físico da matéria; a transformação de estado também pode ser um decaimento, e assim por diante).

**Trabalho ( $W$ ):** é uma medida da energia transferida por um sistema. A transferência de energia é um processo, ao que podemos dizer que trabalho é uma espécie de **fluxo de energia**. Quando calculamos o trabalho como a variação da energia, não se pode confundir trabalho com energia. O trabalho quantifica a variação que ocorreu na energia por meio de algum processo, energia que entrou ou saiu do sistema, por isso a ideia de “fluxo de energia”.

**Calor ( $Q$ ):** é um tipo específico de fluxo de energia que ocorre espontaneamente entre sistemas com diferença de temperatura – do sistema com maior temperatura para o de menor. Podemos dizer que é um tipo de fluxo de energia que excita os modos “ocultos” de movimento de um sistema, ou seja, aquilo que não se consegue “ver” do ponto de vista mecânico e eletromagnético. Por isso nos referimos como “energia térmica em trânsito”, ou seja, segue a ideia de “fluxo de energia”. (Deste modo não tem sentido usar a expressão “fluxo de calor”).



# Definições

**Energia:** é uma propriedade associada ao estado de um sistema assim como está envolvida nas transformações de estado deste ou de outro sistema através de interações.

(A palavra 'estado' é usada de forma generalizada, pode ser estado de movimento, estado físico da matéria; a transformação de estado também pode ser um decaimento, e assim por diante).

**Trabalho ( $W$ ):** é uma medida da energia transferida por um sistema. A transferência de energia é um processo, ao que podemos dizer que trabalho é uma espécie de **fluxo de energia**. Quando calculamos o trabalho como a variação da energia, não se pode confundir trabalho com energia. O trabalho quantifica a variação que ocorreu na energia por meio de algum processo, energia que entrou ou saiu do sistema, por isso a ideia de “fluxo de energia”.

**Calor ( $Q$ ):** é um tipo específico de fluxo de energia que ocorre espontaneamente entre sistemas com diferença de temperatura – do sistema com maior temperatura para o de menor. Podemos dizer que é um tipo de fluxo de energia que excita os modos “ocultos” de movimento de um sistema, ou seja, aquilo que não se consegue “ver” do ponto de vista mecânico e eletromagnético. Por isso nos referimos como “energia térmica em trânsito”, ou seja, segue a ideia de “fluxo de energia”. (Deste modo não tem sentido usar a expressão “fluxo de calor”).

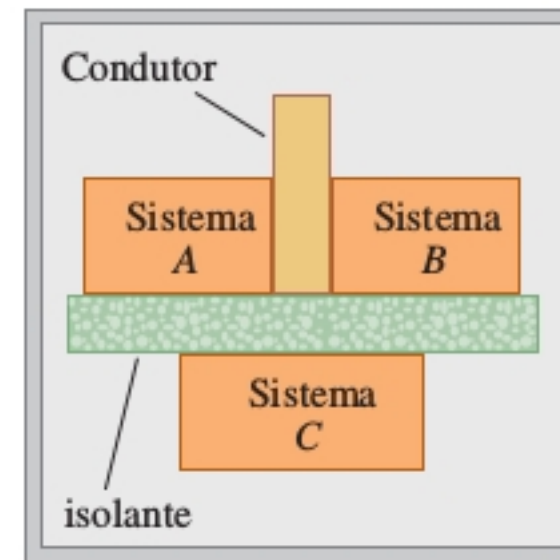
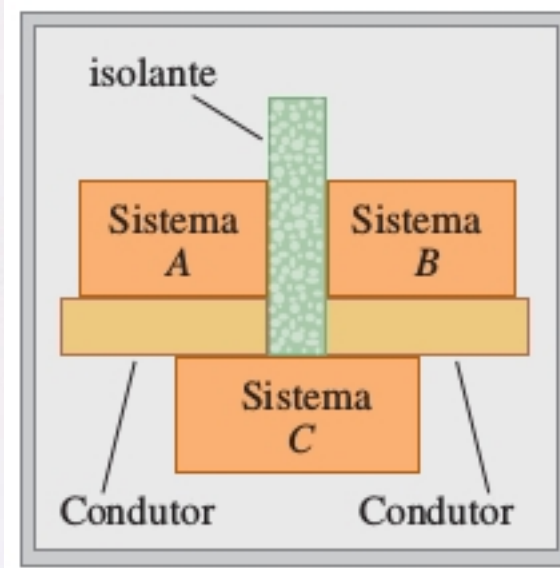
[Fluxo de energia → tudo o que não for trabalho é calor...]

**É importante ressaltar que a energia é conservada, o calor e o trabalho não.**



# Lei Zero (equilíbrio térmico)

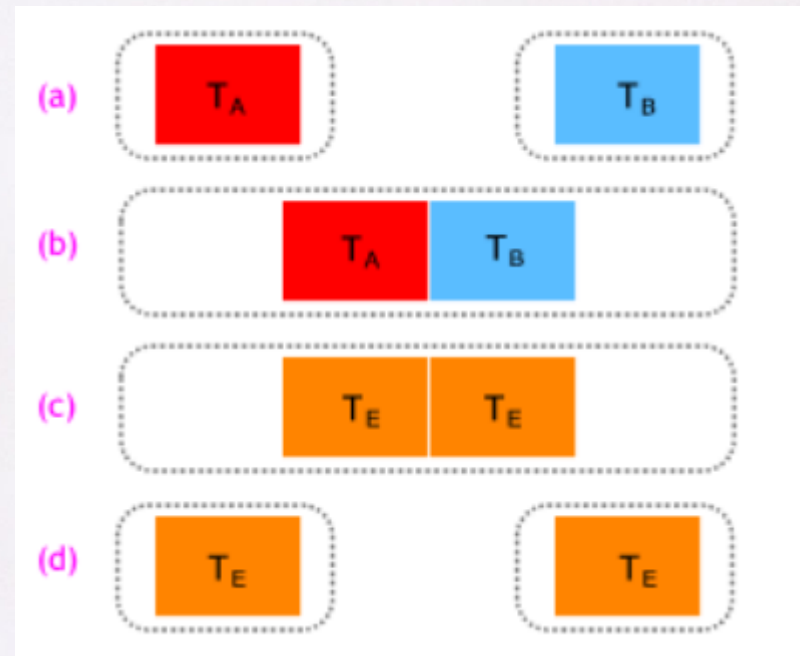
Se um objeto C está em **equilíbrio térmico** com A e B separadamente, logo A e B estão em **equilíbrio térmico** entre si.



# Lei Zero (equilíbrio térmico)

Esta observação nos permite utilizar propriedades de objetos para indicar temperaturas, ou seja, nos permite usar objetos como termômetros, pois temos o seguinte:

**Dois objetos em equilíbrio térmico entre si estão na mesma temperatura.**





# Lei Zero (equilíbrio térmico)

Esta observação nos permite utilizar propriedades de objetos para indicar temperaturas, ou seja, nos permite usar objetos como termômetros, pois temos o seguinte:

**Dois objetos em equilíbrio térmico entre si estão na mesma temperatura.**

“Para mostrar que este fato não decorre de nenhuma necessidade lógica, basta notar que um eletrodo de cobre em equilíbrio elétrico com uma solução diluída de ácido sulfúrico e um eletrodo de zinco em equilíbrio elétrico com a mesma solução não estão em equilíbrio elétrico entre si. Se os colocarmos em contato elétrico através de um fio de cobre, passará uma corrente elétrica de um eletrodo para o outro (pilha voltaica)”

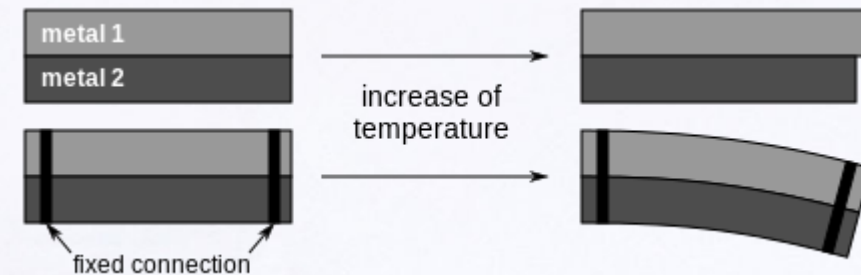
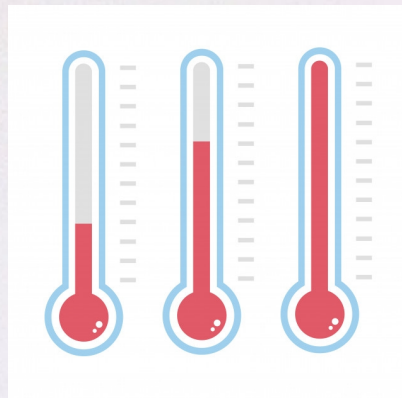
(NUSSENZVEIG, Herch. Moysés, Curso de Física Básica, vol 2, 4a edição rev., São Paulo, Edgard Blücher, 2002, pág. 158)

# Escalas de Temperatura

Podemos utilizar qualquer propriedade que varie com a temperatura para estabelecer uma escala de temperatura.

→ Precisamos estabelecer algum critério para efetuar a calibração de algum instrumento.

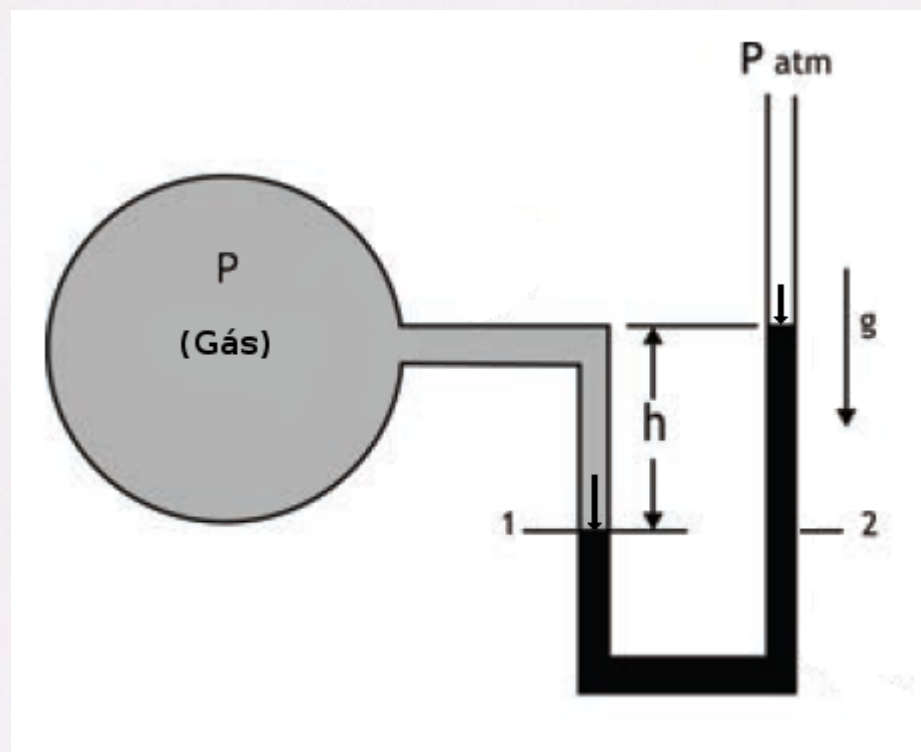
- corpo humano
- fusão/ebulição
- Ponto triplo





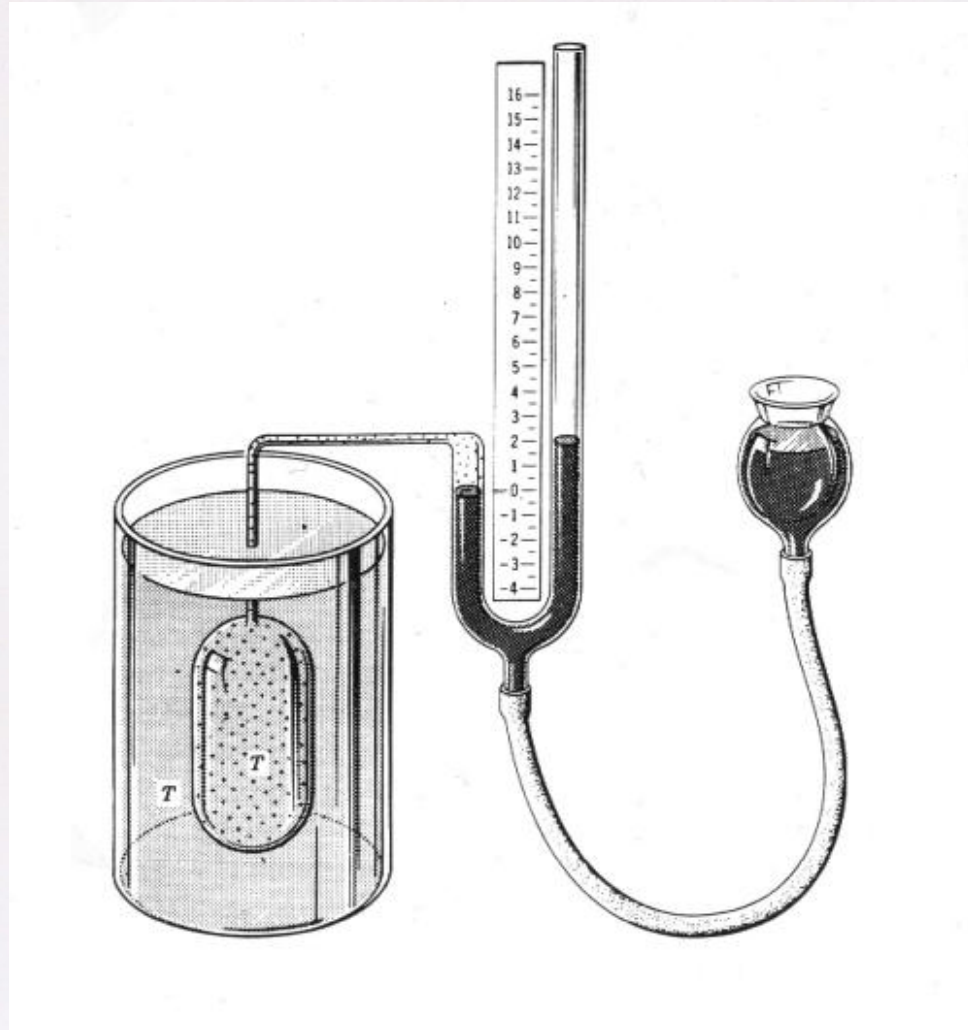
# Escalas de Temperatura

O manômetro em U com tubo aberto pode ser um termômetro a gás...



[Figura adaptada de: TARDIOLI, P. W. Termodinâmica para Engenharia. São Carlos: UAB-UFSCar, 2013]

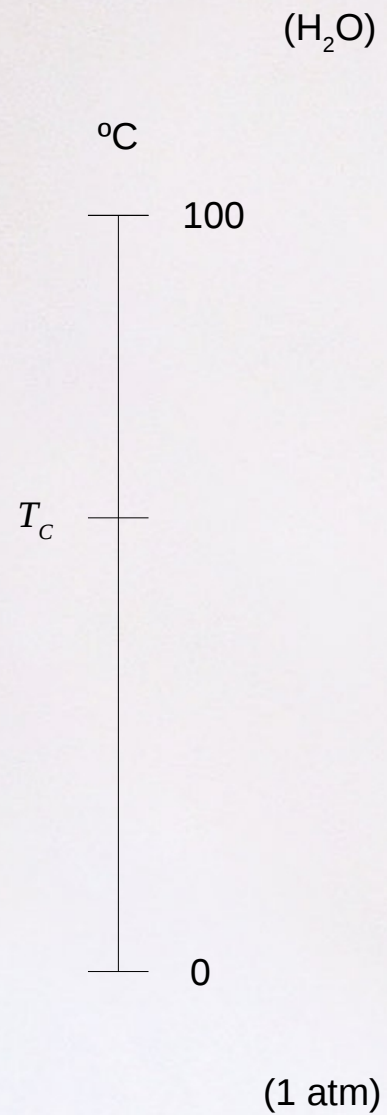
# Escalas de Temperatura



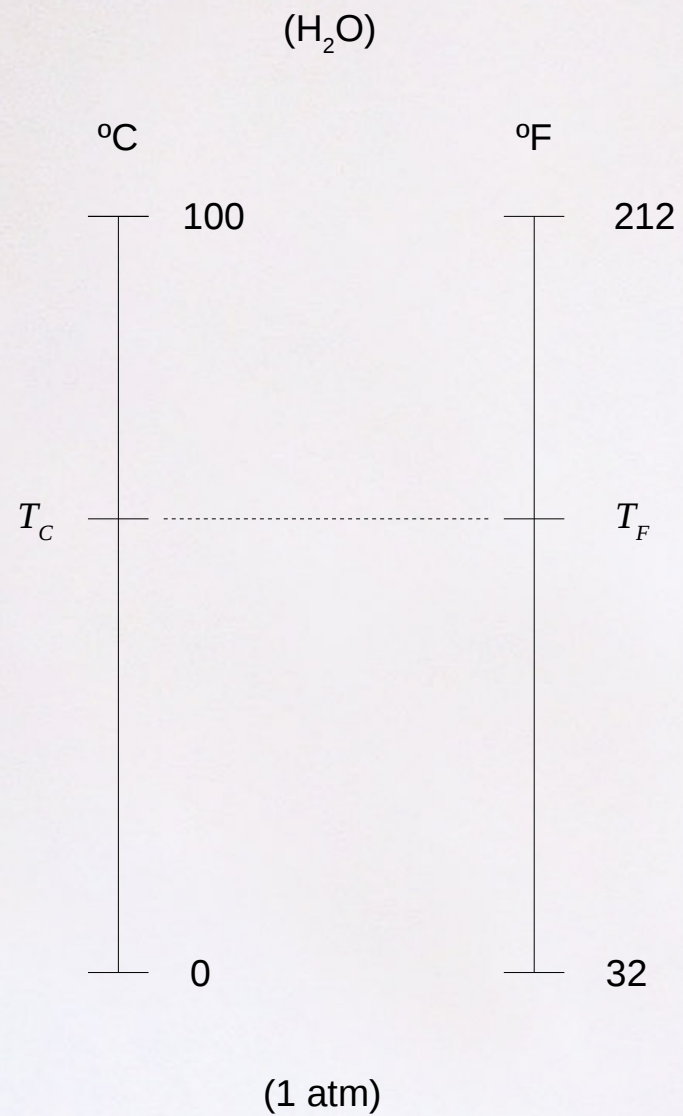
[Figura: <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispense99/formentini117738/formentini117738.htm>]



# Escalas de Temperatura



# Escalas de Temperatura





# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)

°C

°F

100

212

$T_C$

$T_F$

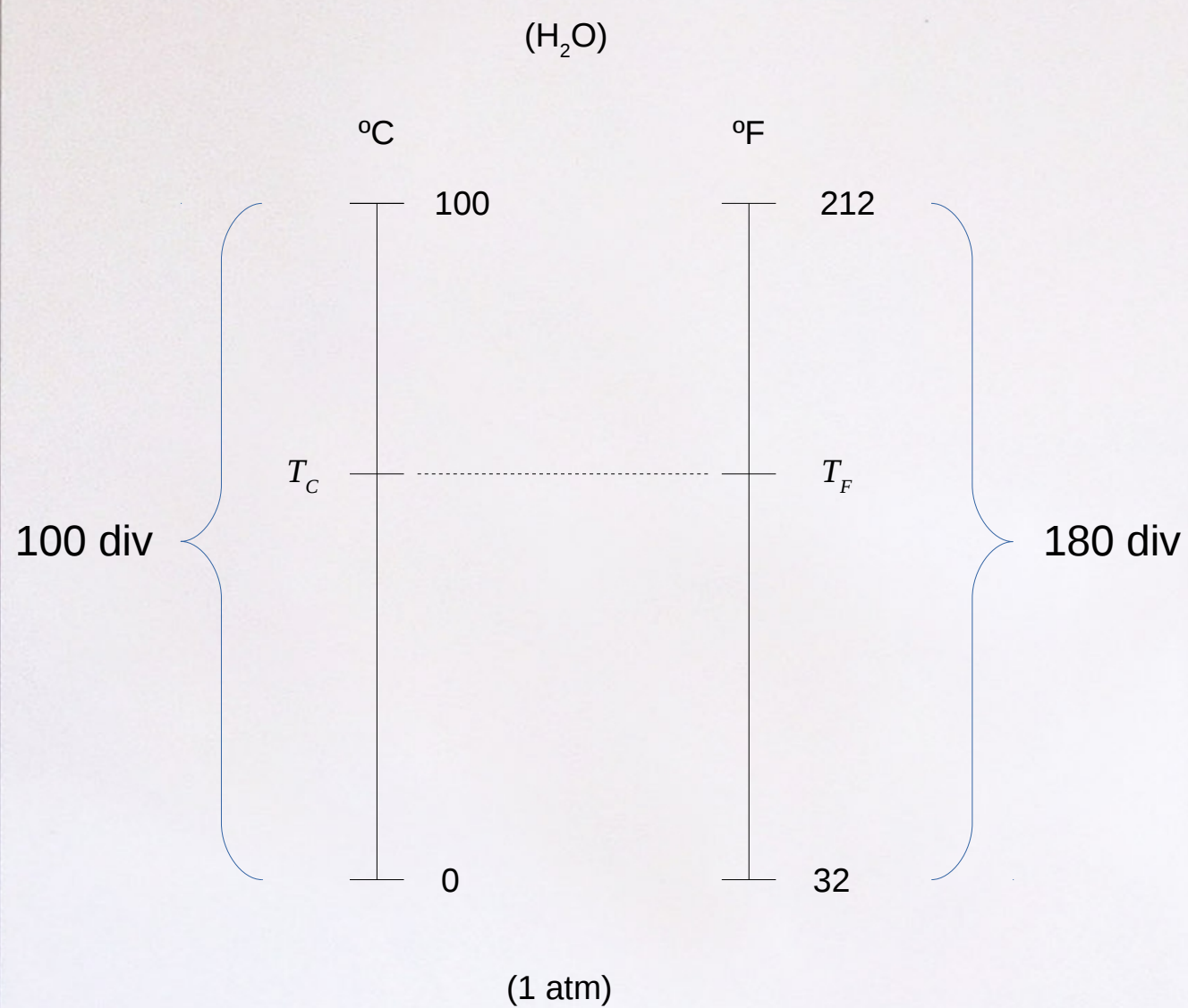
0

32

(1 atm)

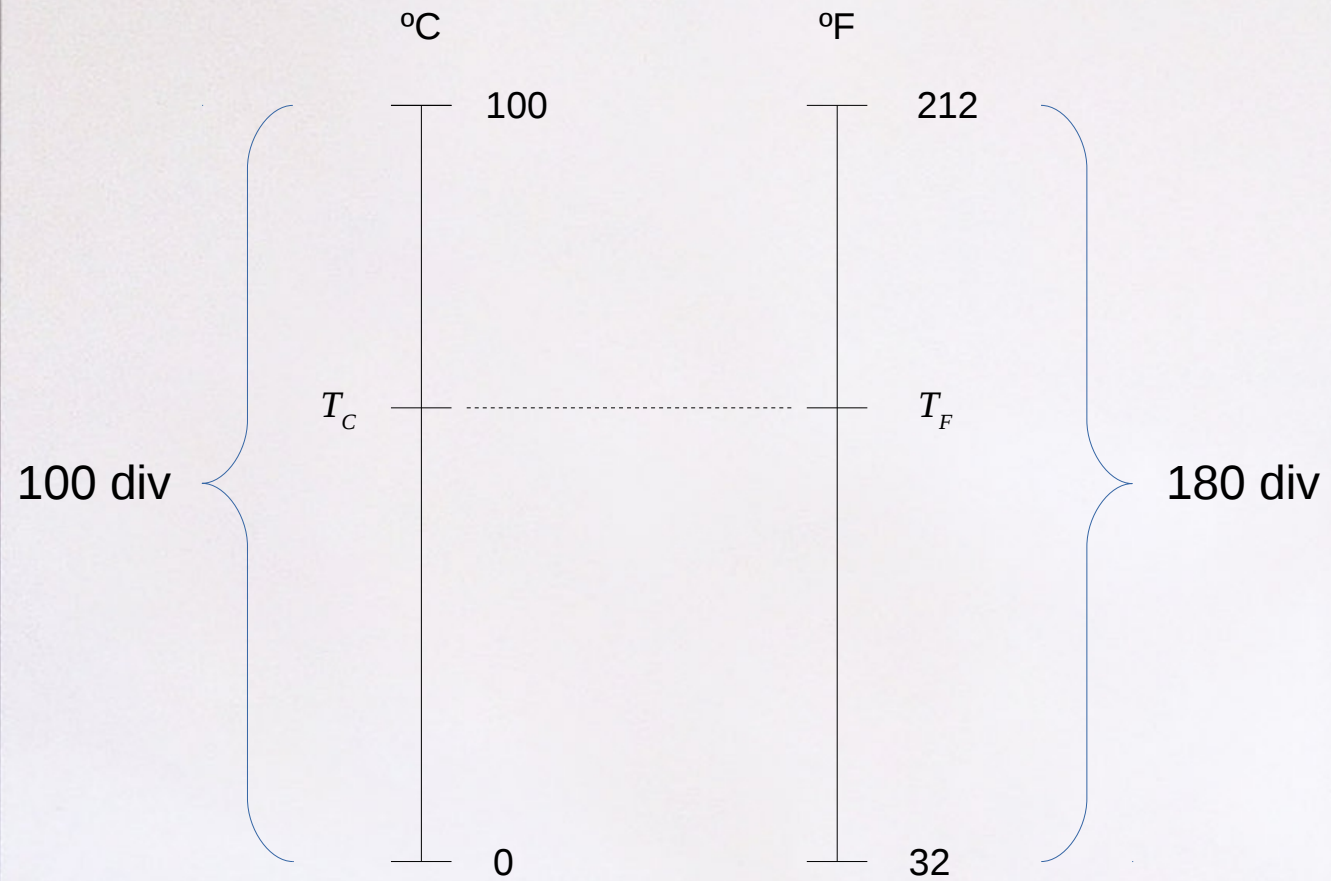
100 div

180 div

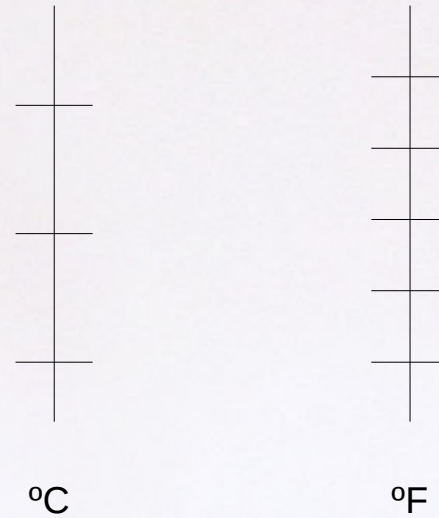


# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)



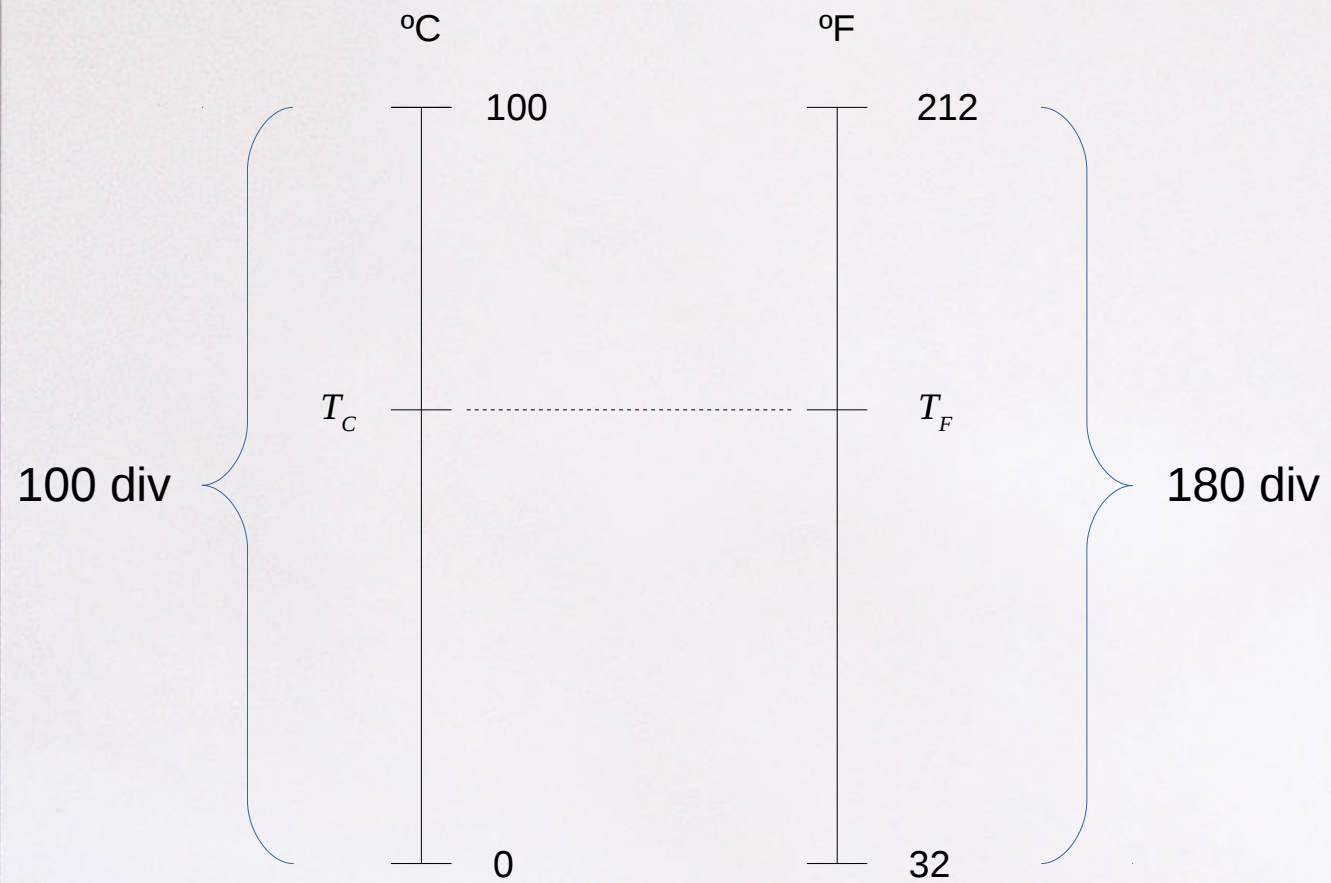
(1 atm)



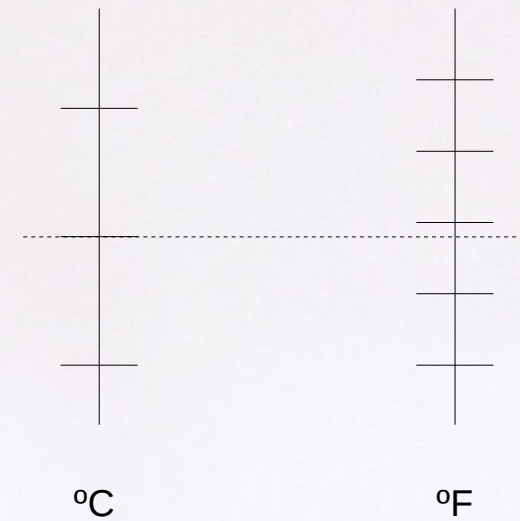


# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)

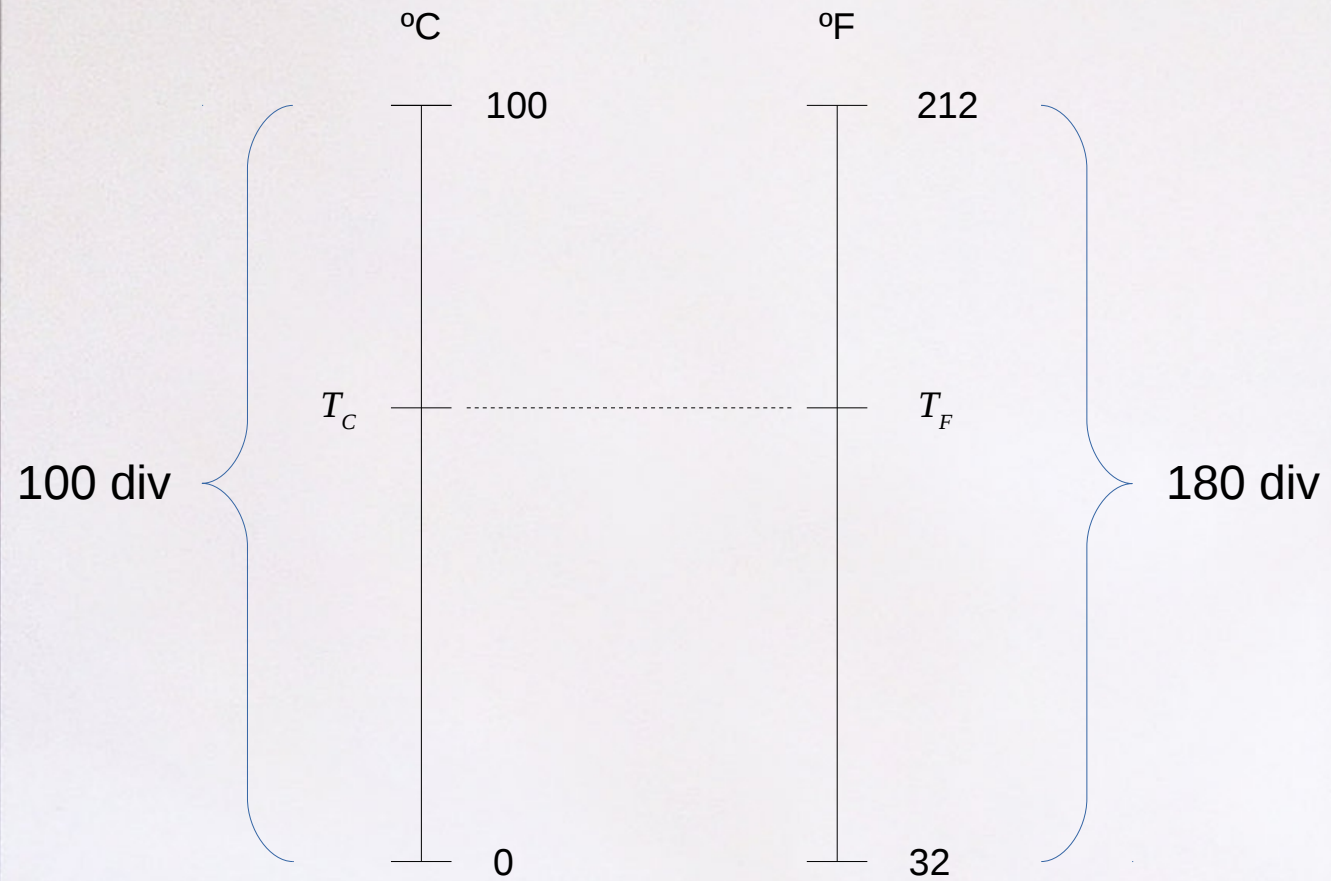


(1 atm)

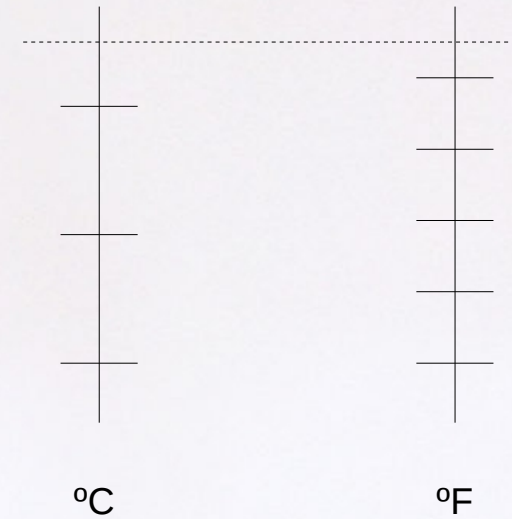


# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)

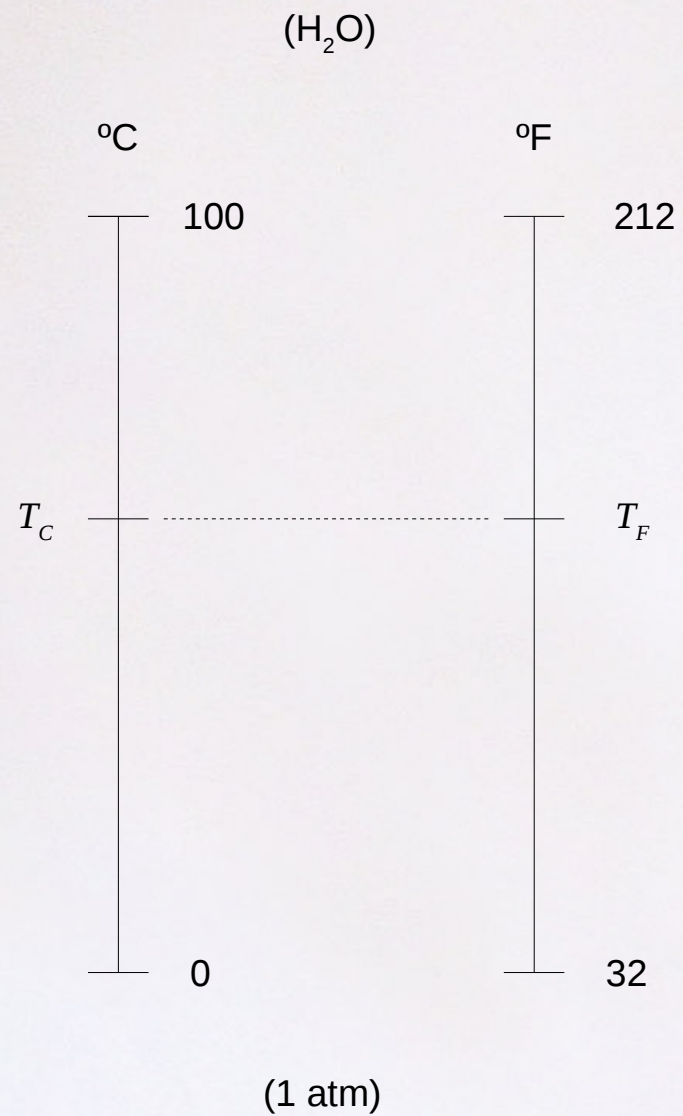


(1 atm)



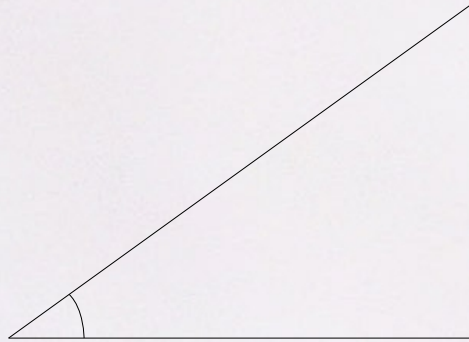


# Escalas de Temperatura



Conversão?

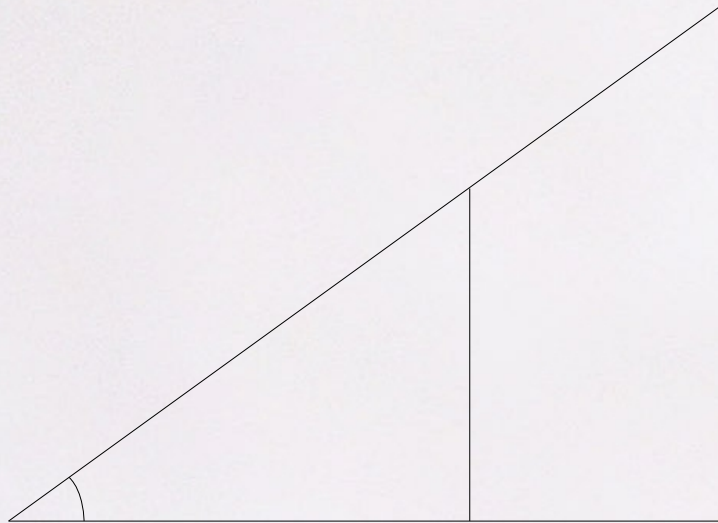
# Escalas de Temperatura





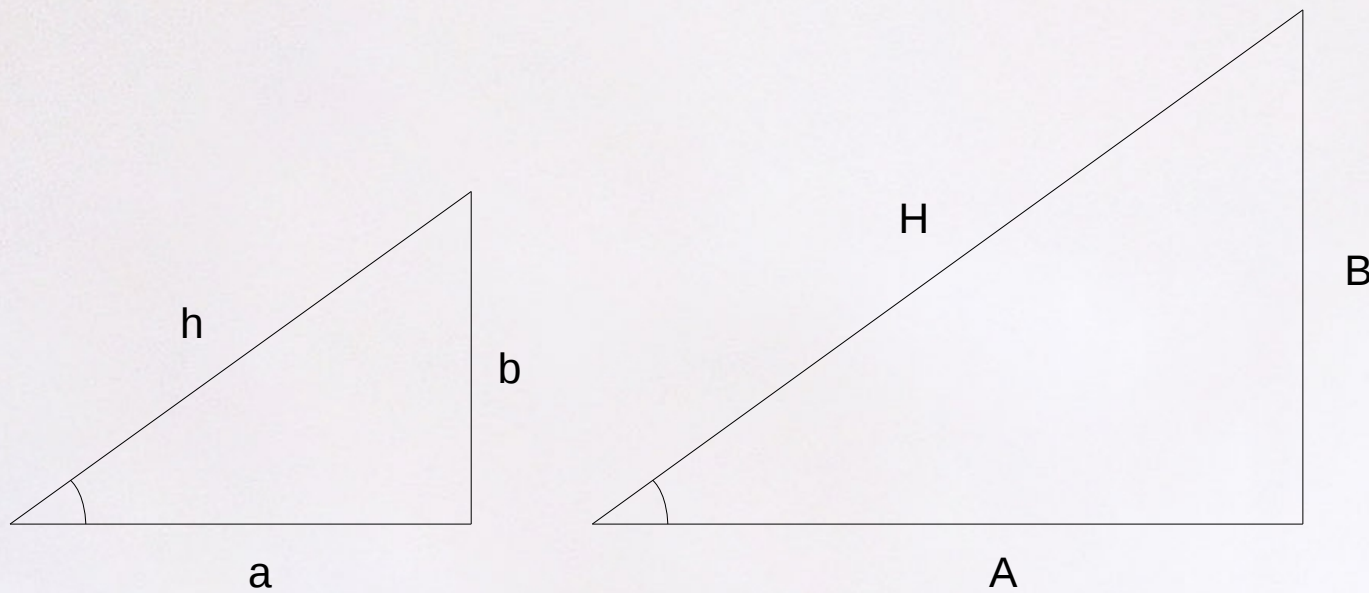
# Escalas de Temperatura

Proporcionalidade entre segmentos de reta



# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

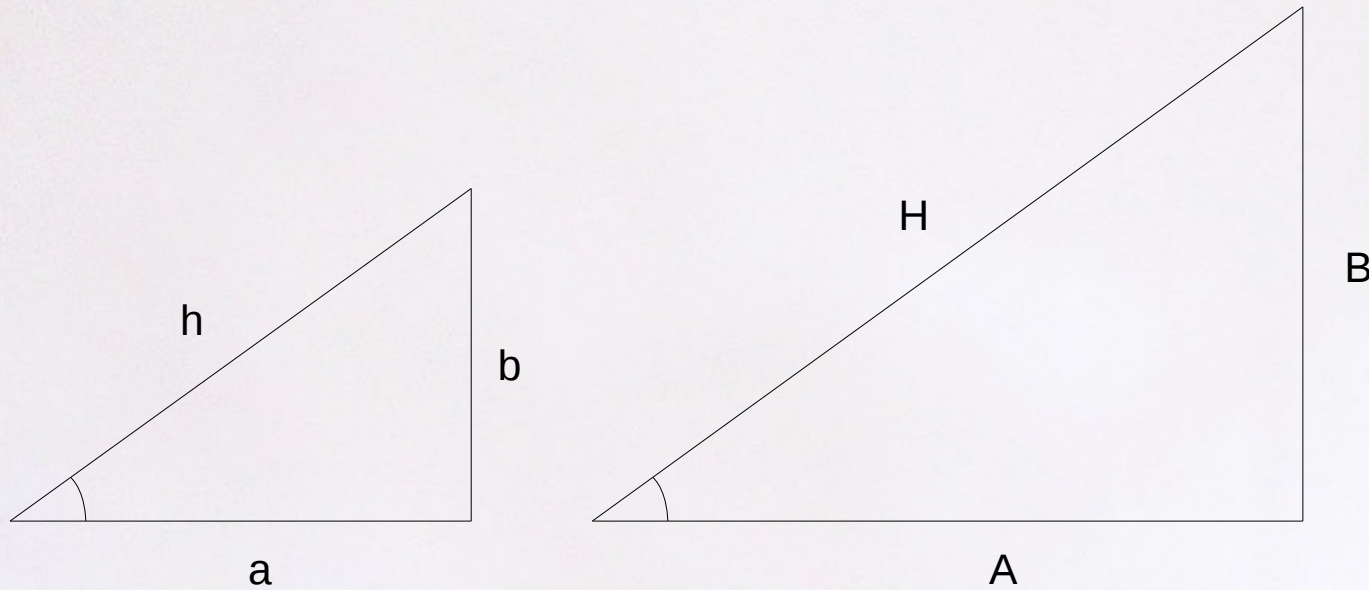




# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

(Proporcionalidade entre segmentos de reta)

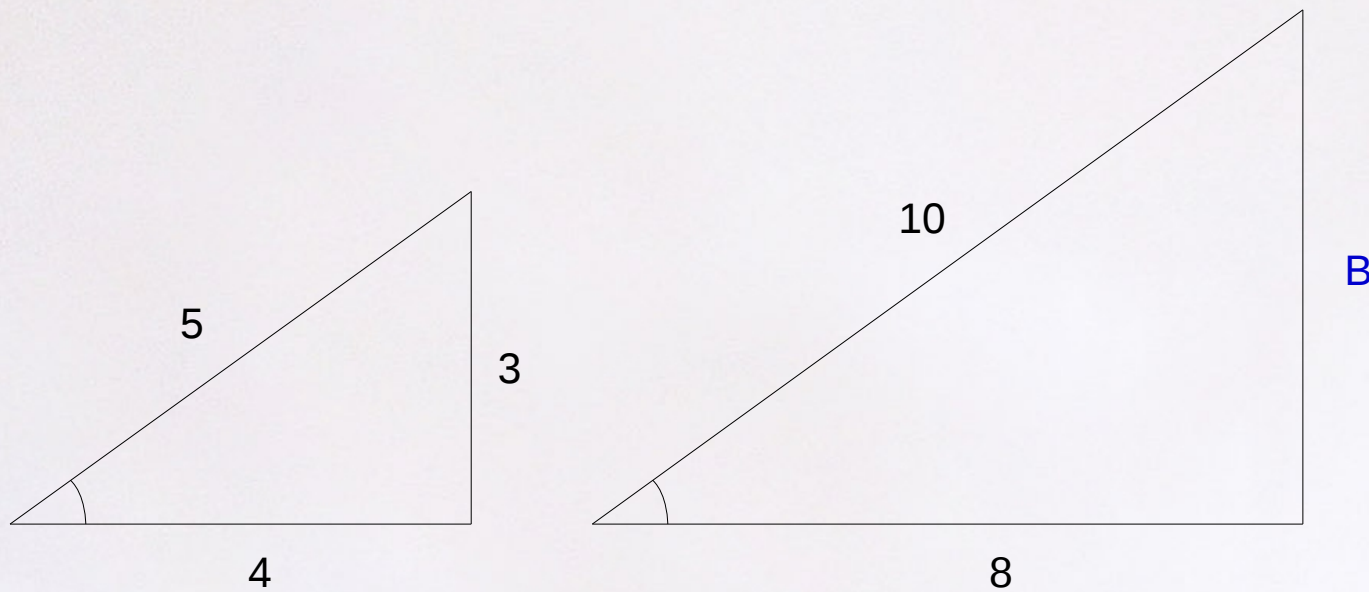


$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a} = \frac{H}{h}$$

# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

(Proporcionalidade entre segmentos de reta)



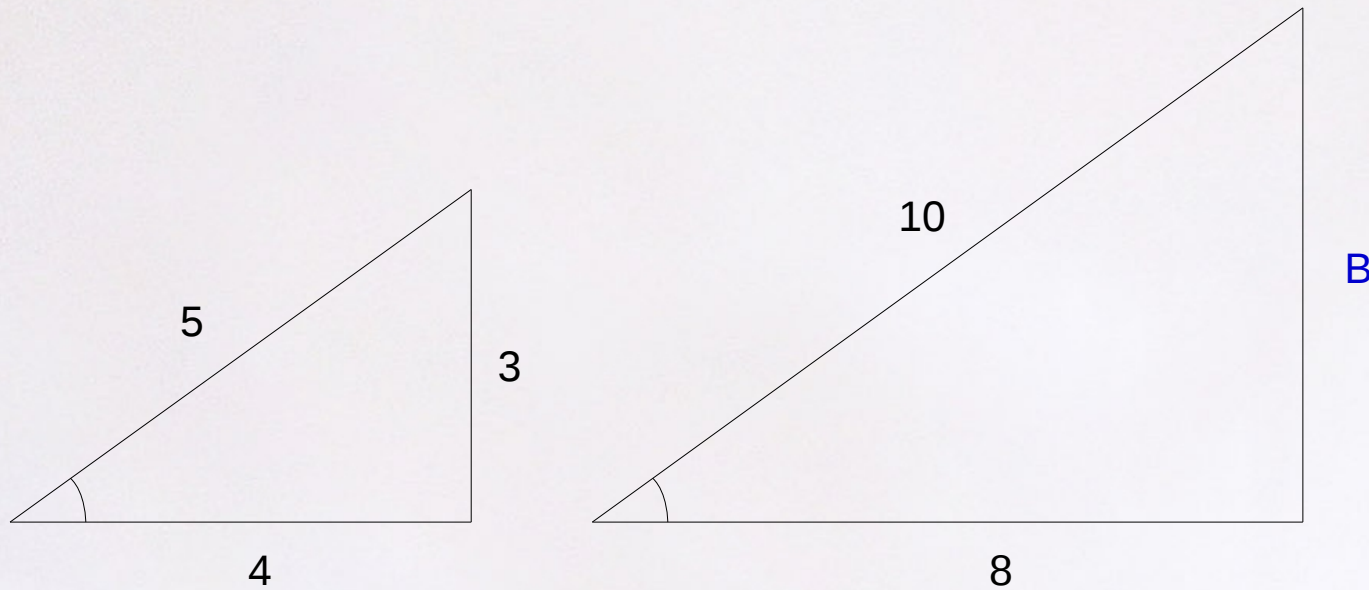
$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a}$$



# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

(Proporcionalidade entre segmentos de reta)



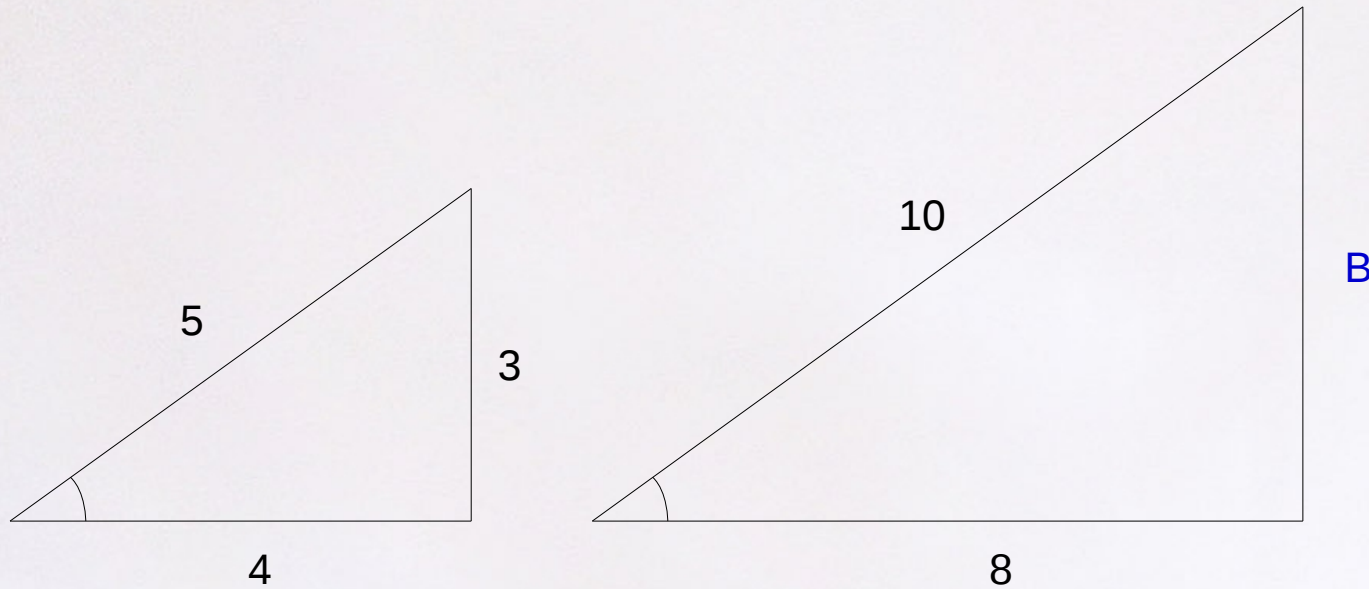
$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a}$$

$$B = \frac{A}{a} \cdot b$$

# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

(Proporcionalidade entre segmentos de reta)



$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a}$$

$$B = \frac{A}{a} \cdot b$$

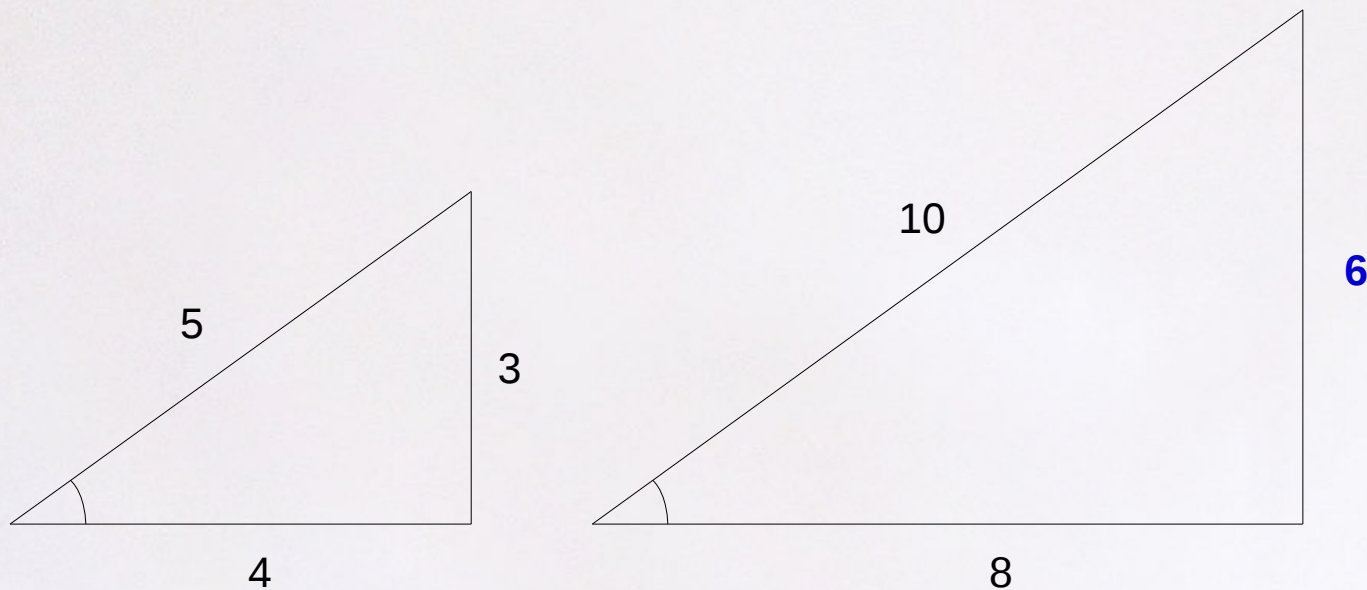
$$B = \frac{8}{4} \cdot 3$$



# Escalas de Temperatura

Triângulos equivalentes

(Proporcionalidade entre segmentos de reta)



$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a}$$

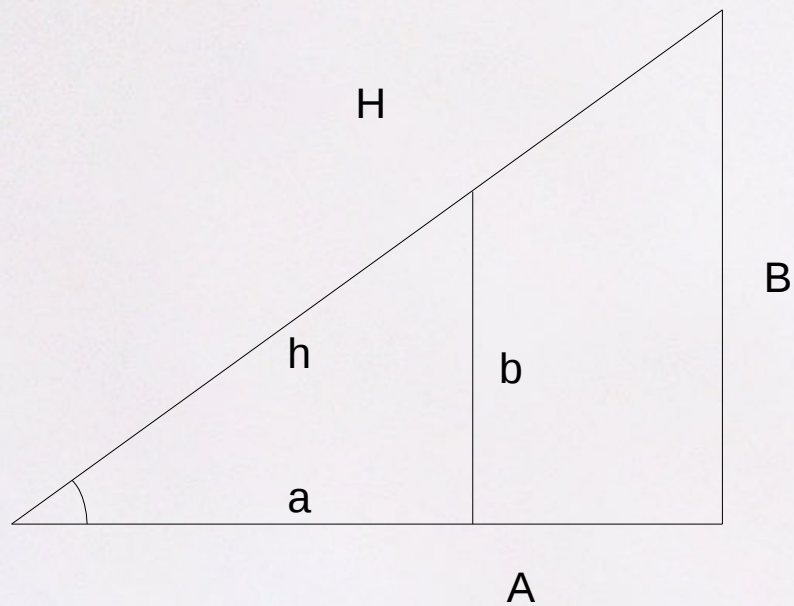
$$B = \frac{A}{a} \cdot b$$

$$B = \frac{8}{4} \cdot 3$$

$$B = 6$$

# Escalas de Temperatura

Proporcionalidade entre segmentos de reta



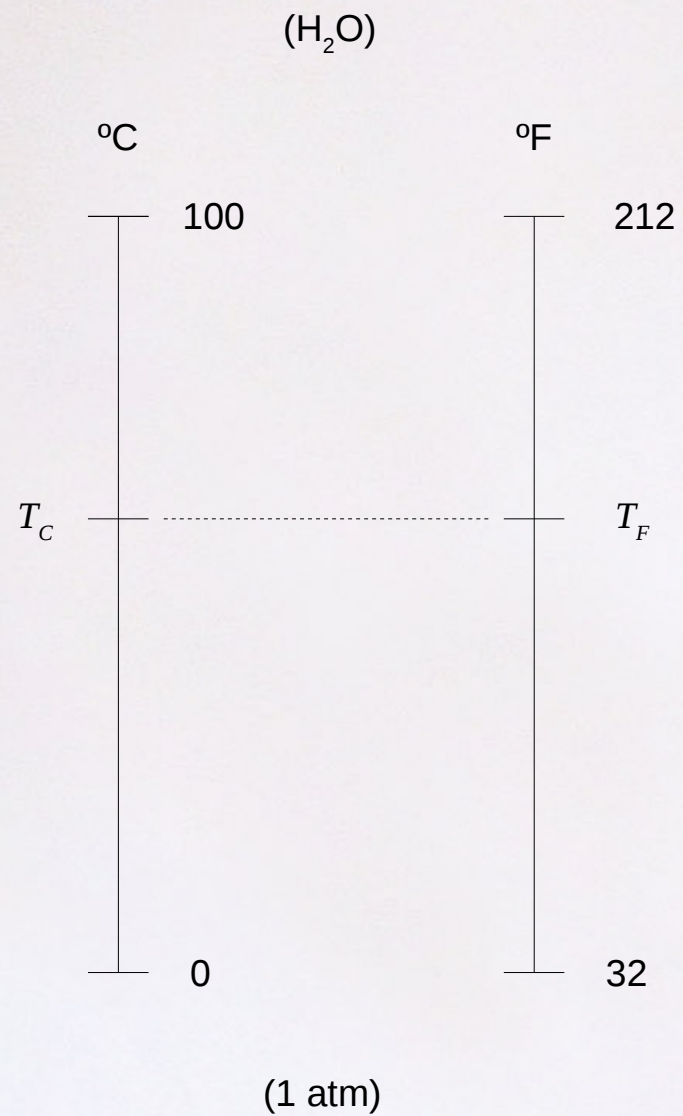
$$\frac{B}{b} = \frac{A}{a} = \frac{H}{h}$$

ou:

$$\frac{b}{B} = \frac{a}{A} = \frac{h}{H}$$

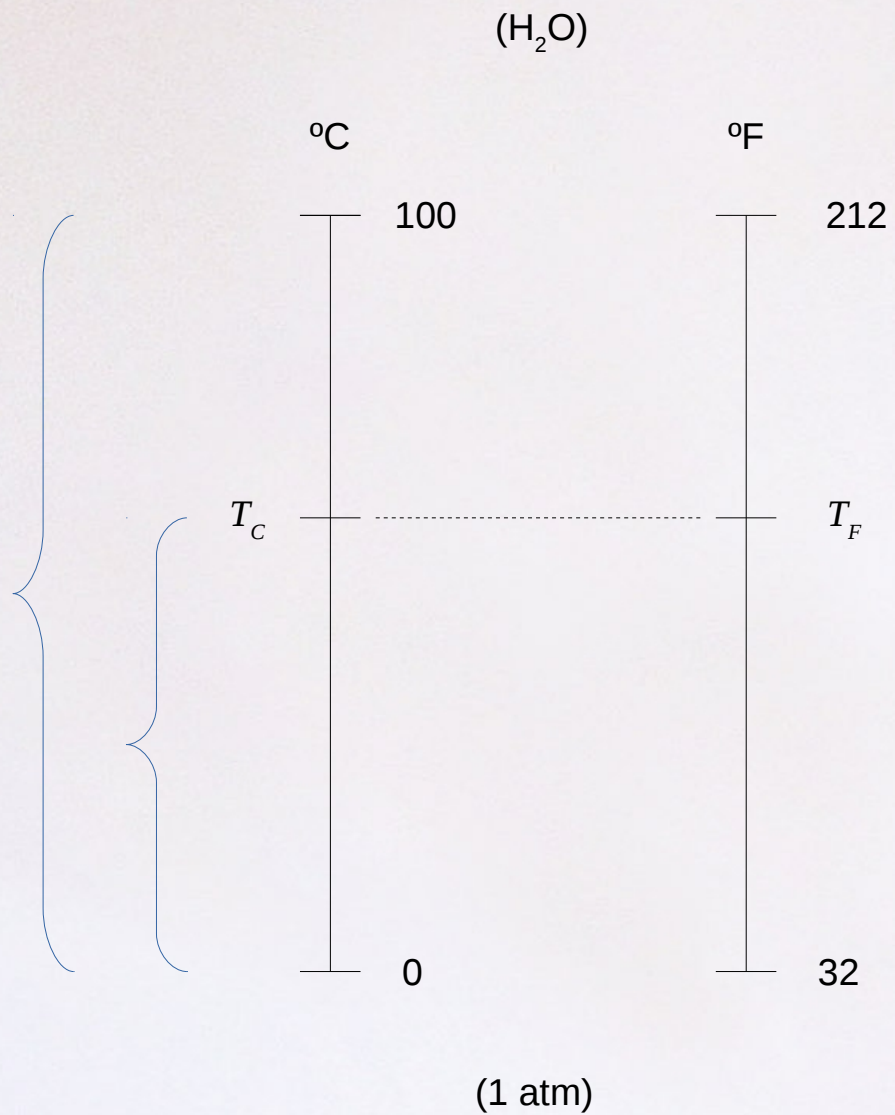


# Escalas de Temperatura



Conversão:

# Escalas de Temperatura

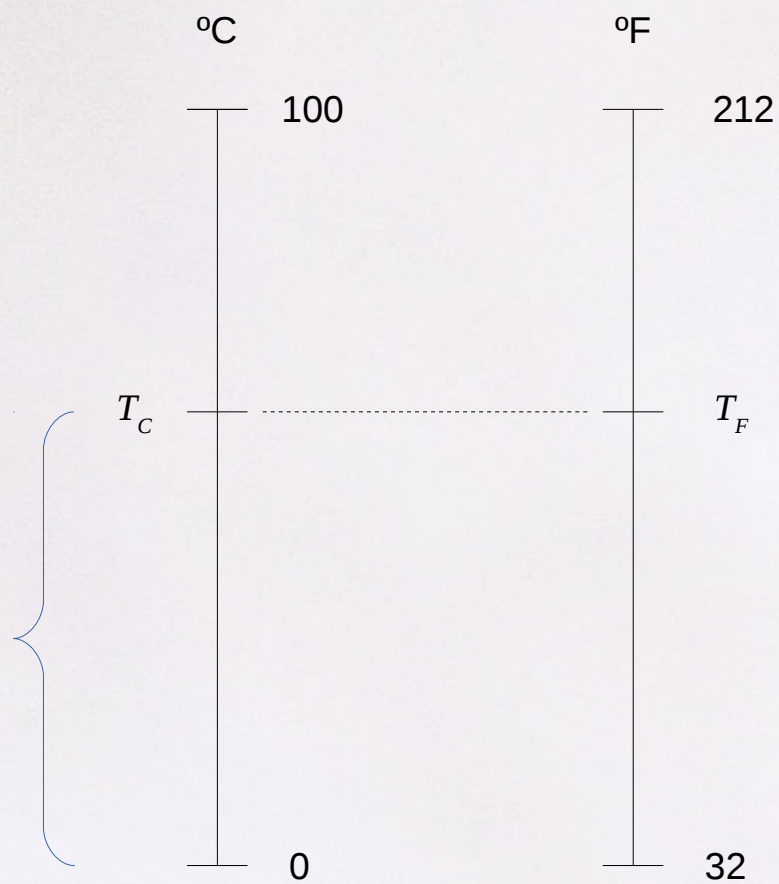


Conversão:



# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)



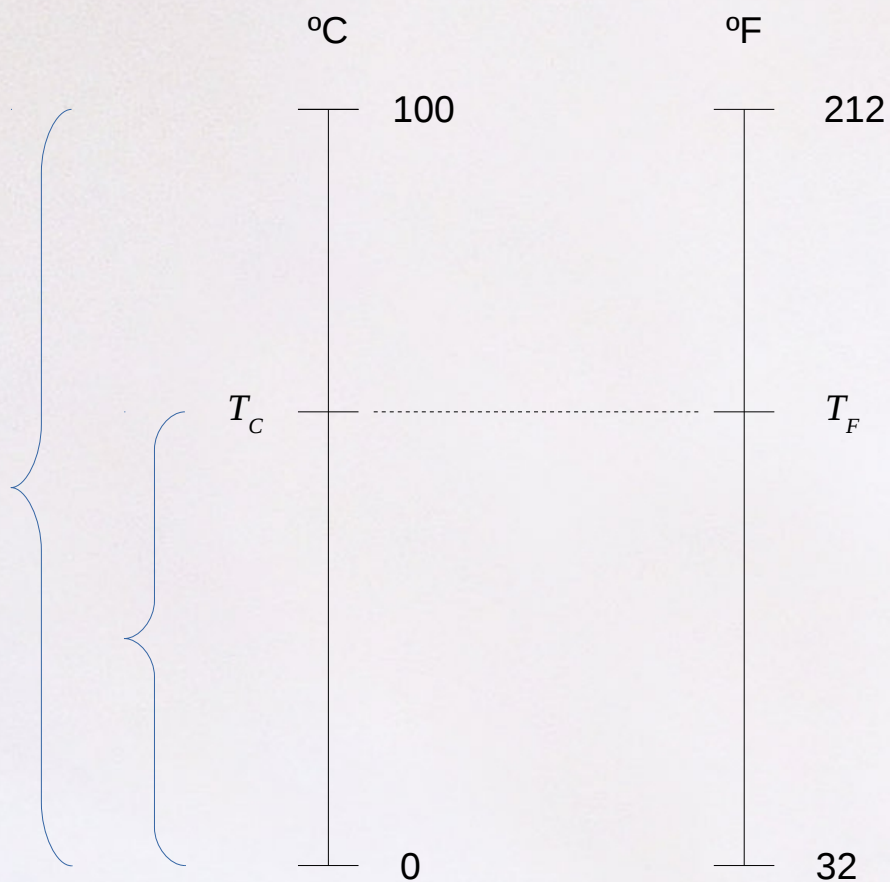
(1 atm)

Conversão:

$$T_C - 0$$

# Escalas de Temperatura

(H<sub>2</sub>O)



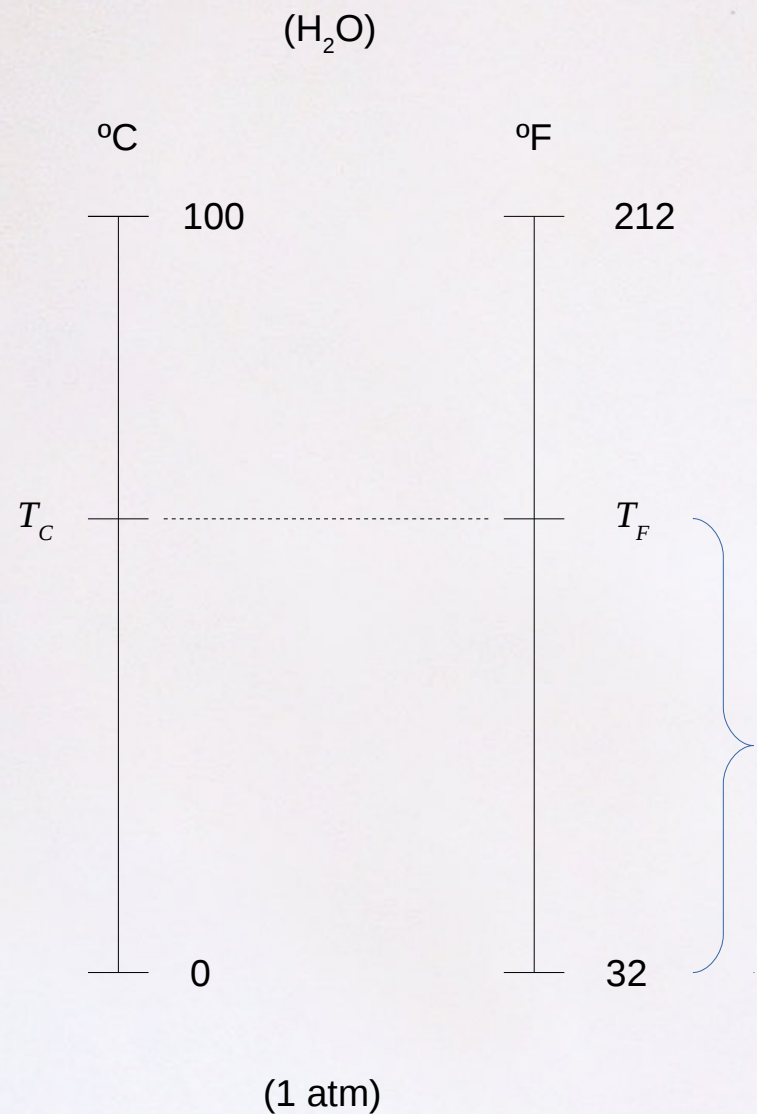
Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0}$$

(1 atm)



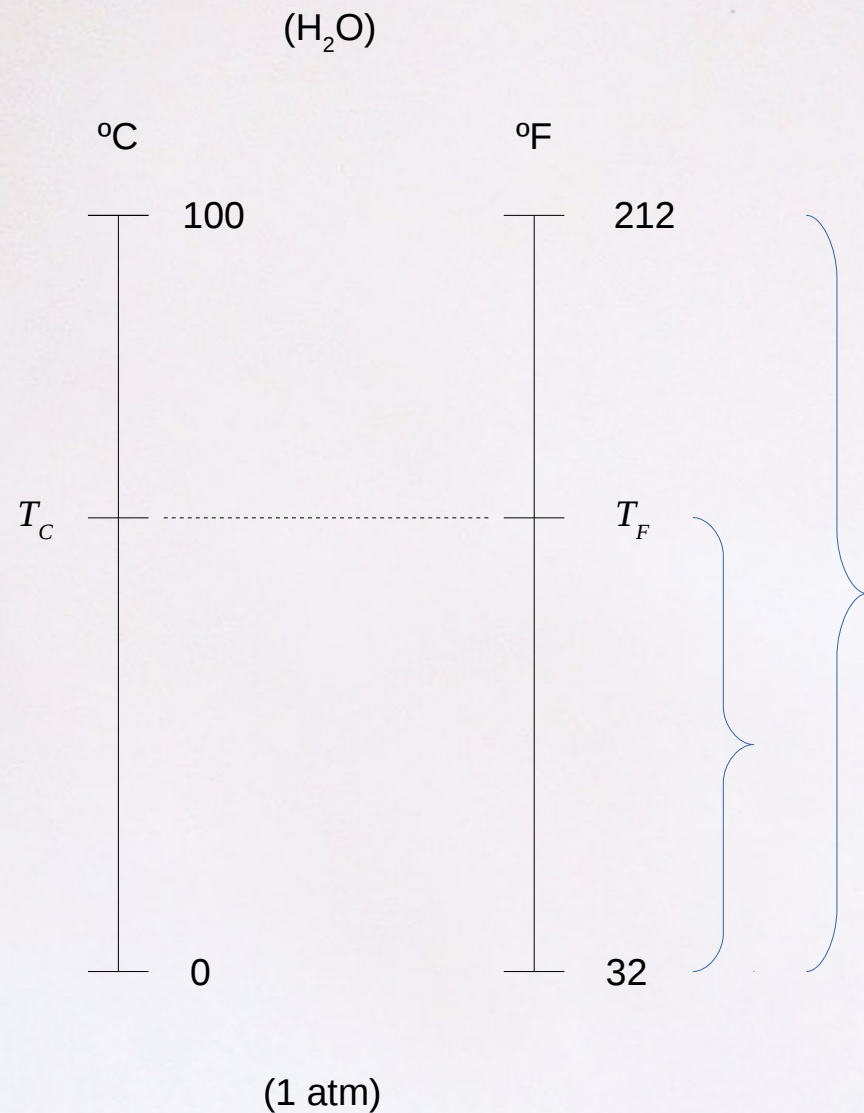
# Escalas de Temperatura



Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

# Escalas de Temperatura

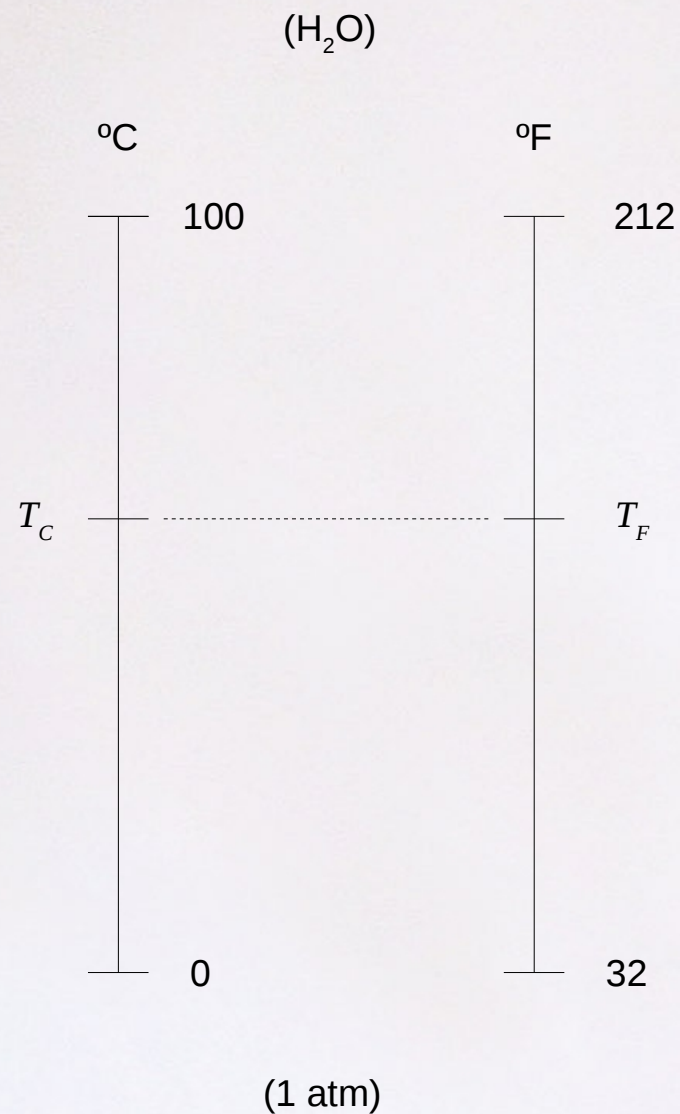


Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$



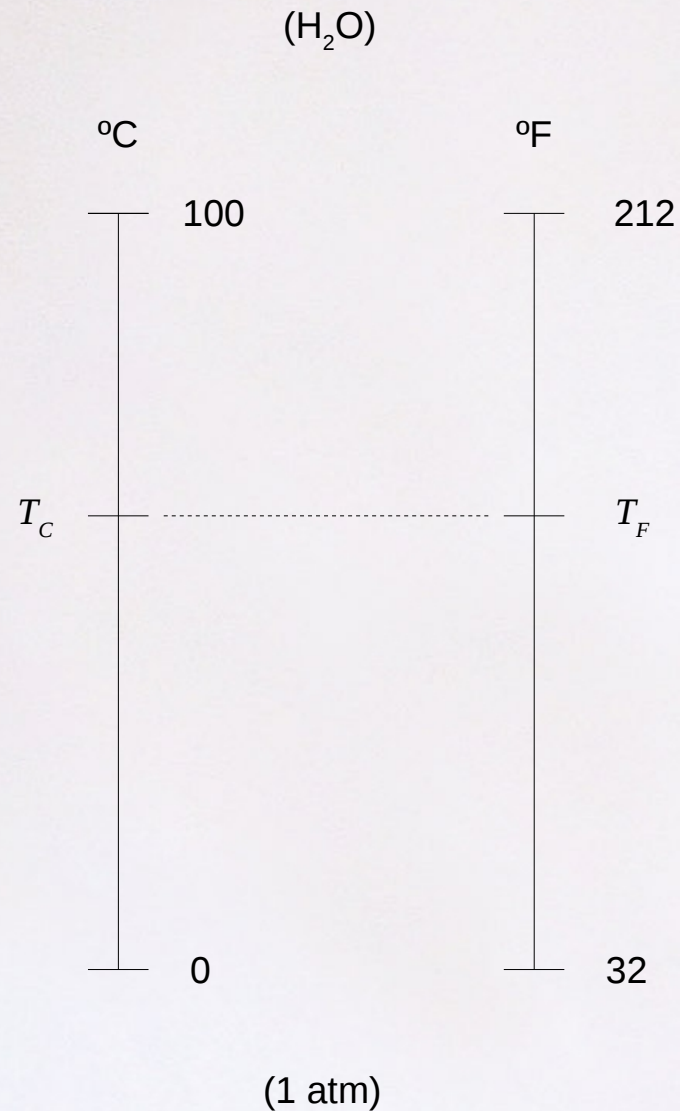
# Escalas de Temperatura



Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

# Escalas de Temperatura



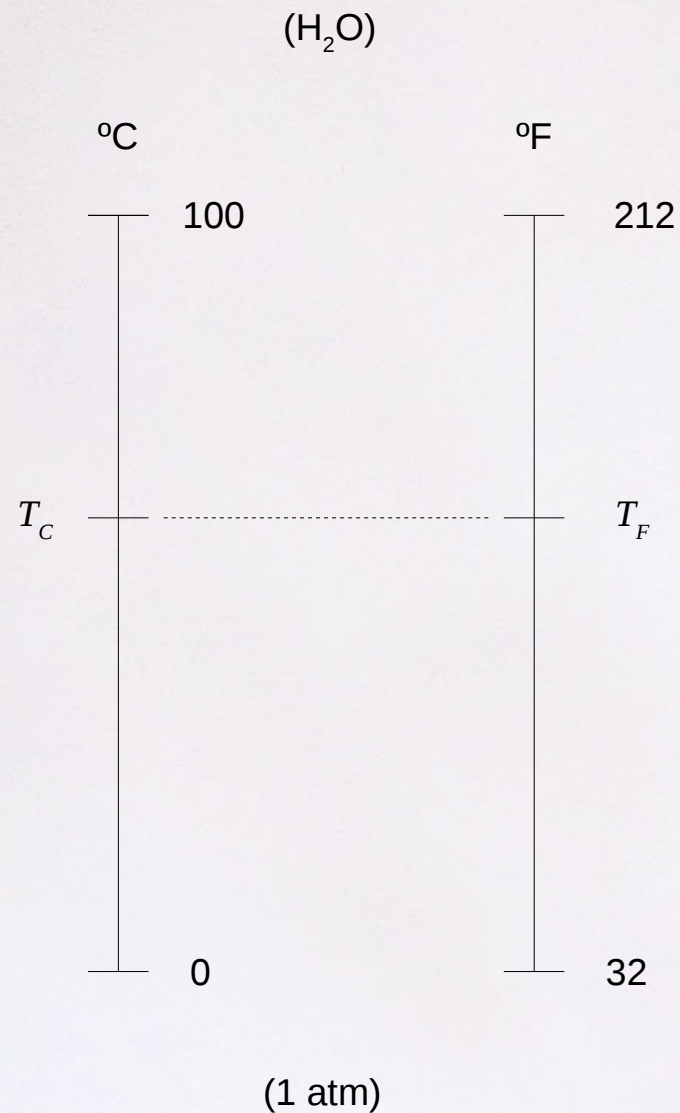
Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$



# Escalas de Temperatura



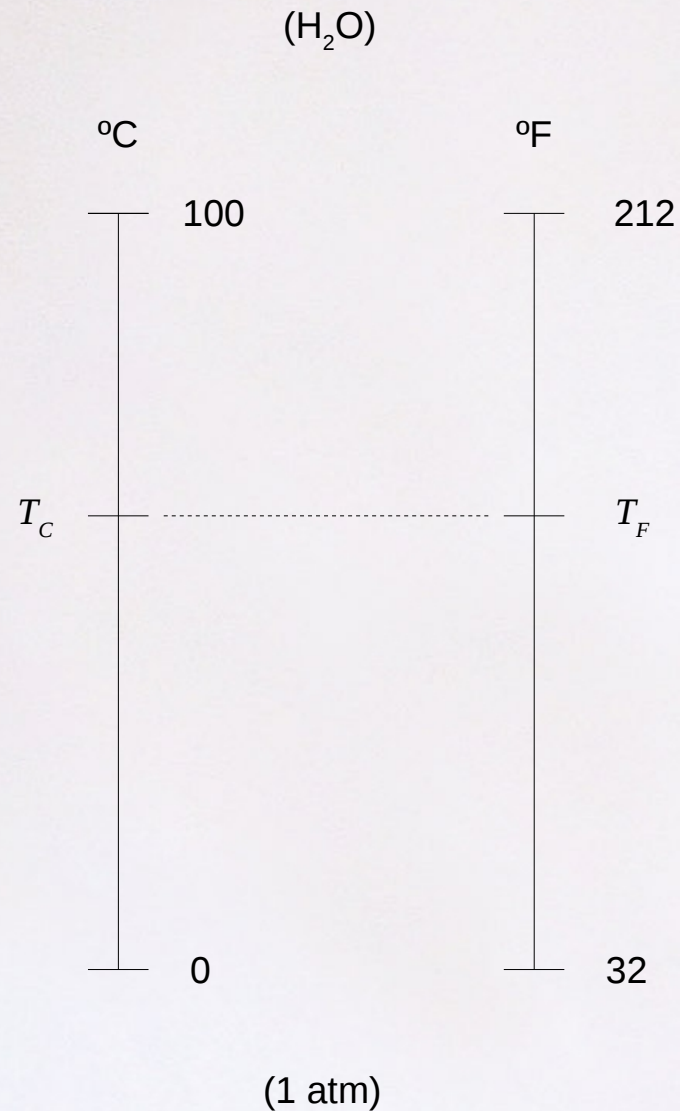
Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$

$$T_C = \frac{100}{180}(T_F - 32)$$

# Escalas de Temperatura



Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

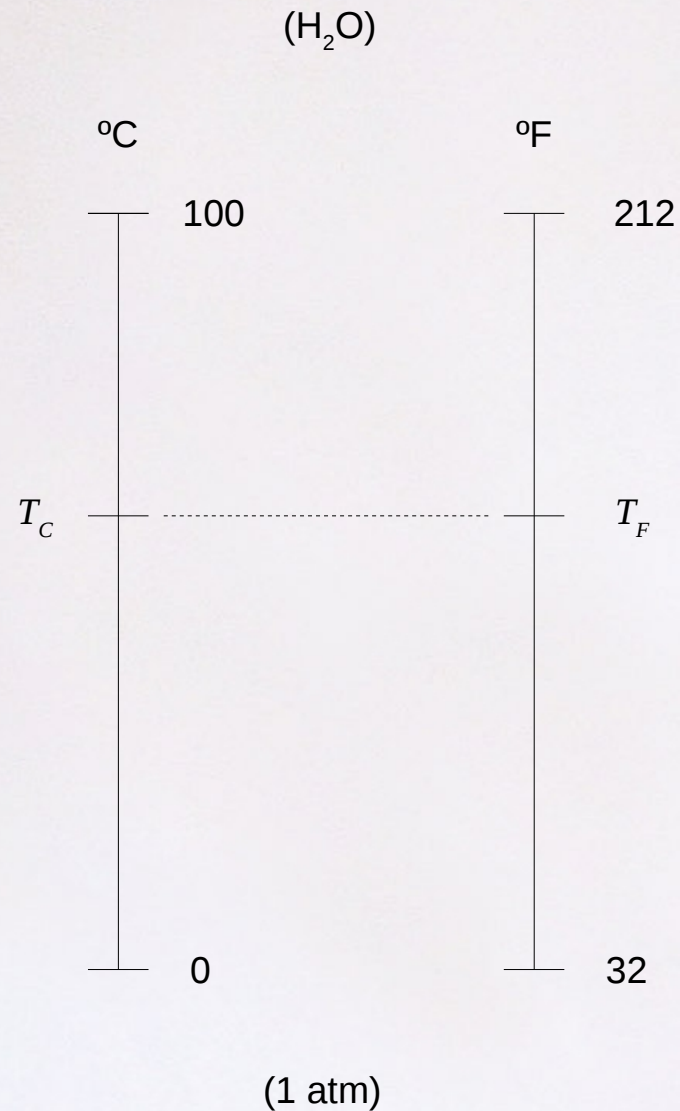
$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$

$$T_C = \frac{100}{180}(T_F - 32)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$



# Escalas de Temperatura



Conversão:

$$\frac{T_C - 0}{100 - 0} = \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

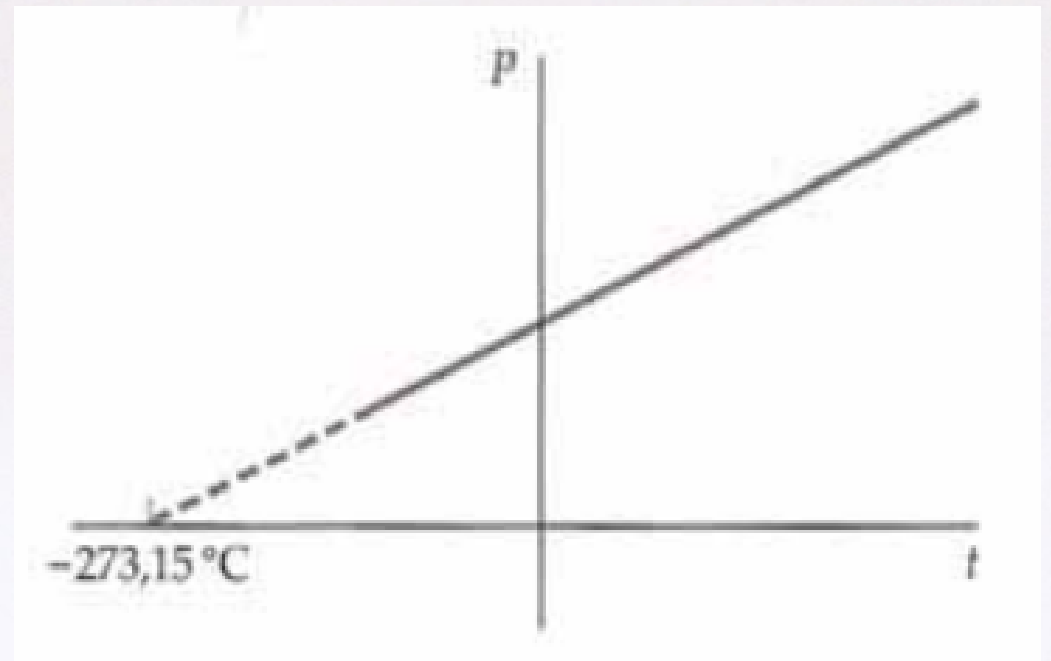
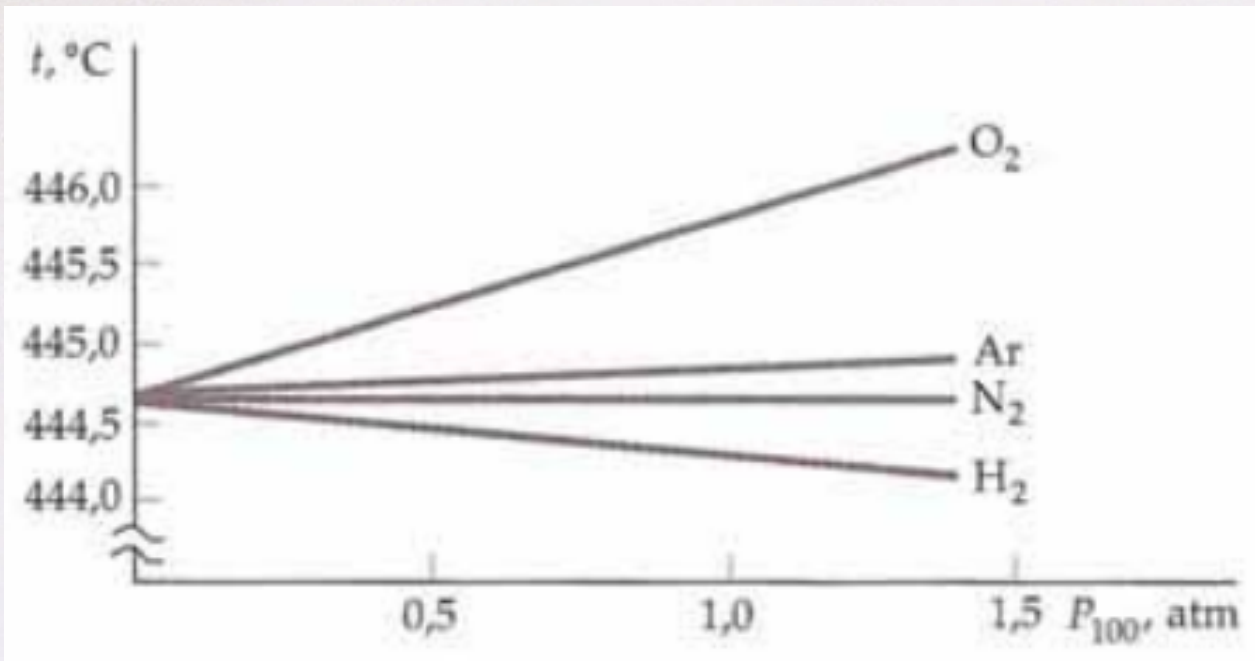
$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$

$$T_C = \frac{100}{180}(T_F - 32)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

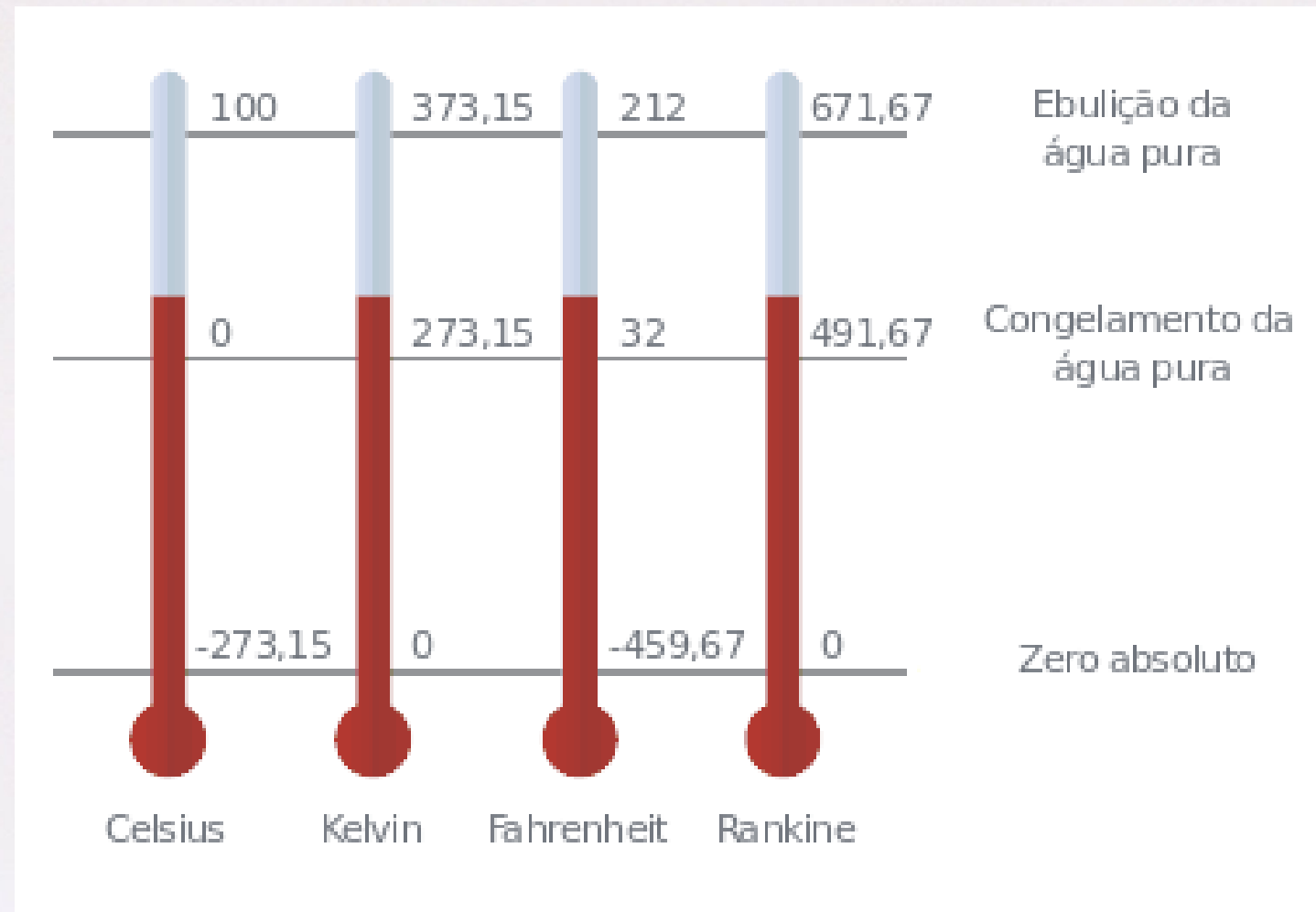
# Escalas de Temperatura



[Figuras: TIPLER, Paul. MOSCA, Gene. Física, para cientistas e engenheiros, vol 1, 6a ed., LTC, 2009.]

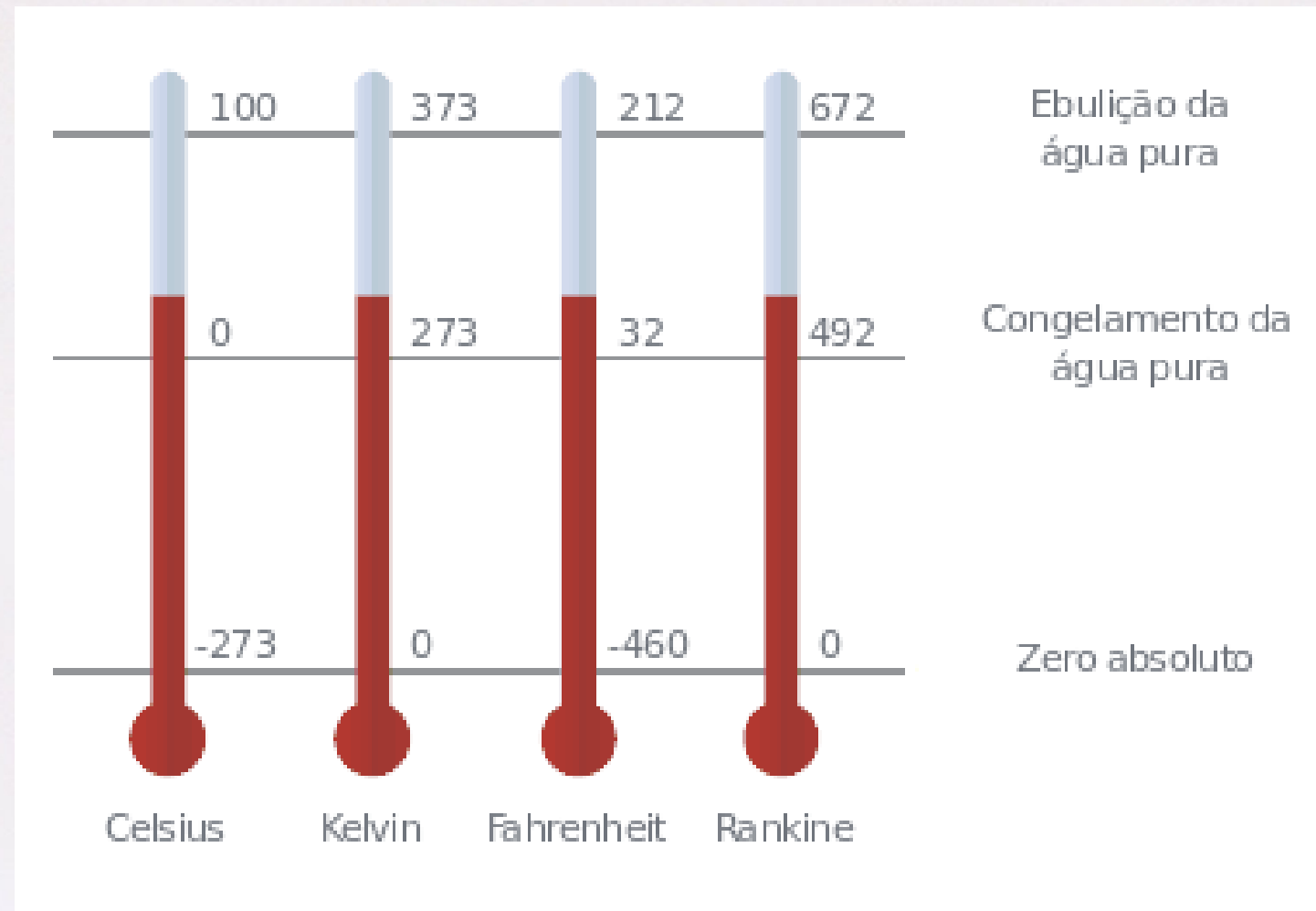


# Escalas de Temperatura



[Figura adaptada de: <https://www.zmescience.com/science/what-is-temperature-03525/>]

# Escalas de Temperatura



[Figura adaptada de: <https://www.zmescience.com/science/what-is-temperature-03525/>]



# Escalas de Temperatura

Assim:

$$T_K = T_C + 273,15$$

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

# Escalas de Temperatura

Assim:

$$T_K = T_C + 273,15$$

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

$$T_C = T_K - 273,15$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$



# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$



# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F}$$

# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F}$$



# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = 50 - 20 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$



# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = 50 - 20 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_F = 122 - 68 = 54 \text{ }^\circ\text{F}$$

# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = 50 - 20 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_F = 122 - 68 = 54 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_K = 323,15 - 293,15 = 30 \text{ K}$$



# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = 50 - 20 = \underline{30} \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_F = 122 - 68 = 54 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_K = 323,15 - 293,15 = \underline{30} \text{ K}$$

# Escalas de Temperatura

Exemplo: Calcule a variação de temperatura nas escalas Celsius, Fahrenheit e Kelvin.

$$T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 68 \text{ }^\circ\text{F} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_f = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 122 \text{ }^\circ\text{F} = 323,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_C = 50 - 20 = \underline{30} \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_F = 122 - 68 = 54 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_K = 323,15 - 293,15 = \underline{30} \text{ K}$$

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

$$\Delta T_C \neq \Delta T_F$$



# Escalas de Temperatura

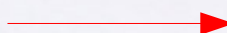
Assim:

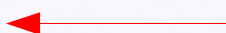
$$T_K = T_C + 273,15$$

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$$

$$T_C = T_K - 273,15$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$


$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

$$\Delta T_F = \frac{9}{5}\Delta T_C$$


# Dilatação Térmica



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)

Você já viu isso?



(Ponte Costa e Silva/DF – 05/01/2014 )

[Figura: [https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2014/01/05/interna\\_cidadesdf,406359/problema-em-estrutura-da-ponte-costa-e-silva-faz-local-ser-interditado.shtml](https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2014/01/05/interna_cidadesdf,406359/problema-em-estrutura-da-ponte-costa-e-silva-faz-local-ser-interditado.shtml)]



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)

Você já viu isso?



(Ponte Orestes Quéricia/SP – 27/07/2011)

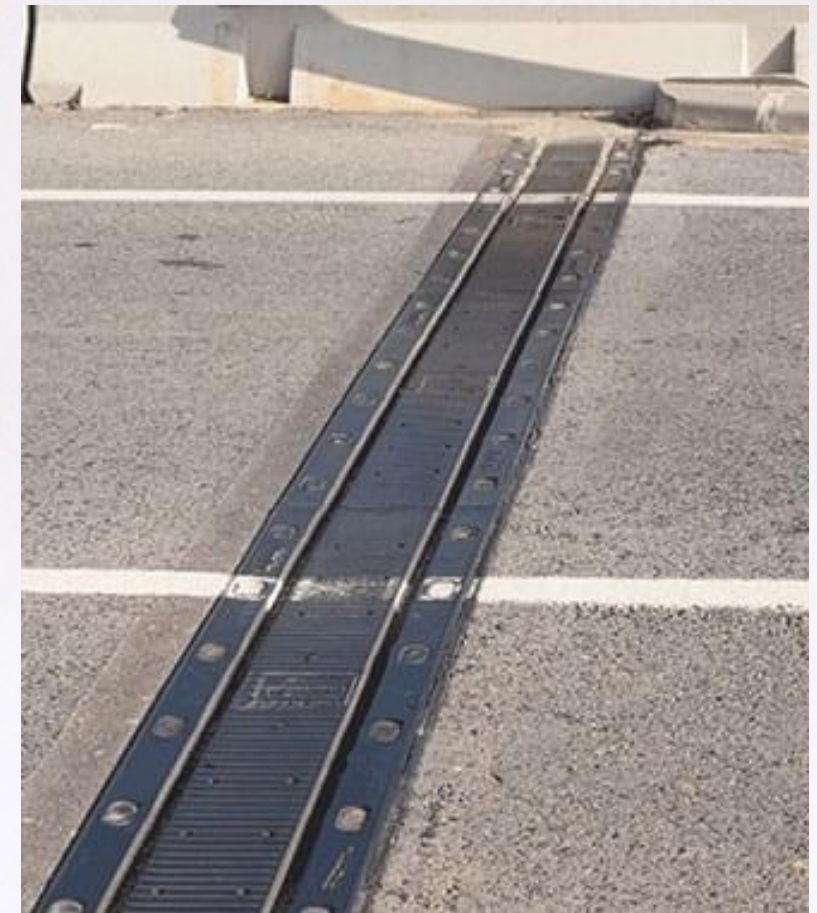
[Figura: <https://descomplica.com.br/artigo/4-razoes-praticas-e-cotidianas-para-voce-prestar-atencao-na-dilatacao-termica/4rr/>]



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)

Juntas de dilatação:



[Figuras: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/juntas-de-dilatacao-ajudam-a-evitar-fadiga-estrutural-de-pontes-e-viadutos/14462>  
<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/dilatacao-uma-propriedade-dos-materiais.htm>  
<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/coeficientes-dilatacao-superficial-volumetrica.htm>]



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)

Juntas de dilatação:



**Juntas de dilatação:** são separações físicas (aberturas) que existem nas estruturas para permitir o movimento e reduzir tensões, mitigando os efeitos da variação volumétrica - decorrente da variação da temperatura. (evitam dano nas estruturas)

As juntas são normalmente acompanhadas por um **sistema de vedação**, seja para evitar preenchimento por material indesejado (pois deve ter elasticidade), ou para assegurar uma transição suave entre estruturas, como em trilhos e pontes.

[Figuras: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=36671>  
<http://elisiophysica.blogspot.com/2010/12/dilatacao-linear.html>

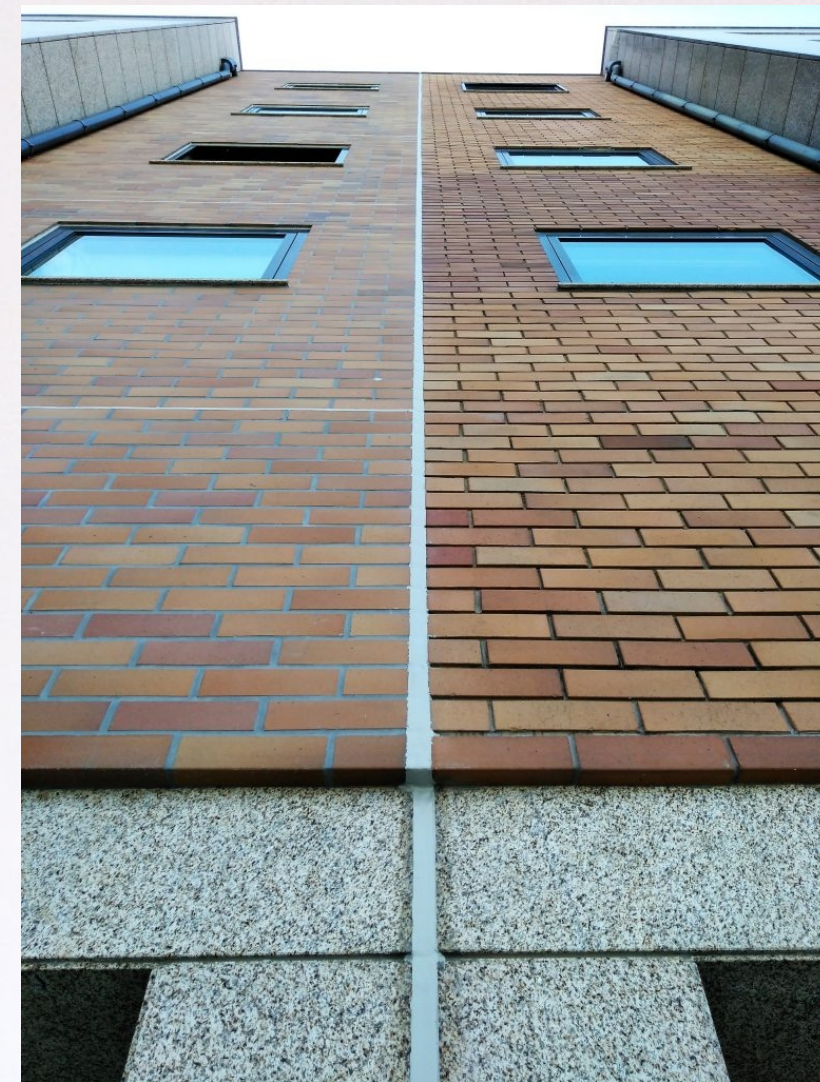
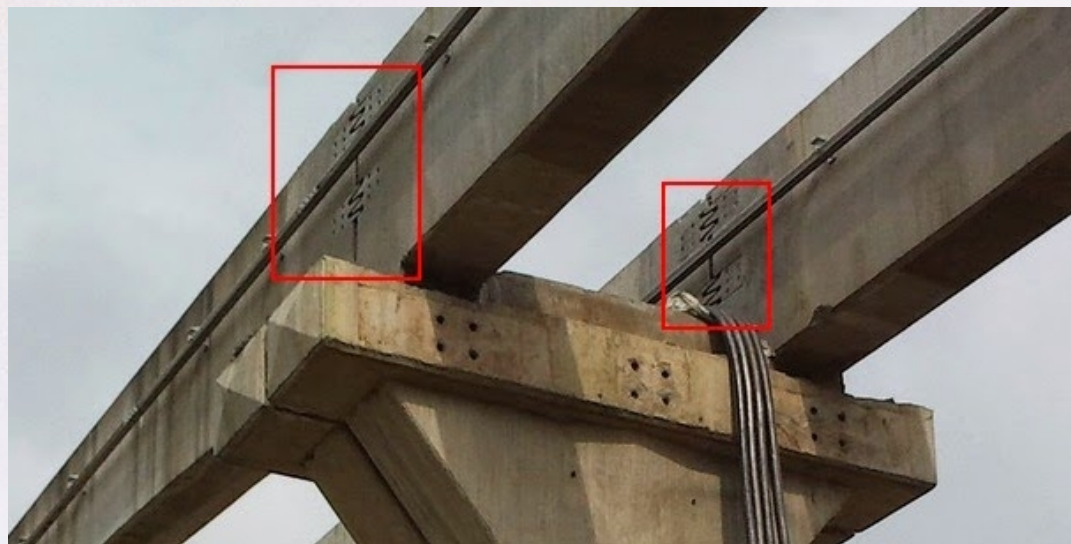
<https://www.volpe.dot.gov/infrastructure-systems-and-technology/structures-and-dynamics/track-buckling-research>]



# Dilatação Térmica

(Expansão Térmica)

Juntas de dilatação:



[Figuras: <https://aconstrutoravion.blogspot.com/2014/07/juntas-de-dilatacao.html>  
<https://verti.pt/noticias/juntas-de-dilatacao-entre-edificios/>  
<https://www.archiexpo.com/pt/prod/emac/product-59013-1453589.html> ; <http://www.traver.pt/juntasdedilatacao>]



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:

# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:

$T_i$





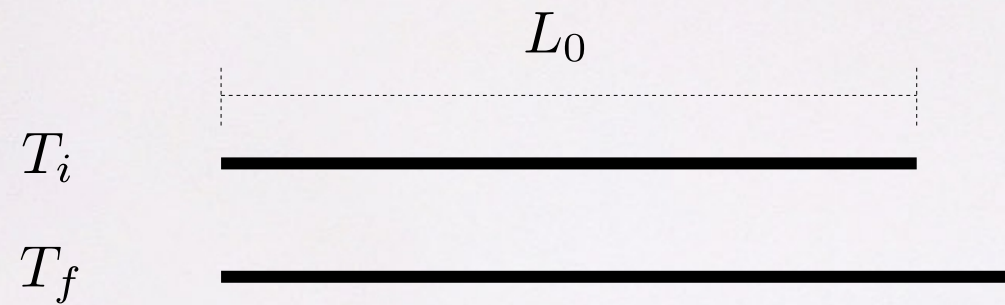
# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



# Dilatação Térmica

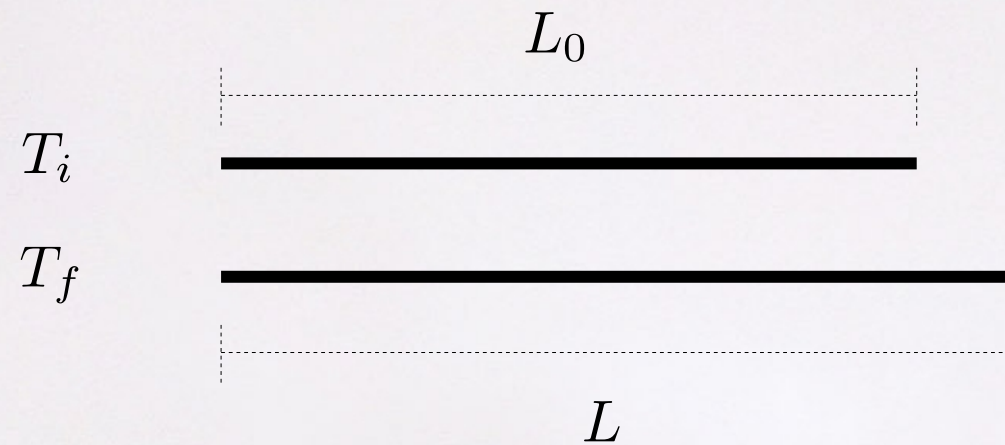
→ Dilatação linear:





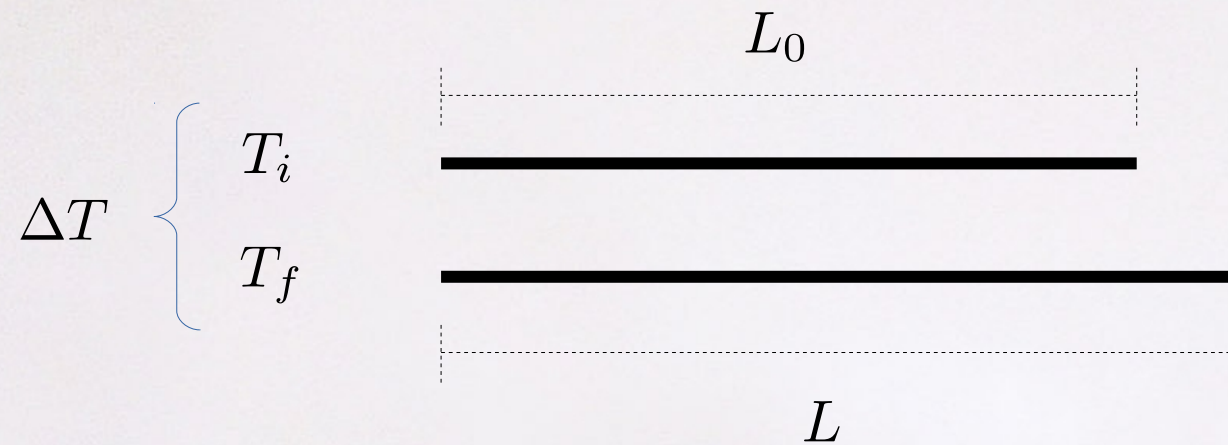
# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



# Dilatação Térmica

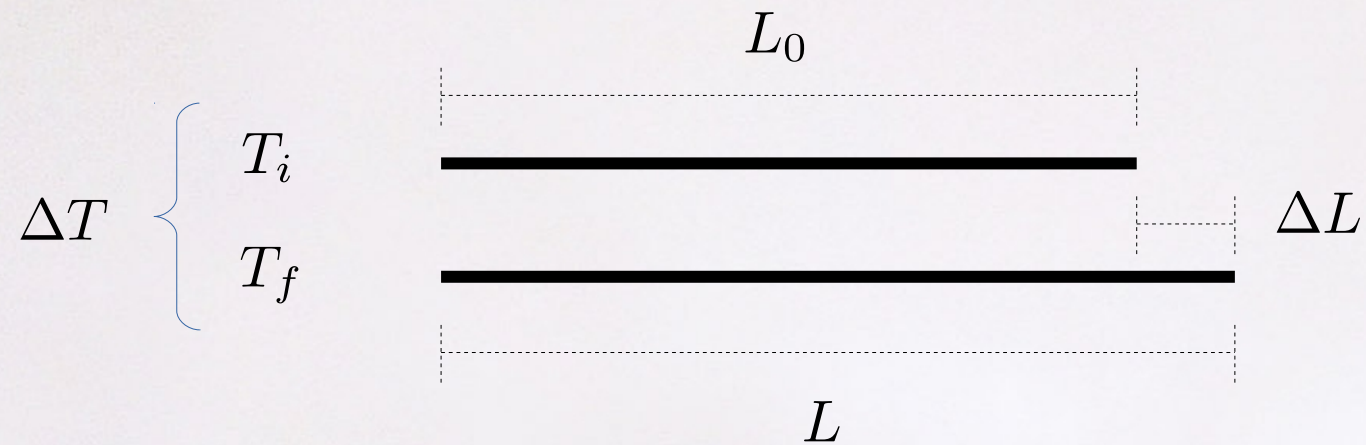
→ Dilatação linear:





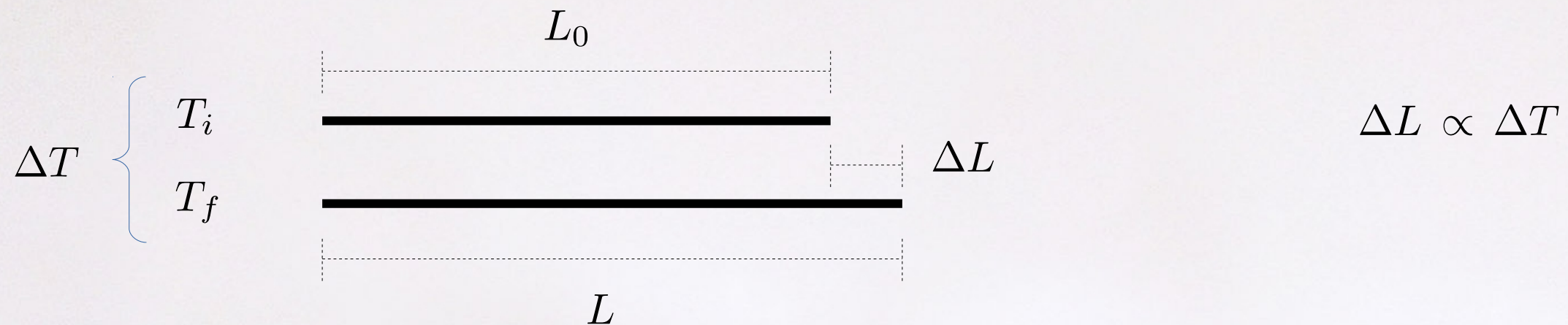
# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:





# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

(vamos considerar cte para valores não muito próximos da temperatura de fusão do sólido)



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T}$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad \frac{[\text{m}]}{[\text{m}] [\text{K}]}$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad \frac{[\text{m}]}{[\text{m}] [\text{K}]} = \frac{1}{[\text{K}]}$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação linear:



$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad \frac{[\text{m}]}{[\text{m}] [\text{K}]} = \frac{1}{[\text{K}]} = \text{K}^{-1}$$



# Dilatação Térmica

Tabela:

Alguns Coeficientes de Dilatação Linear<sup>a</sup>

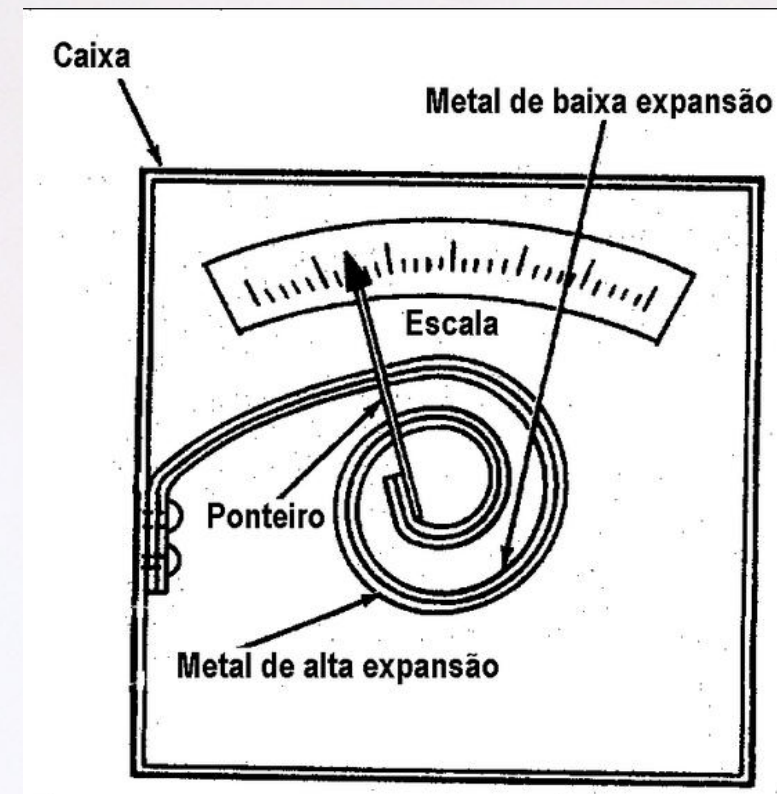
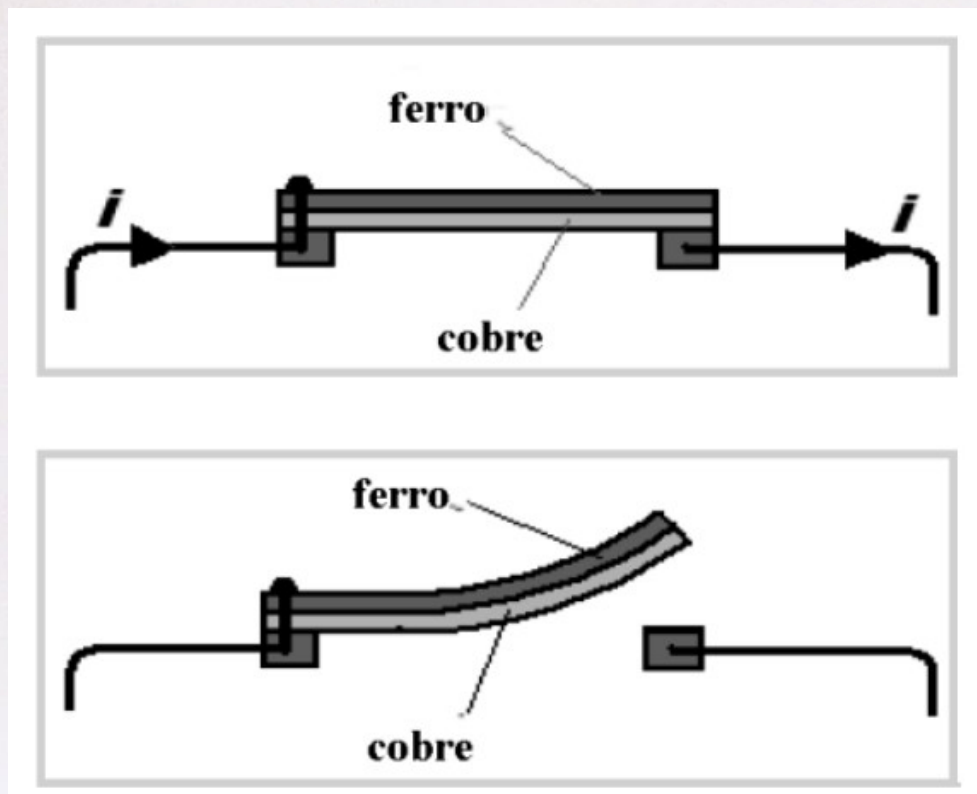
Substância	$\alpha$ ( $10^{-6}/\text{C}^\circ$ )	Substância	$\alpha$ ( $10^{-6}/\text{C}^\circ$ )
Gelo (a $0^\circ\text{C}$ )	51	Aço	11
Chumbo	29	Vidro (comum)	9
Alumínio	23	Vidro (Pyrex)	3,2
Latão	19	Diamante	1,2
Cobre	17	Invar <sup>b</sup>	0,7
Concreto	12	Quartzo fundido	0,5

<sup>a</sup>Valores à temperatura ambiente, exceto no caso do gelo.

<sup>b</sup>Esta liga foi projetada para ter um baixo coeficiente de dilatação. O nome é uma abreviação de “invariável”.

# Dilatação Térmica

Lâmina bimetálica:



[Figuras: <https://docente.ifrn.edu.br/edsonjose/disciplinas/termologia-aplicada-a-tecnologia-de-alimentos/>  
[http://fisicacom.blogspot.com/2008/06/04-ufmg\\_09.html](http://fisicacom.blogspot.com/2008/06/04-ufmg_09.html) ]



# Dilatação Térmica

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )



# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ °C}$$

# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$



# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$



# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\boxed{\Delta L = \alpha L_0 \Delta T}$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$

$$\Delta L = \underline{-0,33 \text{ m}}$$

# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$

$$\Delta L = \underline{-0,33 \text{ m}} \quad (-33 \text{ cm})$$



# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\boxed{\Delta L = \alpha L_0 \Delta T}$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$

$$\Delta L = \underline{-0,33 \text{ m}} \quad (-33 \text{ cm})$$

Um vão de 33 cm?

# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$

$$\Delta L = \underline{-0,33 \text{ m}} \quad (-33 \text{ cm})$$

Um vão de 33 cm?

Imagine se ao invés de cada barra com 1000 m utilizarmos 20 barras com 50 m?



# Dilatação Térmica

$$\Delta T_C = \Delta T_K$$

Exemplo: Imagine uma ponte de aço construída com barras de comprimento 1000 m. Qual a variação no comprimento da ponte quando a temperatura varia de 30 °C para 0 °C ?  
(Considere:  $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 0 - 30 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = -30 \text{ K}$$

$$\boxed{\Delta L = \alpha L_0 \Delta T}$$

$$\Delta L = (11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1000 \text{ m}) (-30 \text{ K})$$

$$\Delta L = \underline{-0,33 \text{ m}} \quad (-33 \text{ cm})$$

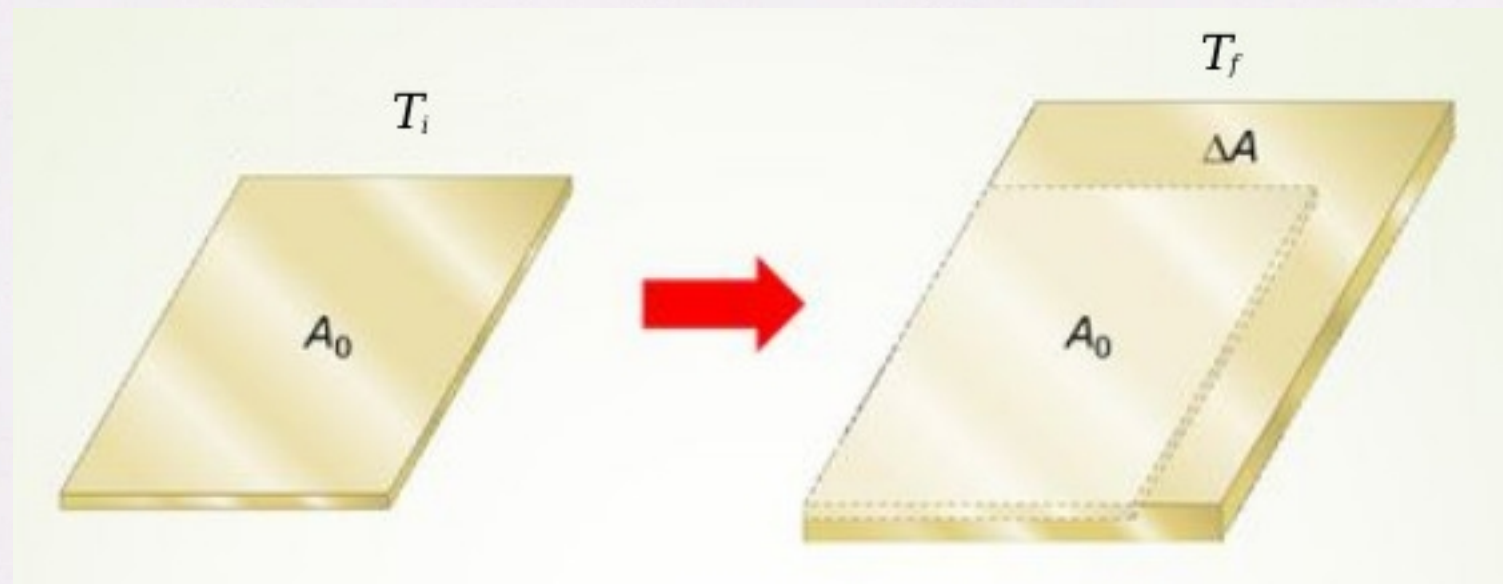
Um vão de 33 cm?

Imagine se ao invés de cada barra com 1000 m utilizarmos 20 barras com 50 m?

$$\text{Para cada barra: } \Delta L = -1,65 \text{ cm} \quad (1,65 \text{ cm} \times 20 = 33 \text{ cm})$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:



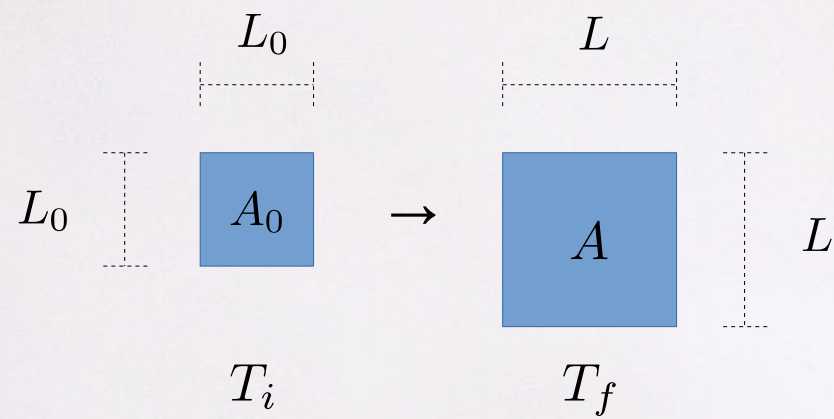
[Figura adaptada de: <https://slideplayer.com.br/slide/14506773/>]



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

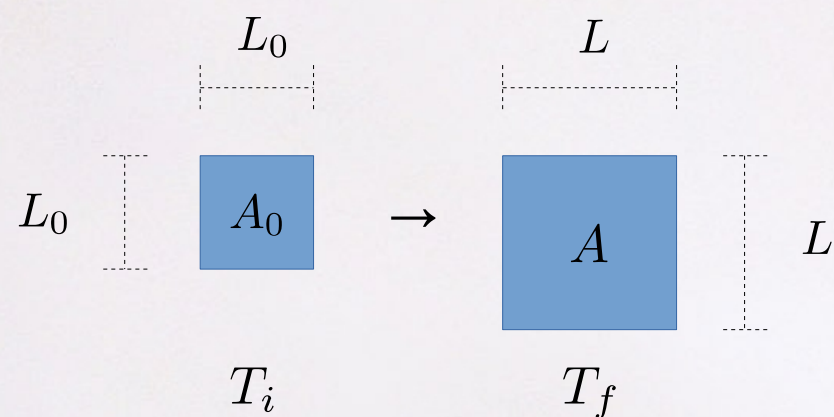
(lâmina delgada de material isotrópico)



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

;

$$\Delta A = A - A_0$$

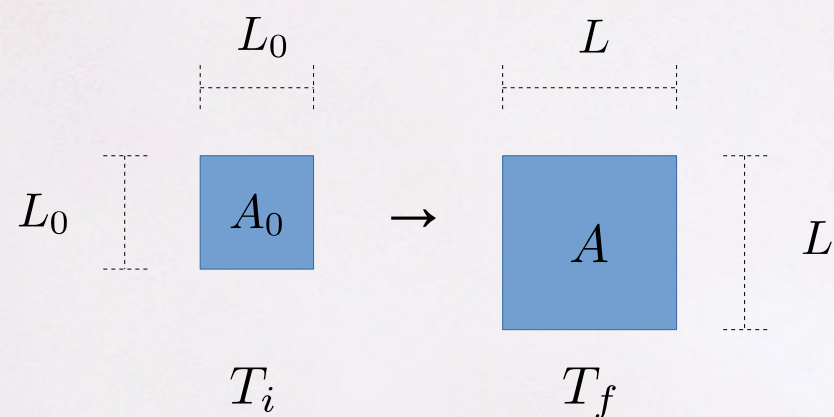
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A = L^2$$

$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

;

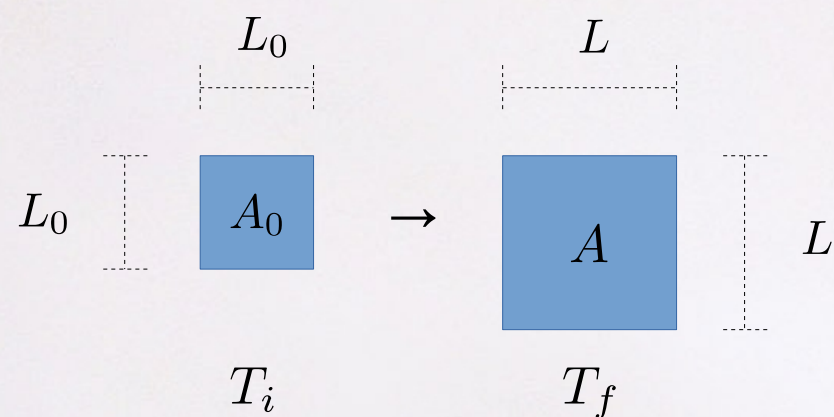
$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

;

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = L^2$$

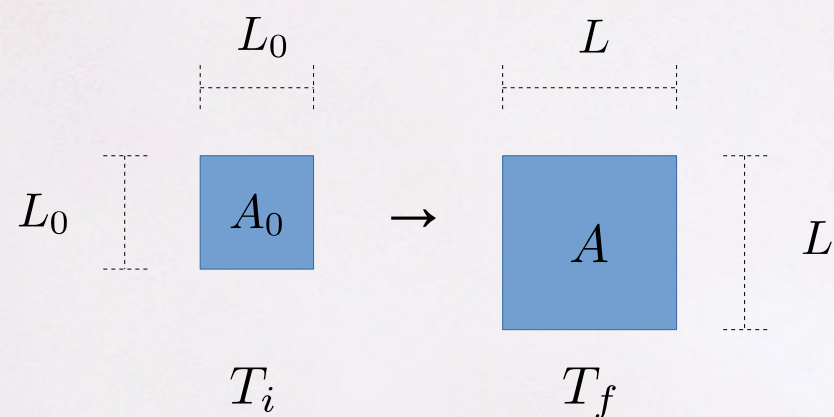
$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

;

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = L^2$$

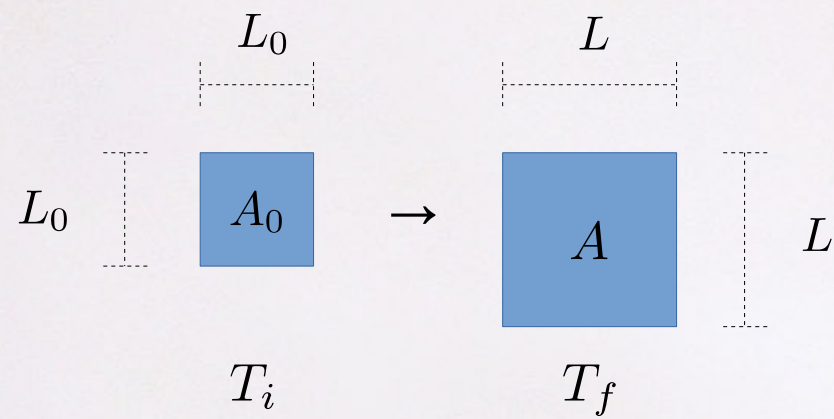
$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

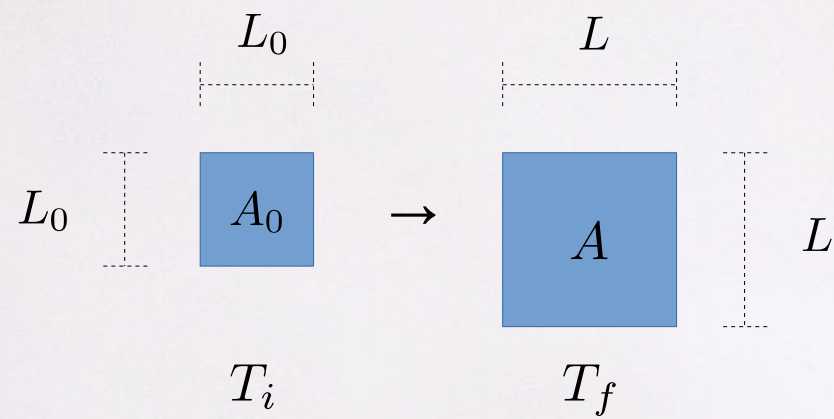
$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

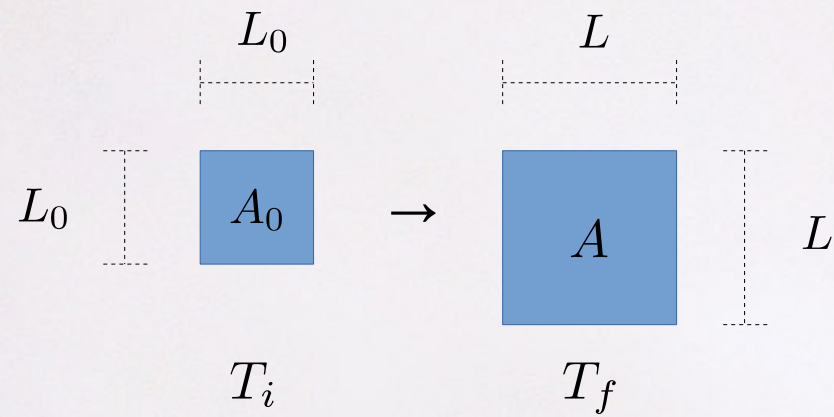
$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A - A_0 = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

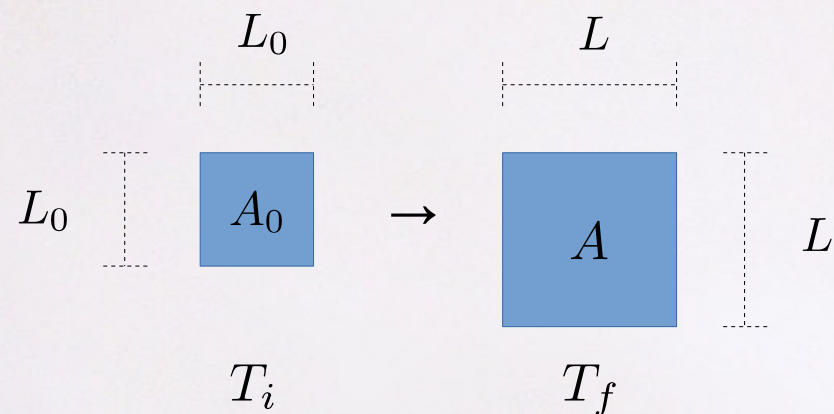
$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A - A_0 = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

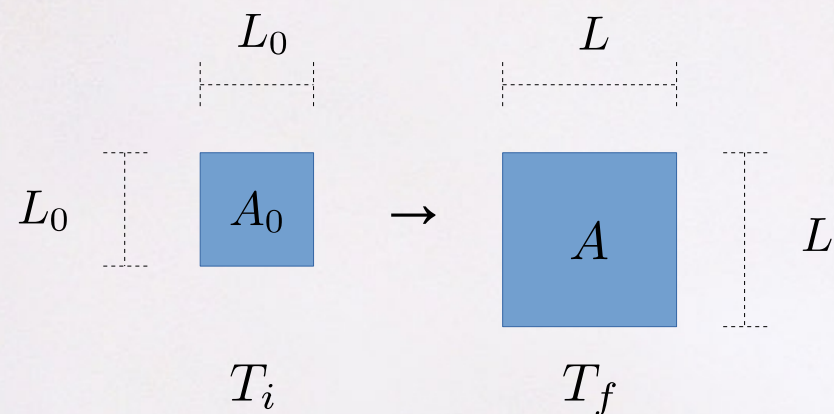
$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A - A_0 = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T + O(\alpha^2)$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

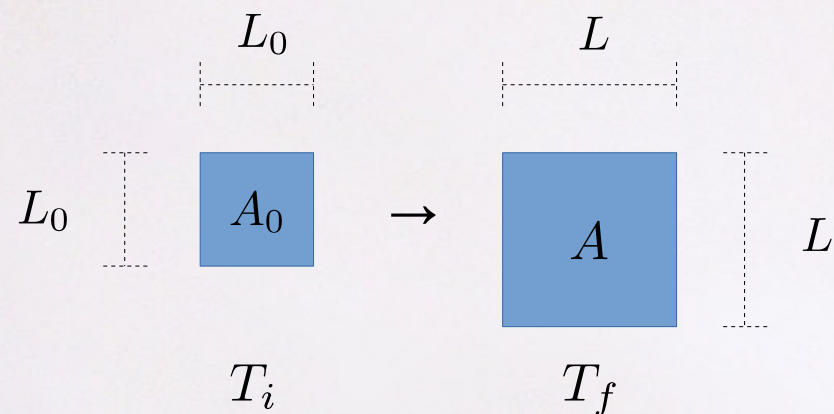
$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



$$A_0 = L_0^2$$

$$A = L^2$$

$$\Delta A = A - A_0$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$A - A_0 = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T + \alpha^2 A_0 \Delta T^2$$

$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T + O(\alpha^2)$$

$$\Delta A \approx 2\alpha A_0 \Delta T \quad \text{pois } \alpha \ll 1$$

$$A = L^2$$

$$A = (L_0 + \Delta L)^2$$

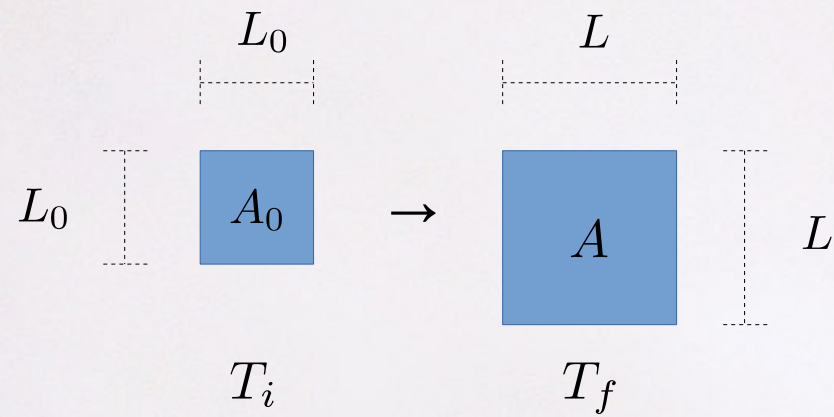
$$A = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^2$$

$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 \Delta T^2$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



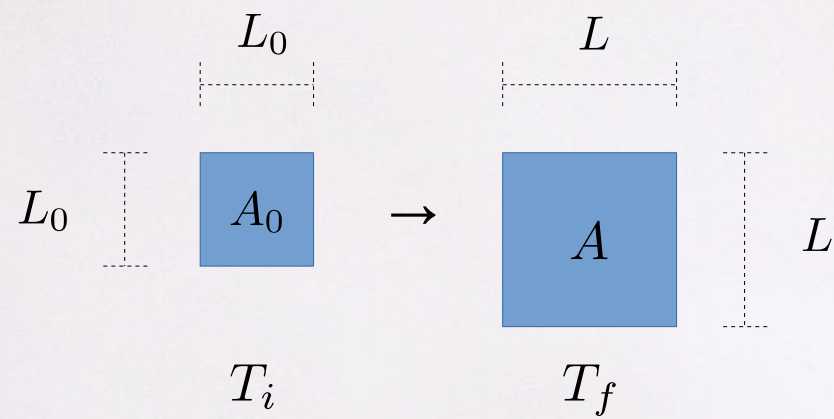
$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T$$



# Dilatação Térmica

→ Dilatação superficial:

(lâmina delgada de material isotrópico)



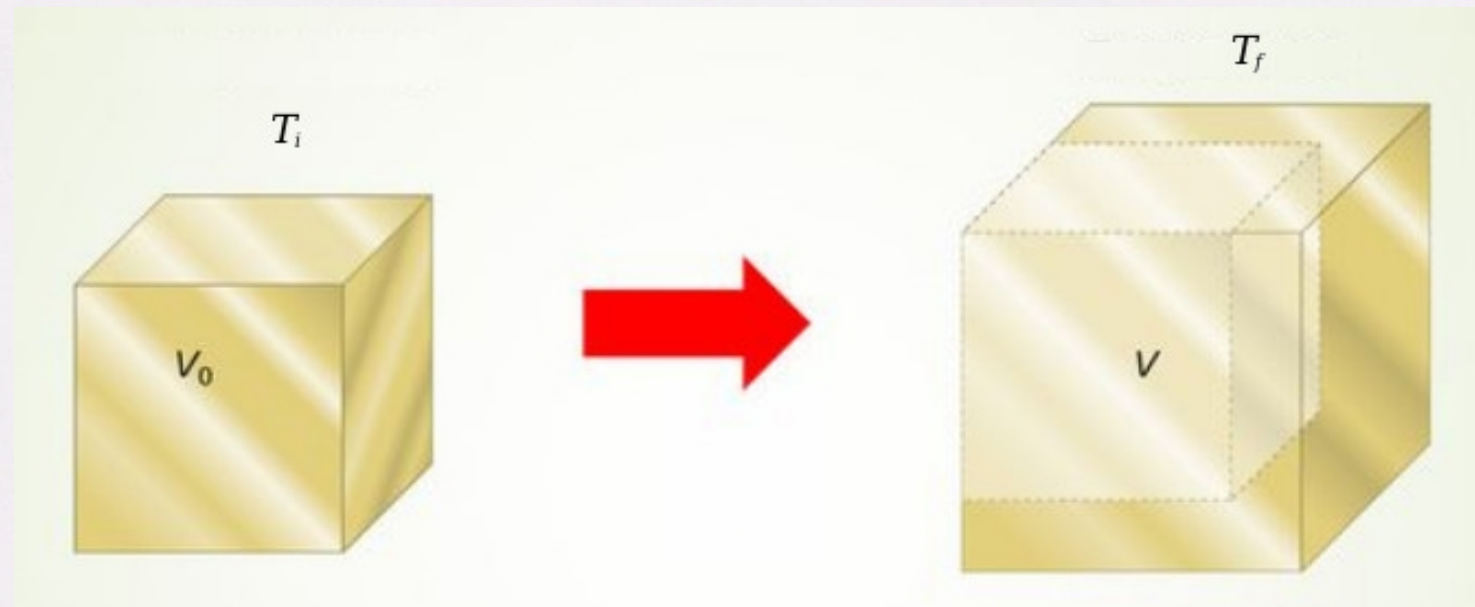
$$\Delta A = 2\alpha A_0 \Delta T$$

$$\Delta A = \gamma A_0 \Delta T$$

$$\gamma = 2\alpha$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:

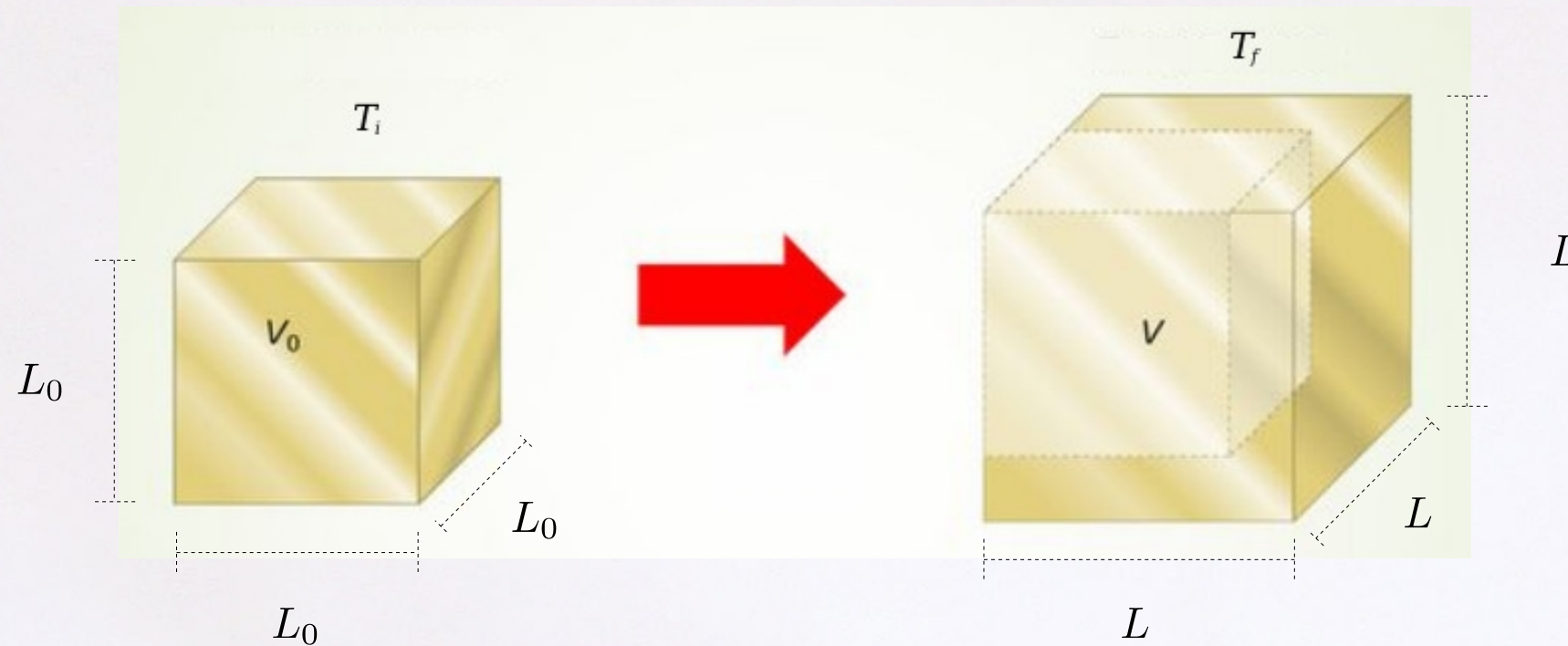


[Figura adaptada de: <https://slideplayer.com.br/slide/14506773/>]



# Dilatação Térmica

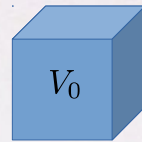
→ Dilatação volumétrica:



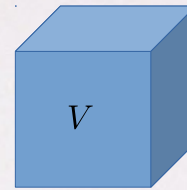
[Figura adaptada de: <https://slideplayer.com.br/slide/14506773/>]

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

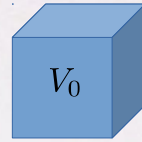
$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

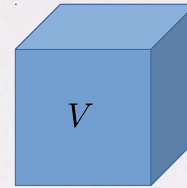


# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

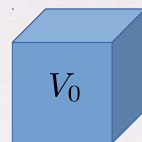
$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

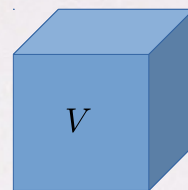
$$V = L^3$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

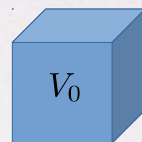
$$V = L^3$$

$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

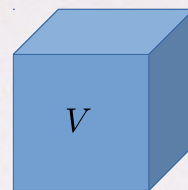


# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

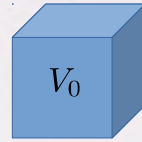
$$V = L^3$$

$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

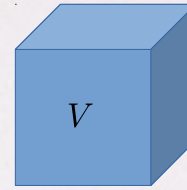
$$V = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^3$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$V = L^3$$

$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

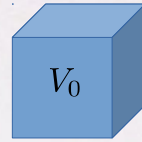
$$V = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^3$$

$$V = L_0^3 + 3\alpha L_0^3 \Delta T + 3\alpha^2 L_0^3 \Delta T^2 + \alpha^3 L_0^3 \Delta T^3$$

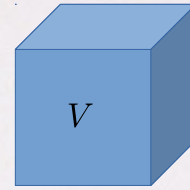


# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + 3\alpha^2 V_0 \Delta T^2 + \alpha^3 V_0 \Delta T^3$$

$$V = L^3$$

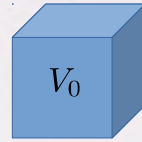
$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

$$V = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^3$$

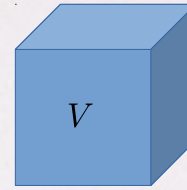
$$V = L_0^3 + 3\alpha L_0^3 \Delta T + 3\alpha^2 L_0^3 \Delta T^2 + \alpha^3 L_0^3 \Delta T^3$$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + 3\alpha^2 V_0 \Delta T^2 + \alpha^3 V_0 \Delta T^3$$

$$V = L^3$$

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + O(\alpha^2)$$

$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

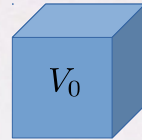
$$V = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^3$$

$$V = L_0^3 + 3\alpha L_0^3 \Delta T + 3\alpha^2 L_0^3 \Delta T^2 + \alpha^3 L_0^3 \Delta T^3$$

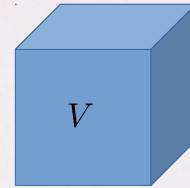


# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:



$T_i$



$T_f$

(cubo de material isotrópico)

$$V_0 = L_0^3$$

$$\Delta V = V - V_0$$

$$V = L^3$$

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + 3\alpha^2 V_0 \Delta T^2 + \alpha^3 V_0 \Delta T^3$$

$$V = L^3$$

$$V = V_0 + 3\alpha V_0 \Delta T + O(\alpha^2)$$

$$V = (L_0 + \Delta L)^3$$

$$V - V_0 \approx 3\alpha V_0 \Delta T$$

$$V = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)^3$$

$$\Delta V \approx 3\alpha V_0 \Delta T$$

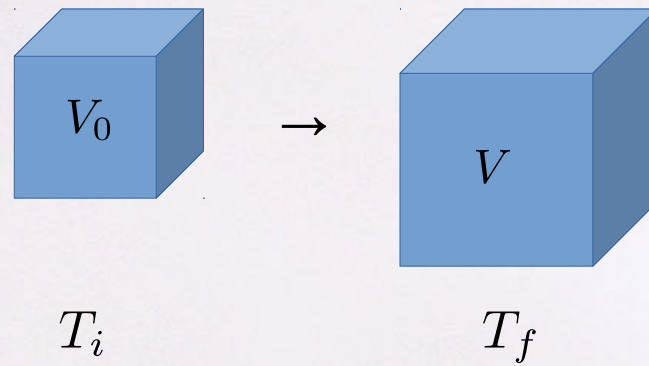
$$V = L_0^3 + 3\alpha L_0^3 \Delta T + 3\alpha^2 L_0^3 \Delta T^2 + \alpha^3 L_0^3 \Delta T^3$$

pois  $\alpha \ll 1$

# Dilatação Térmica

→ Dilatação volumétrica:

(cubo de material isotrópico)



$$\Delta V = 3\alpha V_0 \Delta T$$

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$\beta = 3\alpha$$



# Dilatação Térmica

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

# Dilatação Térmica

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$



# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

- vidro:



# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$



# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \underline{0,54 \text{ mL}}$$

# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \underline{0,54 \text{ mL}}$$

- álcool:



# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \underline{0,54 \text{ mL}}$$

- álcool:

$$\Delta V_{\text{álcool}} = \beta_{\text{álcool}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = (1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \underline{0,54 \text{ mL}}$$

- álcool:

$$\Delta V_{\text{álcool}} = \beta_{\text{álcool}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = (1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = \underline{22,0 \text{ mL}}$$



# Dilatação Térmica

$$\beta = 3\alpha$$

Exemplo: Um recipiente de vidro de 1 litro está cheio de álcool até a boca em temperatura de 10 °C. Se a temperatura for aumentada para 30 °C, qual a quantidade de álcool que transbordará do recipiente? (Dados:  $\alpha_{\text{vidro}} = 9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  e  $\beta_{\text{álcool}} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

$$\Delta T = 30 - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 20 \text{ K}$$

$$V_0 = 1 \text{ L}$$

- vidro:

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \beta_{\text{vidro}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = (3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = 540 \cdot 10^{-6} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{vidro}} = \underline{0,54 \text{ mL}}$$

- álcool:

$$\Delta V_{\text{álcool}} = \beta_{\text{álcool}} V_0 \Delta T$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = (1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}) (1 \text{ L}) (20 \text{ K})$$

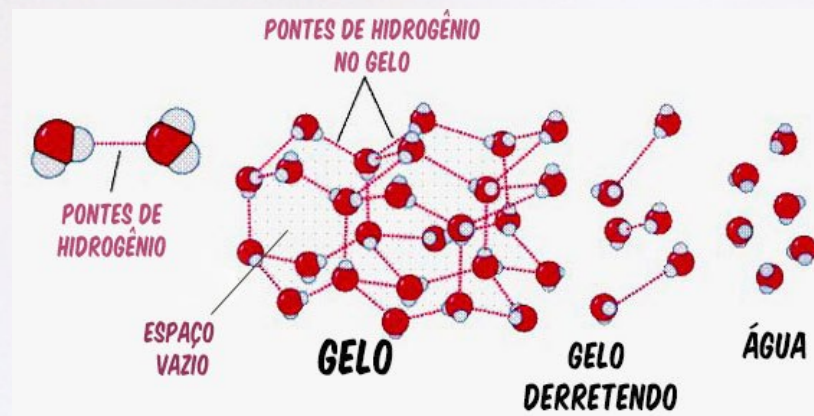
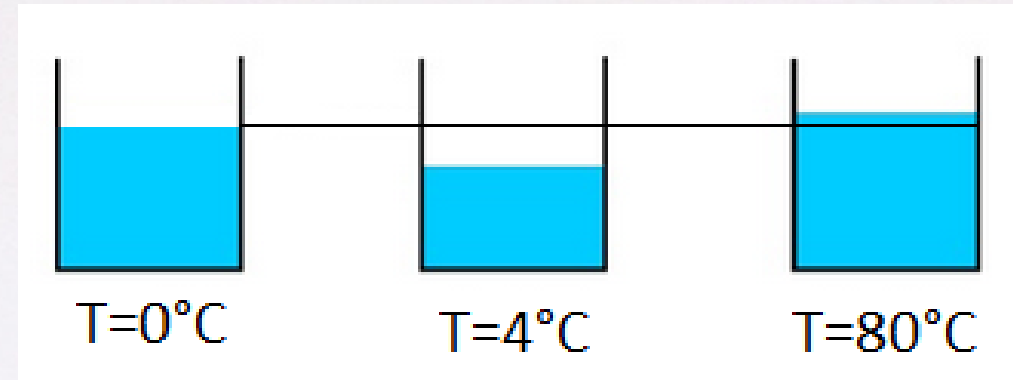
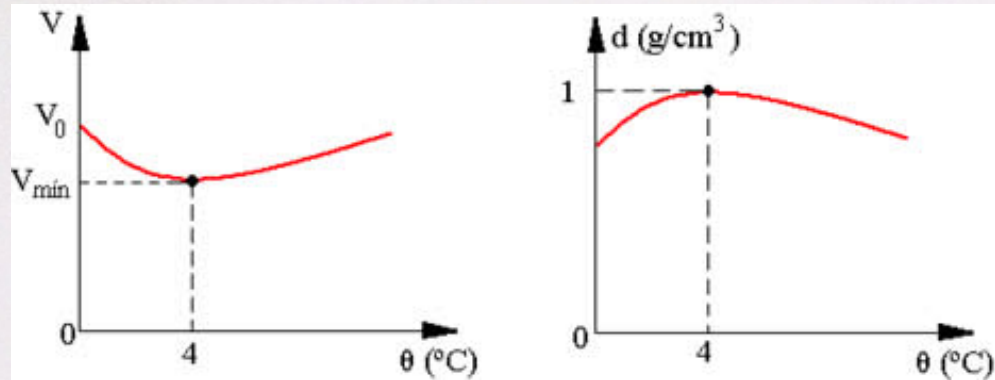
$$\Delta V_{\text{álcool}} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ L}$$

$$\Delta V_{\text{álcool}} = \underline{22,0 \text{ mL}}$$

$$V_{\text{transborda}} = 22 - 0,54 = 21,46 \text{ mL}$$

# Dilatação Térmica

Comportamento anômalo da água



[Figura: <http://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/leis-de-conservacao/a-agua-e-seu-comportamento-anomalo/>]



# Dilatação Térmica

Alguns materiais como o plástico e a borracha se contraem quando são aquecidos.

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

Flogístico / Calórico, abreido para Calor

- Georg Ernst Stahl: flogisto ou flogístico (séc. XVII)
- Antoine Lavoisier: um fluido indestrutível e que preenche os poros dos corpos e escoa do corpo mais quente para o mais frio (séc. XVIII)
- Francis Bacon: consiste no movimento (vibração) das partículas dos corpos (séc. XVIII)  
Robert Hooke  
(outros)

Benjamin Thomson (conde de Rumford), Julius Robert Mayer Herman Helmholtz, James Joule, William Thomson

**(A conexão entre calor e energia foi estabelecida no séc. XIX)**

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

Calor: energia em trânsito – fluxo de energia térmica

Um objeto não possui calor, ele está a uma certa temperatura. Dois objetos podem estar em temperaturas diferentes, não dizemos que possuem quantidades diferentes de calor. Calor é a energia em trânsito de um corpo para outro.

Mecanismos:

- condução
- convecção
- radiação



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

Calor: energia em trânsito – fluxo de energia térmica

Um objeto não possui calor, ele está a uma certa temperatura. Dois objetos podem estar em temperaturas diferentes, não dizemos que possuem quantidades diferentes de calor. Calor é a energia em trânsito de um corpo para outro.

Mecanismos:

- condução
- convecção
- radiação



[Figura: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html>]

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

- **condução:** ocorre através de interações entre átomos e moléculas de um corpo, por meio de vibração das partículas e também colisão (parte da energia cinética é transferida).  
No caso de um metal também há elétrons livres; Em um gás há colisões entre as partículas.  
Ocorre entre substâncias ou objetos em contato físico – **transferência de energia entre partículas**  
Dá-se através de um meio material sem que o mesmo se movimente.



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

- **condução:** ocorre através de interações entre átomos e moléculas de um corpo, por meio de vibração das partículas e também colisão (parte da energia cinética é transferida).  
No caso de um metal também há elétrons livres; Em um gás há colisões entre as partículas.  
Ocorre entre substâncias ou objetos em contato físico – **transferência de energia entre partículas**  
Dá-se através de um meio material sem que o mesmo se movimente.
- **convecção:** ocorre através do transporte de matéria entre regiões de um fluido com diferença de temperatura.

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

- **condução:** ocorre através de interações entre átomos e moléculas de um corpo, por meio de vibração das partículas e também colisão (parte da energia cinética é transferida).  
No caso de um metal também há elétrons livres; Em um gás há colisões entre as partículas.  
Ocorre entre substâncias ou objetos em contato físico – **transferência de energia entre partículas**  
Dá-se através de um meio material sem que o mesmo se movimente.
- **convecção:** ocorre através do transporte de matéria entre regiões de um fluido com diferença de temperatura.
- **radiação:** propagação através de ondas eletromagnéticas que não necessitam de um meio material para se propagar.

(tanto a condução quanto a convecção necessitam de um meio material para ocorrer)



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Convecção**



[Figura: HUGH, Young. FREEDMAN, Roger, Física Universitária, SEARS-ZEMANSKY, vol 2, 12a Ed., Pearson, 2009]

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Convecção**

Vídeo



[Vídeo: [https://www.youtube.com/watch?v=dkZaiedR\\_ww](https://www.youtube.com/watch?v=dkZaiedR_ww)]

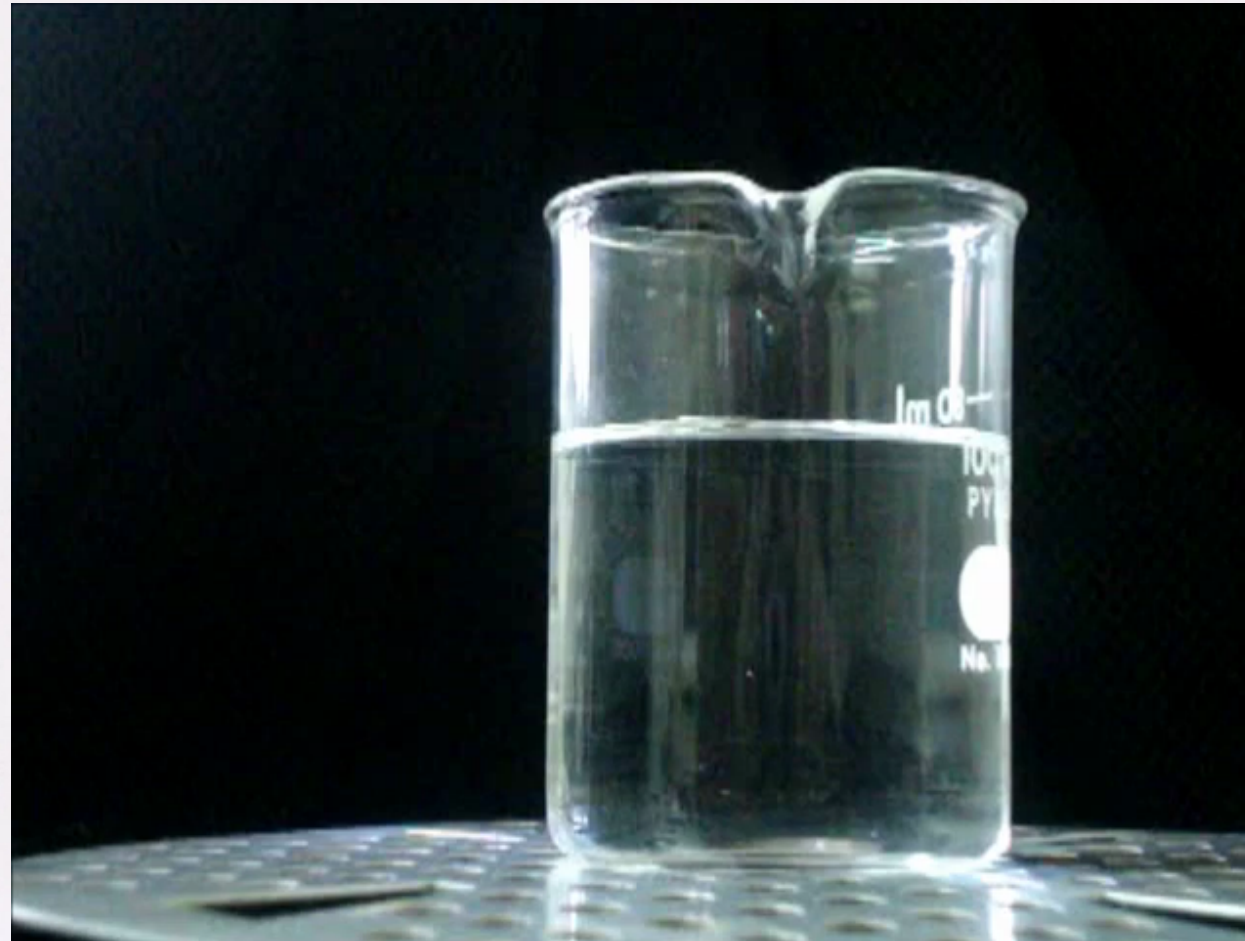


# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Convecção**

Vídeo

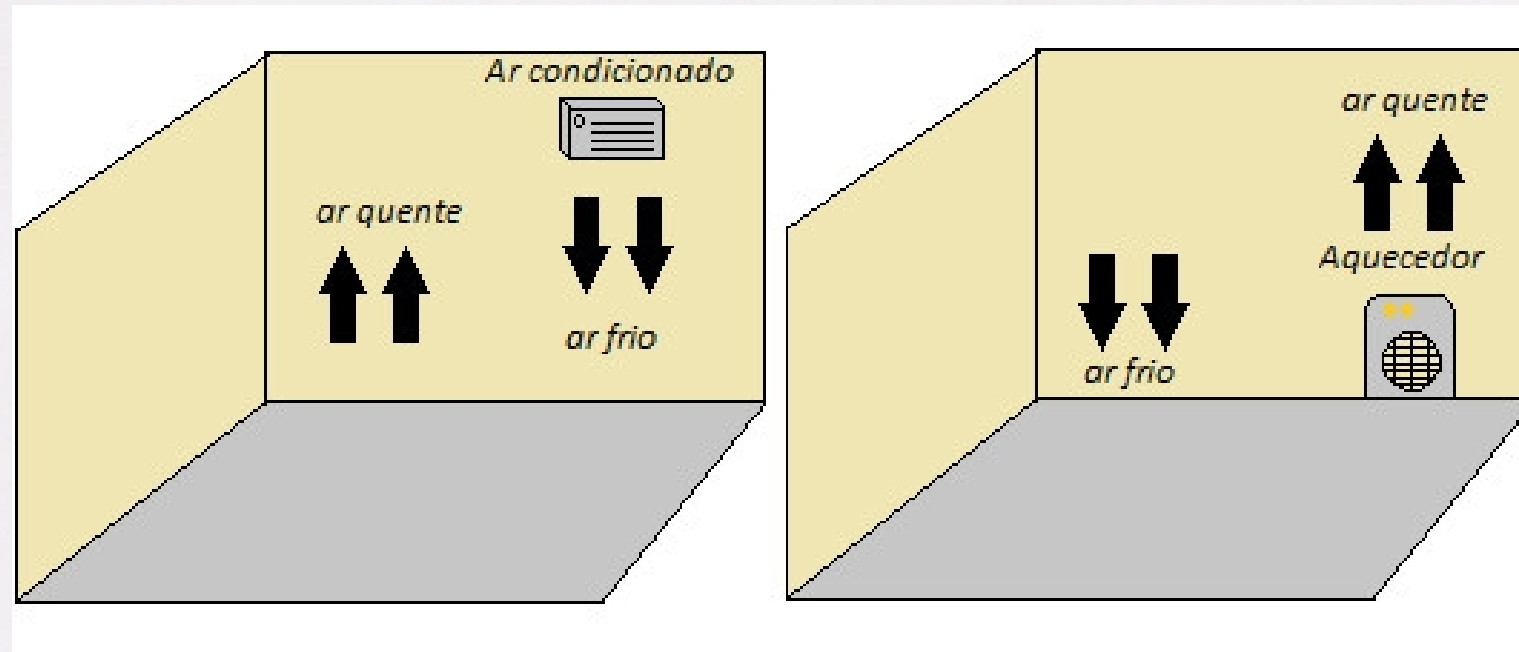


[Vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=jxQWTRgKi2Y>]

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Convecção**



[Figura: <https://www.infoescola.com/termodinamica/corrente-de-conveccao/>]



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ Radiação



[Figura: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hot\\_metalwork.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Hot_metalwork.jpg)]



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Radiação**



[Figura: HUGH, Young. FREEDMAN, Roger, Física Universitária, SEARS-ZEMANSKY, vol 2, 12a Ed., Pearson, 2009]



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Radiação**

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P} = \frac{dQ}{dt}$$

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Radiação

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P} = \frac{dQ}{dt}$$

depende de sua **área**  $A$  ; da natureza da superfície, descrita por uma quantidade chamada de **emissividade**  $e$  (um número entre 0 e 1) e da quarta potência da **temperatura**  $T$  :



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Radiação

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P} = \frac{dQ}{dt}$$

depende de sua **área**  $A$  ; da natureza da superfície, descrita por uma quantidade chamada de **emissividade**  $e$  (um número entre 0 e 1) e da quarta potência da **temperatura**  $T$  :

$$\mathcal{P}_{\text{rad}} = A e \sigma T^4$$

(Lei de Stefan-Boltzmann)

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Radiação

Taxa de emissão de radiação por um corpo:  $\mathcal{P} = \frac{dQ}{dt}$

depende de sua **área**  $A$  ; da natureza da superfície, descrita por uma quantidade chamada de **emissividade**  $e$  (um número entre 0 e 1) e da quarta potência da **temperatura**  $T$  :

$$\mathcal{P}_{\text{rad}} = A e \sigma T^4$$

(Lei de Stefan-Boltzmann)

onde  $\sigma$  é a cte de Stefan-Boltzmann,

$$\sigma = 5,670400(40) \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Radiação**

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P}_{\text{rad}} = A e \sigma T^4$$

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Radiação

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P}_{\text{rad}} = A e \sigma T^4$$

Taxa de absorção de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P}_{\text{abs}} = A e \sigma T_{\text{amb}}^4$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Radiação

Taxa de emissão de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P}_{\text{rad}} = A e \sigma T^4$$

Taxa de absorção de radiação por um corpo:

$$\mathcal{P}_{\text{abs}} = A e \sigma T_{\text{amb}}^4$$

A taxa líquida de troca de radiação térmica entre um corpo em temp.  $T$  num meio em temp.  $T_{\text{amb}}$  é:

$$\mathcal{P} = A e \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4)$$

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

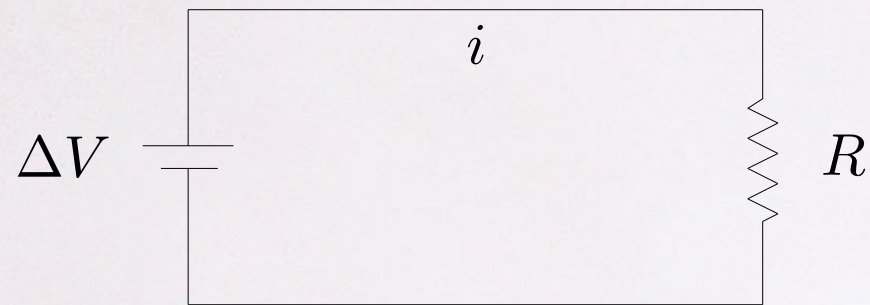
→ **Condução**



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**



$$\Delta V = i \cdot R$$

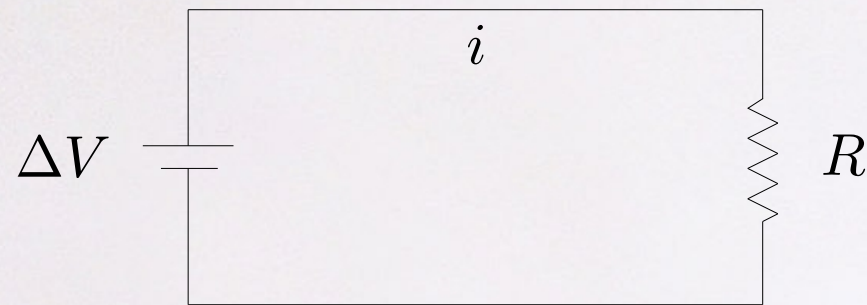
$$i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \Delta V \cdot G_e$$

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**



$$\Delta V = i \cdot R$$

$$i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \Delta V \cdot G_e$$



$$\Delta T = I \cdot R$$

$$I = \frac{\Delta T}{R}$$

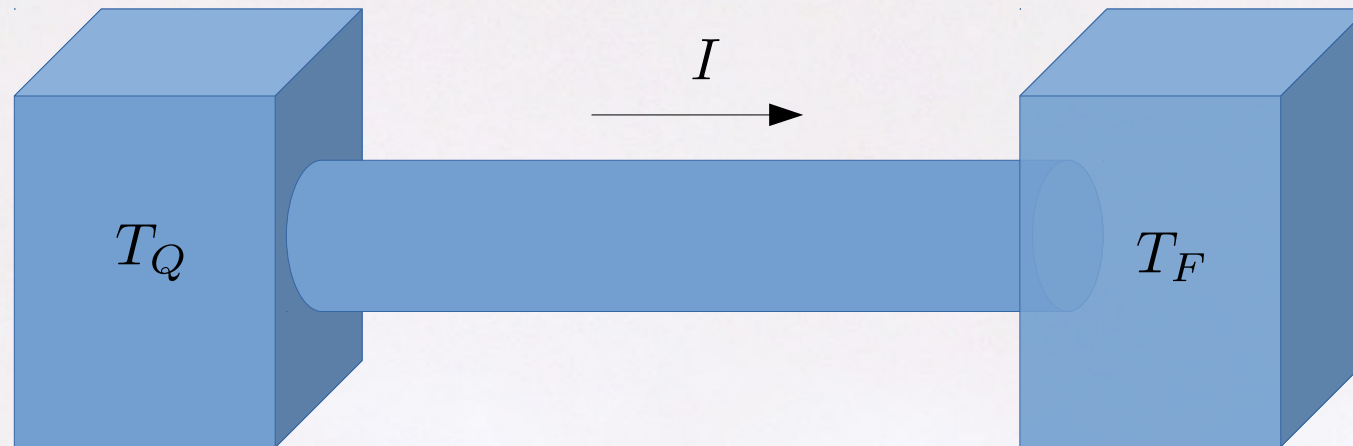
$$I = \Delta T \cdot G$$



# Mecanismos do Calor

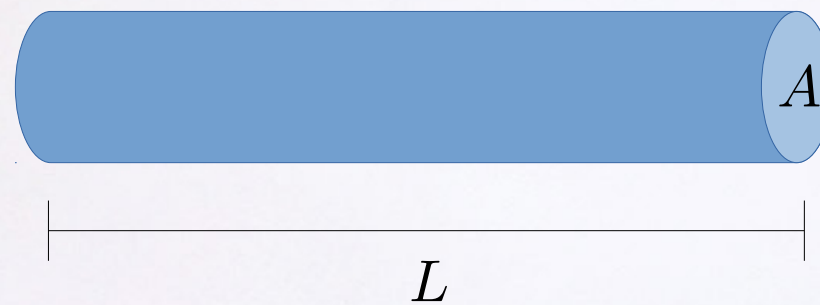
(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**



$$T_Q > T_F$$

$$\Delta T = T_Q - T_F$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

(elétrico)

$$i = \frac{\Delta V}{R}$$

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$G_e = \sigma_e \frac{A}{L}$$

(térmico)

$$I = \frac{\Delta T}{R}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \mathcal{P}_{\text{cond}}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$G = k \frac{A}{L}$$

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

Substância	$k$ (W/m·K)
<i>Metais</i>	
Aço inoxidável	14
Chumbo	35
Ferro	67
Latão	109
Alumínio	235
Cobre	401
Prata	428
<i>Gases</i>	
Ar (seco)	0,026
Hélio	0,15
Hidrogênio	0,18
<i>Materiais de Construção</i>	
Espuma de poliuretano	0,024
Lã de pedra	0,043
Fibra de vidro	0,048
Pinho	0,11
Vidro de janela	1,0

# Mecanismos do Calor

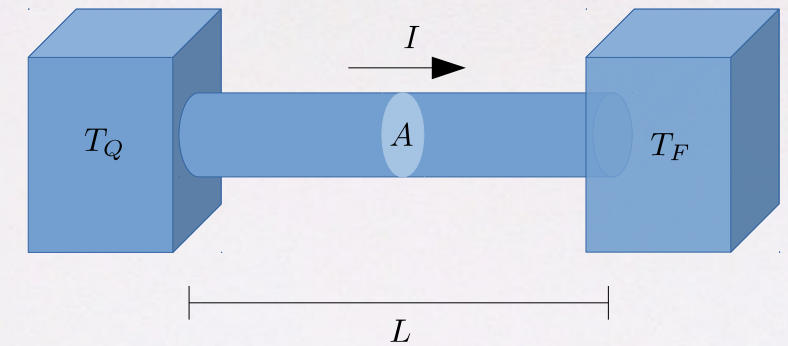
(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$

ou:

$$I = -k A \frac{dT}{dx}$$



→  $dx$

←  $\vec{\nabla}T$

$$I = k A \frac{\Delta T}{L} = k A \frac{(T_Q - T_F)}{L}$$

(Regime estacionário: temperatura ao longo da barra independe do tempo, o fluxo de energia térmica é o mesmo em qualquer posição da barra, não havendo acúmulo de energia térmica em nenhuma parte da mesma.)

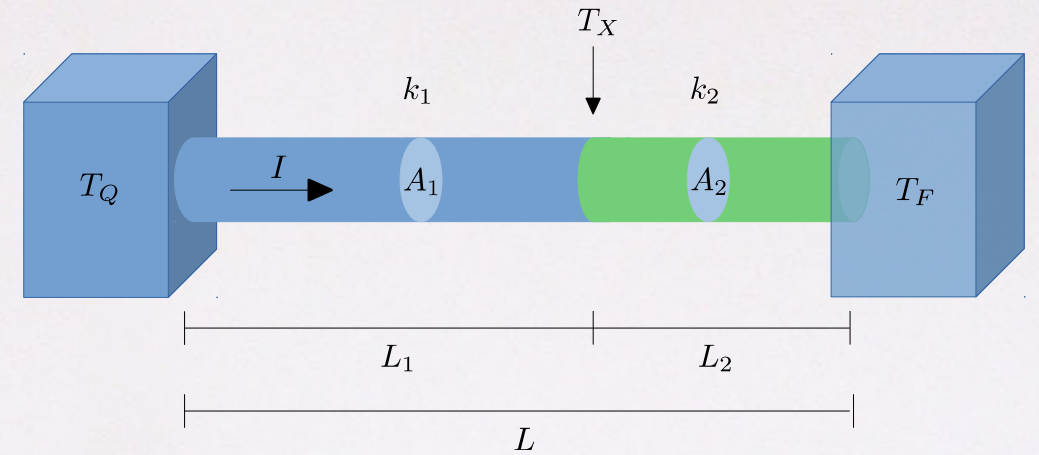


# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$



$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}} = I \cdot (R_1 + R_2)$$

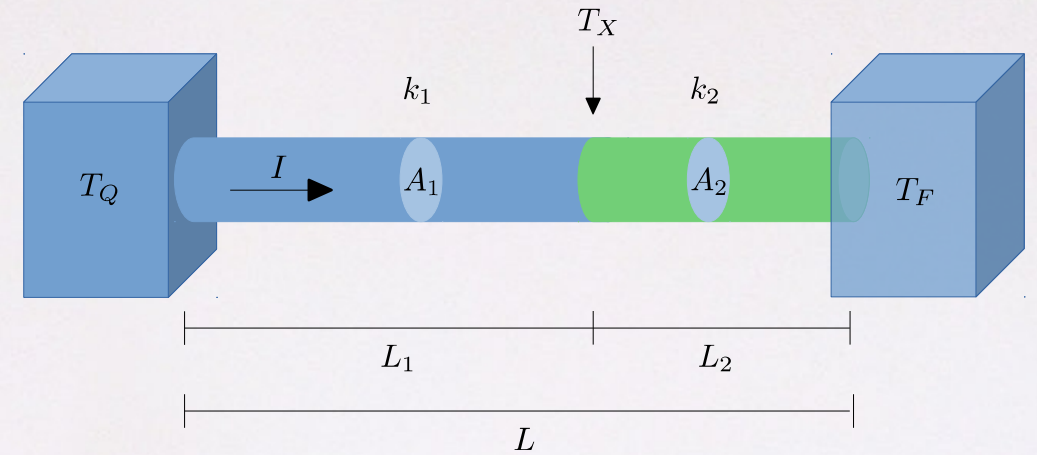
# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$

$$k_1 A_1 \frac{\Delta T_1}{L_1} = k_2 A_2 \frac{\Delta T_2}{L_2}$$



$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq} = I \cdot (R_1 + R_2)$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$

$$k_1 A_1 \frac{\Delta T_1}{L_1} = k_2 A_2 \frac{\Delta T_2}{L_2}$$

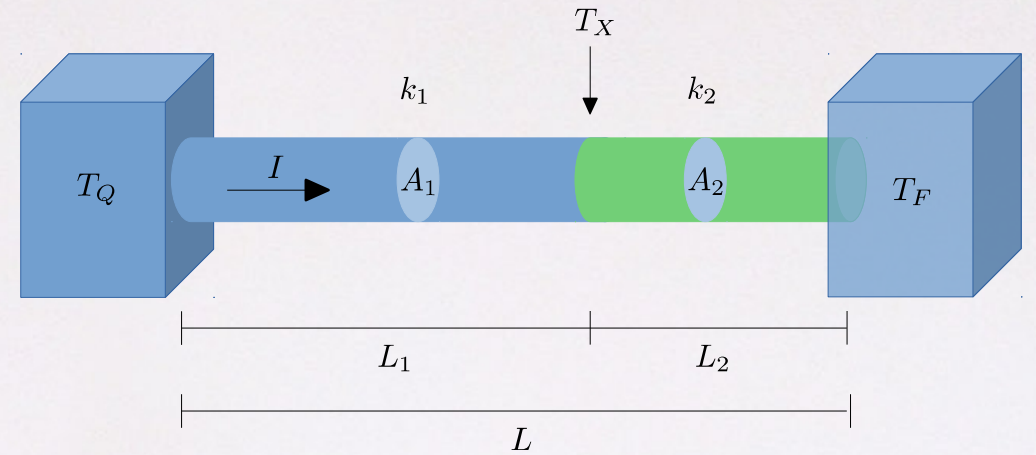
$$k_1 A_1 \frac{(T_Q - T_X)}{L_1} = k_2 A_2 \frac{(T_X - T_F)}{L_2}$$

$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq} = I \cdot (R_1 + R_2)$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

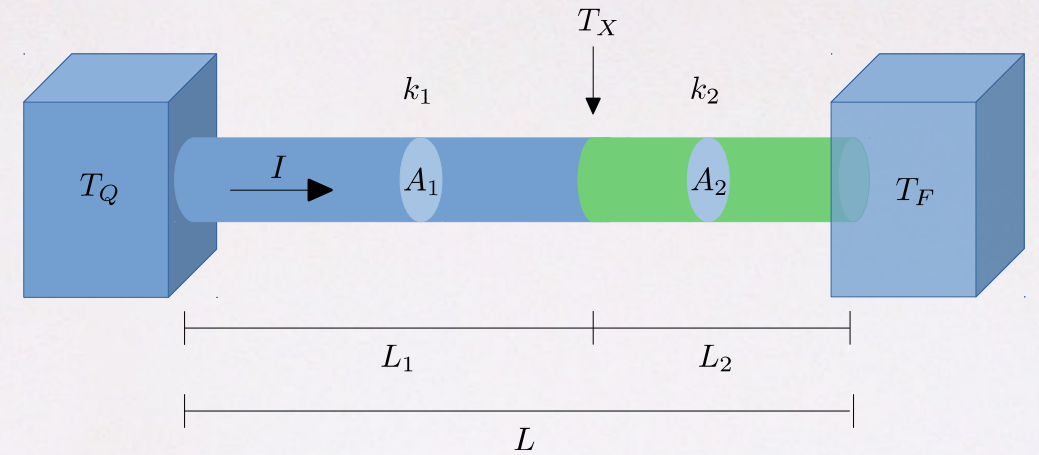
→ **Condução**

$$I = k A \frac{\Delta T}{L}$$

$$k_1 A_1 \frac{\Delta T_1}{L_1} = k_2 A_2 \frac{\Delta T_2}{L_2}$$

$$k_1 A_1 \frac{(T_Q - T_X)}{L_1} = k_2 A_2 \frac{(T_X - T_F)}{L_2}$$

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_Q + k_2 L_1 T_F}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$



$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq} = I \cdot (R_1 + R_2)$$

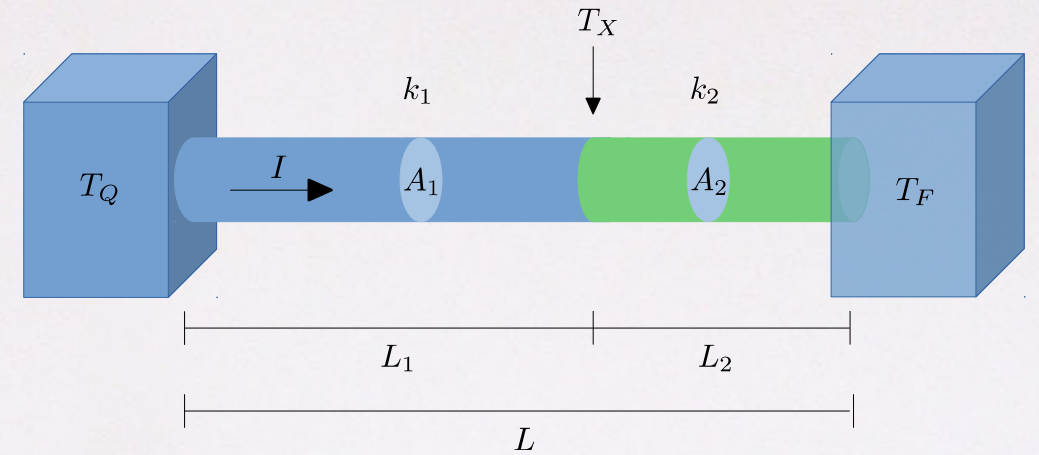


# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

→ **Condução**

$$I = \mathcal{P}_{\text{cond}} = \frac{(T_Q - T_F)}{\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2}}$$



$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}} = I \cdot (R_1 + R_2)$$

# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

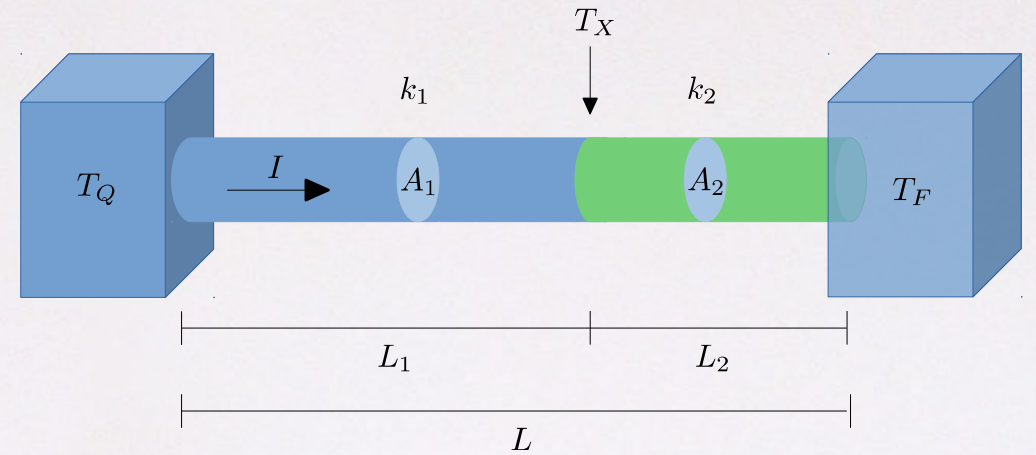
→ **Condução**

$$I = \mathcal{P}_{\text{cond}} = \frac{(T_Q - T_F)}{\frac{L_1}{k_1 A_1} + \frac{L_2}{k_2 A_2}}$$

$$I = \mathcal{P}_{\text{cond}} = \frac{(T_Q - T_F)}{R_1 + R_2}$$

$$I = \mathcal{P}_{\text{cond}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{eq}}}$$

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2$$



$$\Delta T_1 = I \cdot R_1$$

$$\Delta T_2 = I \cdot R_2$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}}$$

$$\Delta T = I \cdot R_{\text{eq}} = I \cdot (R_1 + R_2)$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

## → Condução

Perda de energia térmica em um ambiente através de diferentes materiais.

Equivalente a uma associação em paralelo de resistores.

$$\Delta T = I_1 \cdot R_1$$

$$\Delta T = I_2 \cdot R_2$$

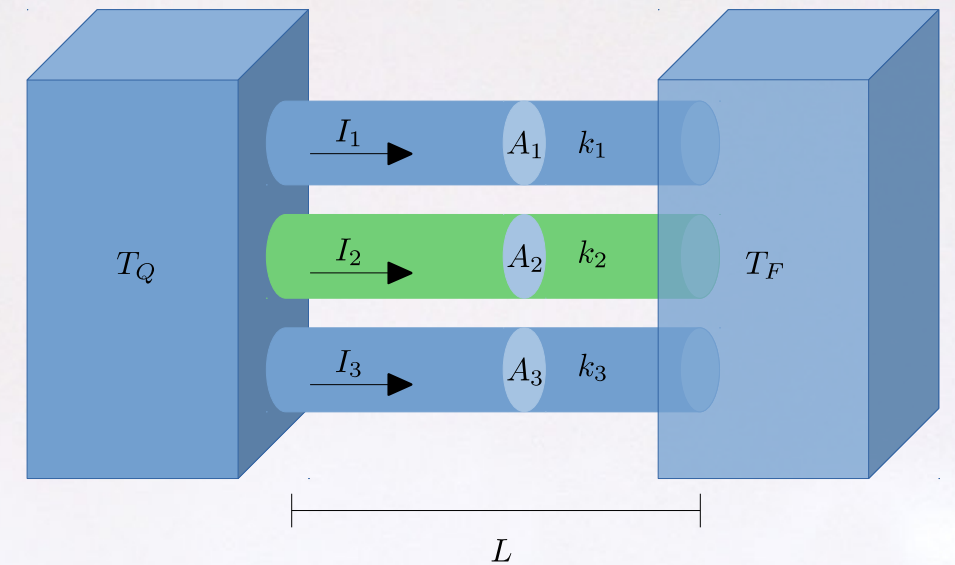
$$\Delta T = I_3 \cdot R_3$$

$$\Delta T = I \cdot R_{eq}$$

$$\Delta T = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot R_{eq}$$

$$\Delta T = \left( \frac{\Delta T}{R_1} + \frac{\Delta T}{R_2} + \frac{\Delta T}{R_3} \right) \cdot R_{eq}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$



# Mecanismos do Calor

(Mecanismos de transferência de energia térmica)

Aquecimento de ambientes – Calefação



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: [http://www.aquesol.com/produtos/0,5488\\_radiador-de-aluminio-para-calefacao](http://www.aquesol.com/produtos/0,5488_radiador-de-aluminio-para-calefacao)]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://casaeimoveis.uol.com.br/tire-suas-duvidas/arquitetura/como-escolher-o-sistema-de-aquecimento-de-ambiente-quais-sao-os-modelos-disponiveis.jhtm>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://www.ravennaheatingandcooling.com/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação

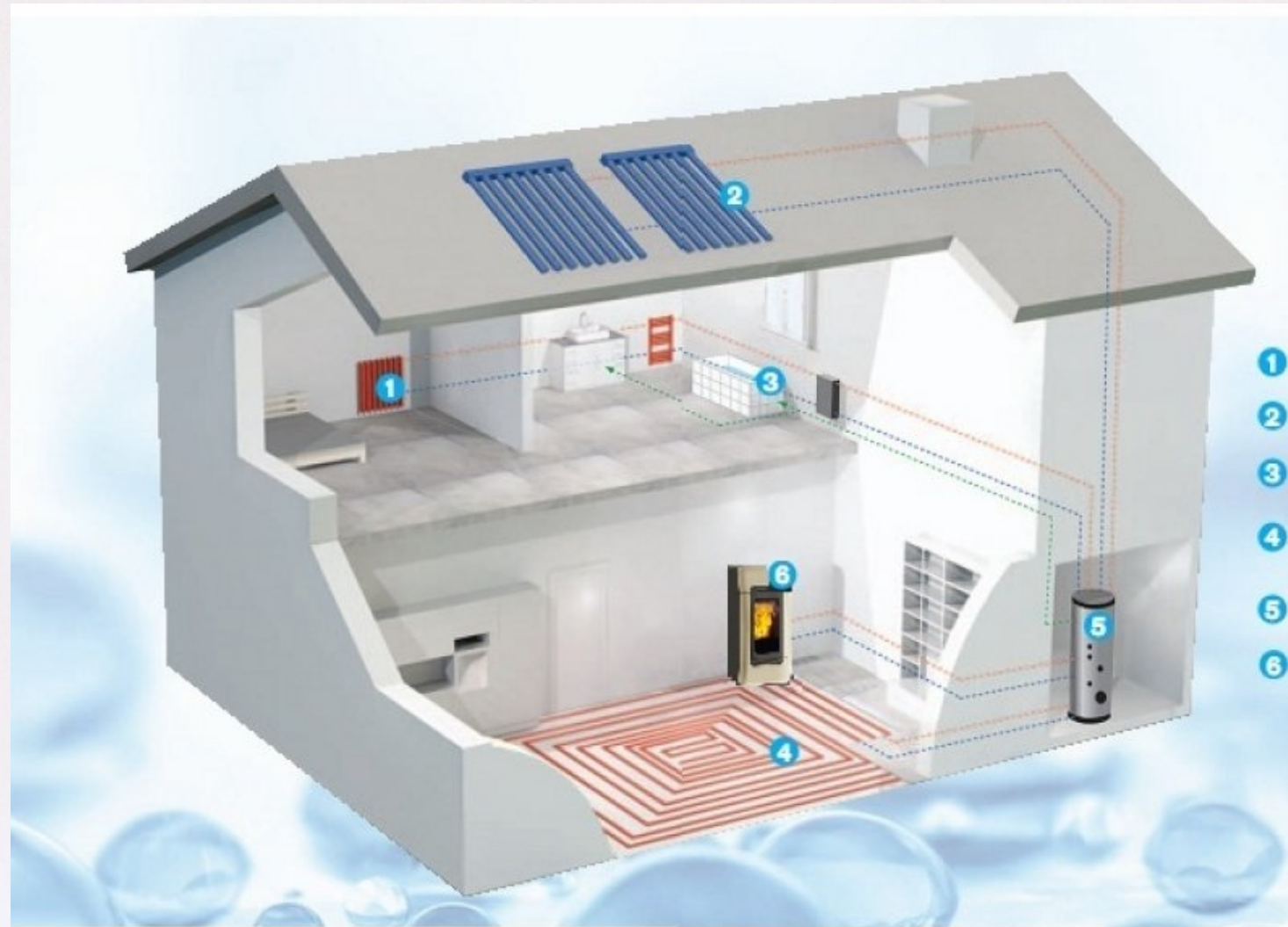


[Figura: <https://www.itrisa.com/ESTUFAS/PELLET/782-ESTUFA-PELLET-POINT2-8-KW-ACERO-CERAMICA-BLANCA-BURDEOS-GRIS>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: [https://www.reifenberg-shop.de/epages/62498555.sf/de\\_DE/?ObjectPath=/Shops/62498555/Categories/Prinzip\\_Wassergefuehrte\\_Pelleteofen\\_Edilkamin](https://www.reifenberg-shop.de/epages/62498555.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/62498555/Categories/Prinzip_Wassergefuehrte_Pelleteofen_Edilkamin)]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: [https://www.reifenberg-shop.de/epages/62498555.sf/de\\_DE/?ObjectPath=/Shops/62498555/Categories/Prinzip\\_Wassergefuehrte\\_Pelleteofen\\_Edilkamin](https://www.reifenberg-shop.de/epages/62498555.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/62498555/Categories/Prinzip_Wassergefuehrte_Pelleteofen_Edilkamin)]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://revista.zapimoveis.com.br/calefacao-do-piso-deixa-o-ambiente-quentinho-e-aconchegante/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação

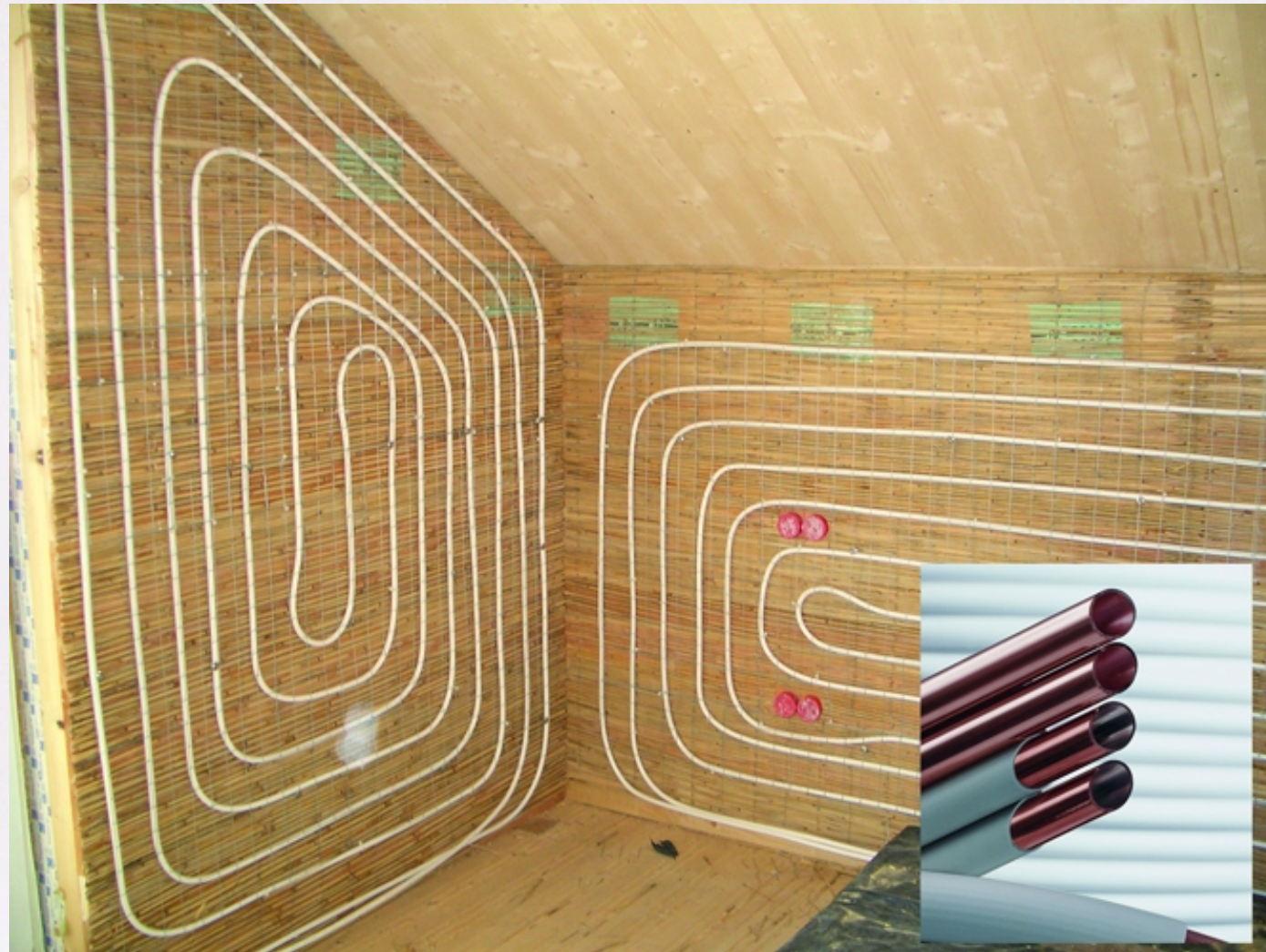


[Figura: <http://www.thermoaquecimento.com.br/site/obras/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://www.elle.fr/Deco/Pratique/Maison-ecologique/Les-10-bonnes-raisons-d-avoir-du-cuivre-chez-soi>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.tornoclimatizacao.com.br/calefacao.html>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.tornoclimatizacao.com.br/calefacao.html>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.energyaquecimento.com.br/servicos/calefacao/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.energyaquecimento.com.br/servicos/calefacao/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação

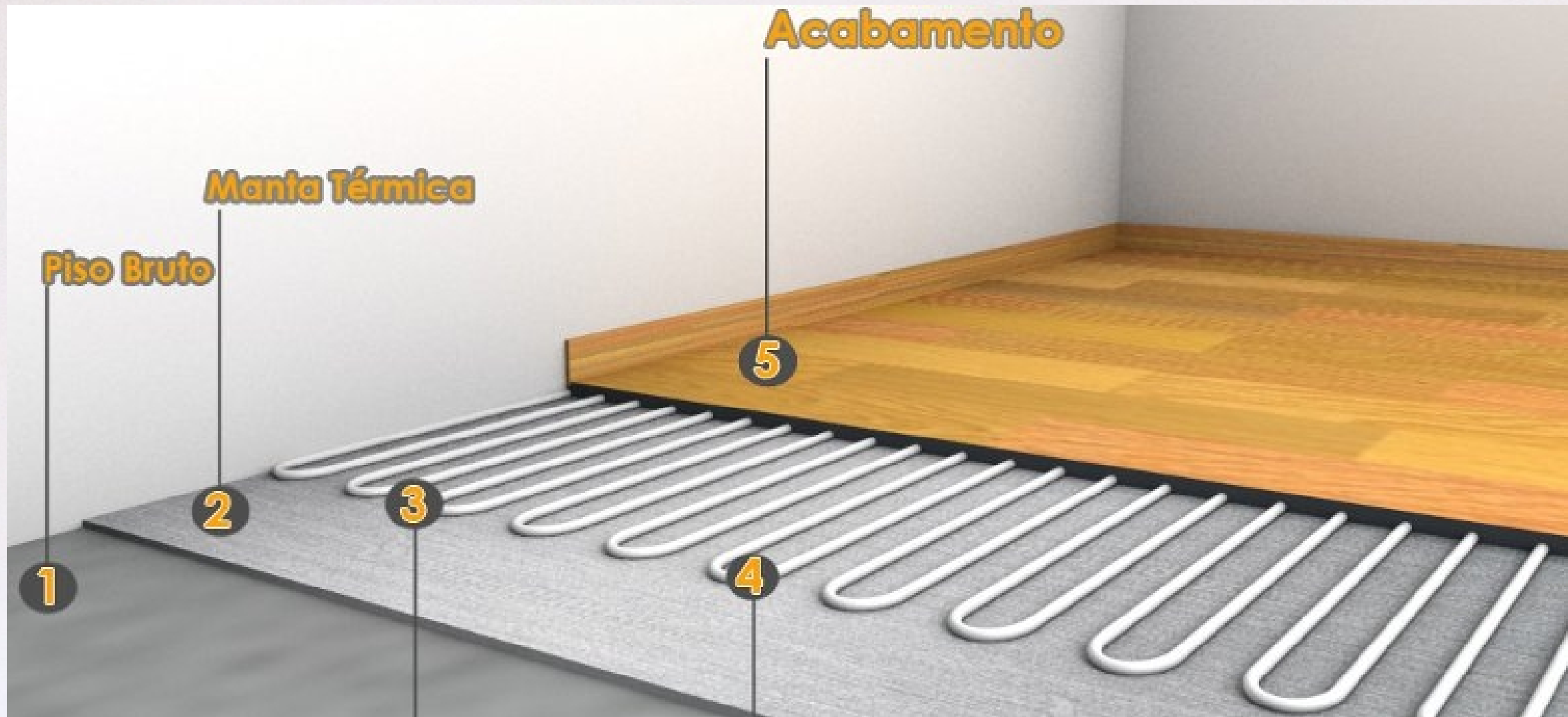


[Figura: <https://revista.zapimoveis.com.br/calefacao-do-piso-deixa-o-ambiente-quentinho-e-aconchegante/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://www.tornoclimatizacao.com.br/calefacao.html>]

# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação

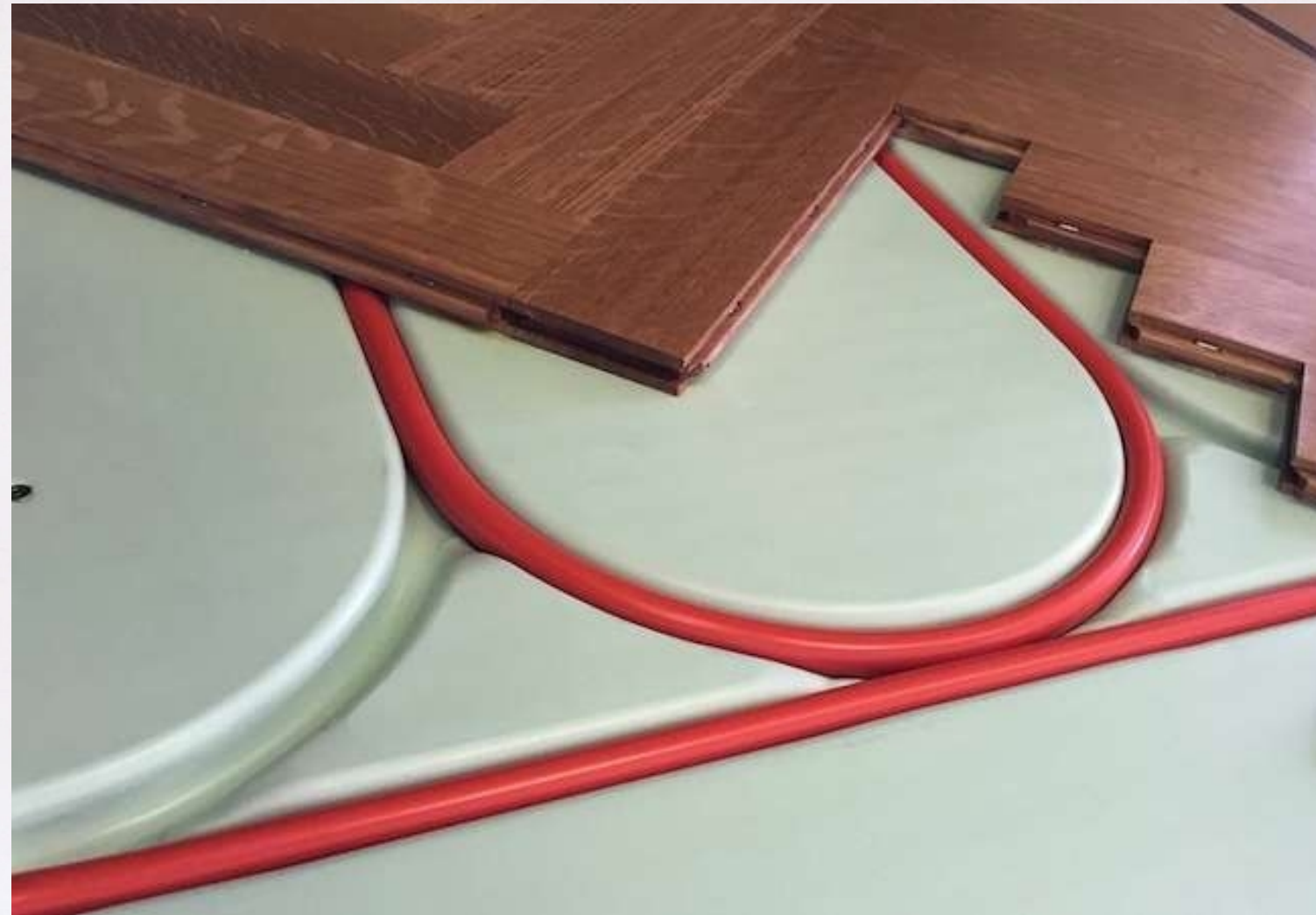


[Figura: <http://www.aquecedores-cia.com.br/calefacao>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://www.popularmechanics.com/home/interior-projects/how-to/a28699/how-to-install-in-floor-electric-heating/>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <http://nucleoexperience.com.br/lojas>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://victoriaplum.com/blog/posts/bathroom-radiators-buying-guide>]



# Mecanismos do Calor

Aquecimento de ambientes – Calefação



[Figura: <https://www.thisoldhouse.com/bathrooms>]



# Calor e Transições de fases

# Calor e Transições de fases

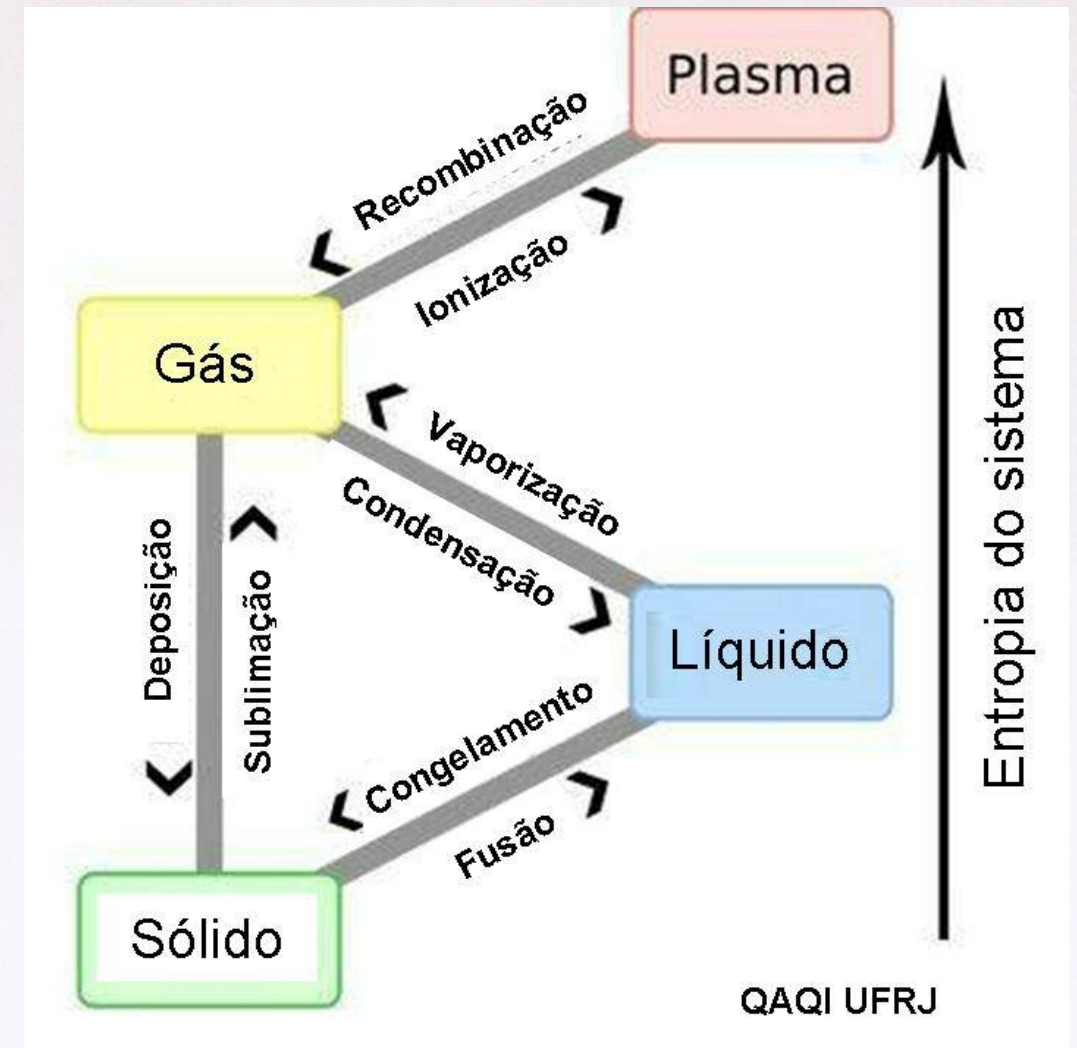
→ Fase: estado físico da matéria.



# Calor e Transições de fases

→ Fase: estado físico da matéria.

3 estados básicos: sólido, líquido e gás/vapor  
além de outros

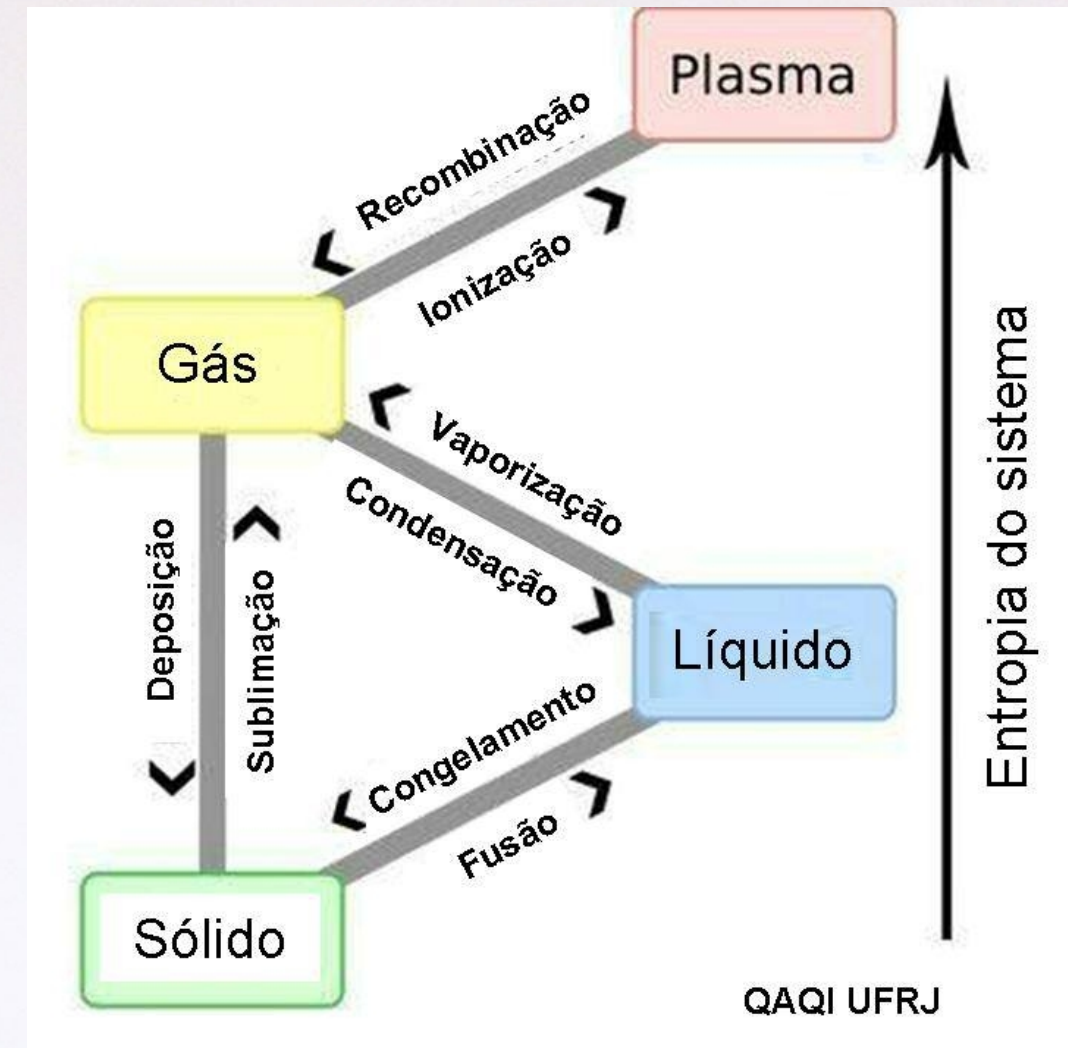


# Calor e Transições de fases

→ Fase: estado físico da matéria.

3 estados básicos: sólido, líquido e gás/vapor além de outros

- Em uma dada fase, a energia térmica recebida implica em aumento na temperatura da substância.  
(calor sensível)
- Em uma mudança de fases:  
a temperatura permanece cte.  
(calor latente)





# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$



# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

(Capacidade aqui não tem relação com armazenamento de calor, pois um corpo não contém calor)



# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

(Capacidade aqui não tem relação com armazenamento de calor, pois um corpo não contém calor)

→ Calor específico

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q \propto m$$

# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

(Capacidade aqui não tem relação com armazenamento de calor, pois um corpo não contém calor)

→ Calor específico

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q \propto m$$

$$Q = c m \Delta T$$

$c$  = calor específico



# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

(Capacidade aqui não tem relação com armazenamento de calor, pois um corpo não contém calor)

→ Calor específico

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q \propto m$$

$$Q = c m \Delta T$$

$c$  = calor específico

$$C = c \cdot m$$

# Calor e Transições de fases

Anteriormente verificamos o efeito da expansão térmica em função da variação da temperatura, sem contudo contabilizar a energia térmica transferida (calor)

- Substância em uma dada fase:

→ Capacidade térmica

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

$C$  = capacidade térmica

(Capacidade aqui não tem relação com armazenamento de calor, pois um corpo não contém calor)

→ Calor específico

$$Q \propto \Delta T$$

$$Q \propto m$$

$$Q = m c \Delta T$$

$c$  = calor específico

$$C = m \cdot c$$



# Calor e Transições de fases

→ Calor específico

$$Q = m c \Delta T$$

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad \frac{[\text{calor?}]}{[\text{massa}] [\text{temp.}]}$$

Ao longo do séc. XIX foi adotada a unidade 'caloria' para especificar a quantidade de energia térmica transferida em um dado processo. Várias definições da caloria foram adotadas ao longo do tempo, uma muito comum é a seguinte:

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 g de **água** de 14,5 °C para 15,5°C  $\equiv$  1 cal  
(em 1 atm)

$$c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal}$$

# Calor e Transições de fases

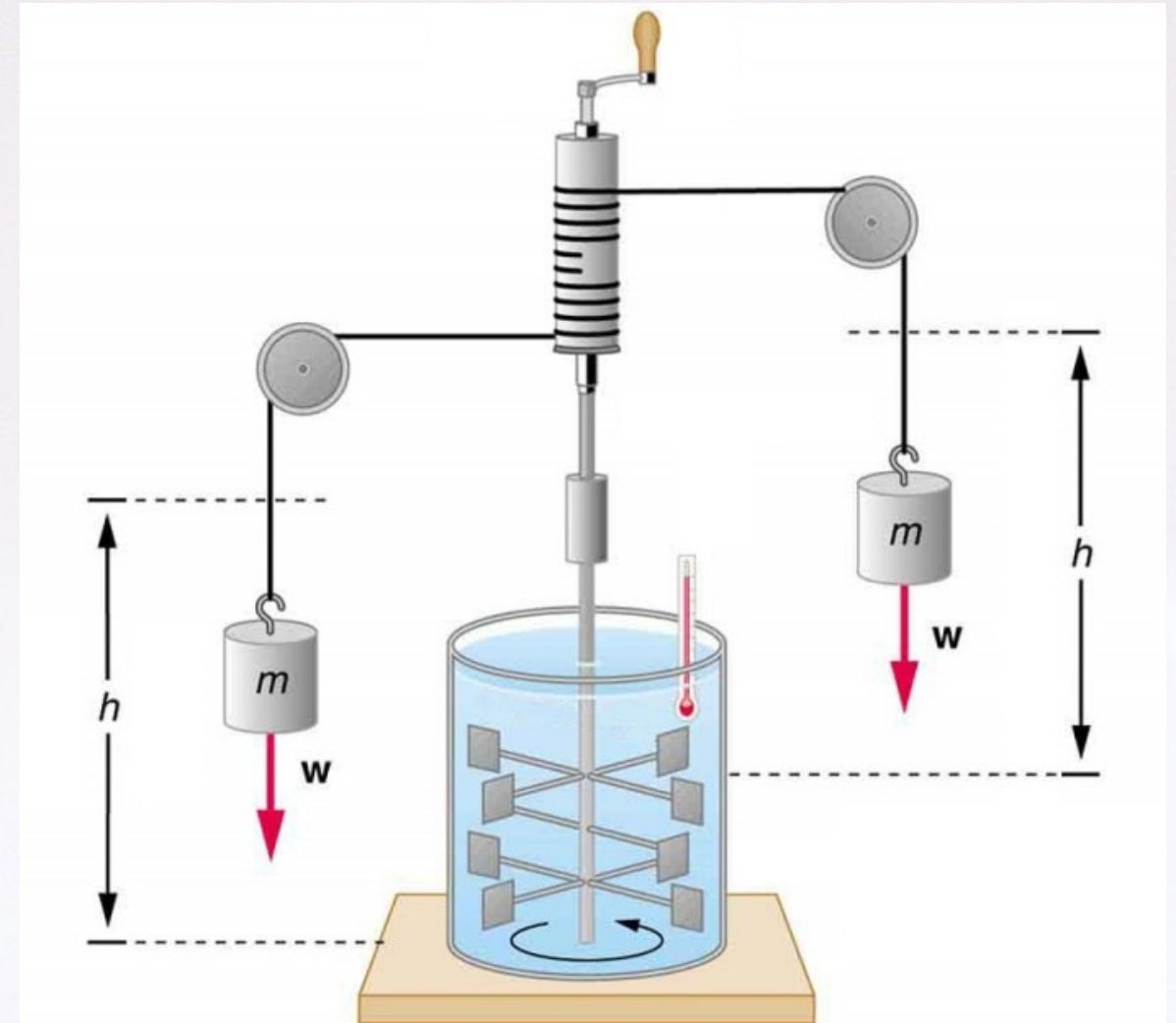
Substância	$c$ (cal/g°C)
Água	1,000
Alumínio	0,219
Álcool	0,590
Cobre	0,093
Chumbo	0,031
Estanho	0,055
Ferro	0,119
Gelo	0,550
Mercúrio	0,033
Ouro	0,031
Prata	0,056
Vapor d'água	0,480
Zinco	0,093

[Tabela: <https://www.sofisica.com.br/conteudos/Termologia/Calorimetria/calor.php>]



# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

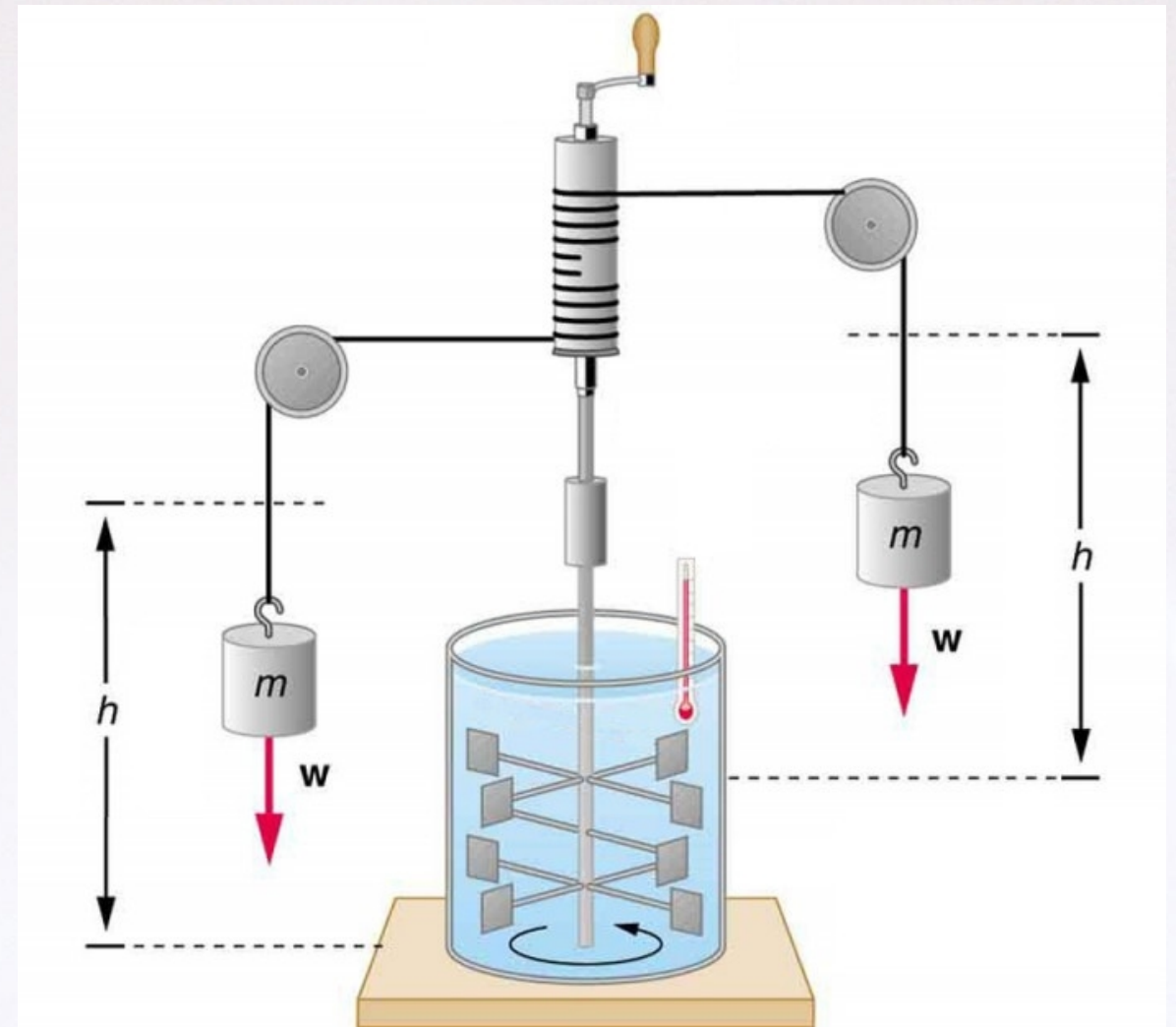


[Figura adaptada de: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/14-1-heat/>]

# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

Do calórico → energia térmica



[Figura adaptada de: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/14-1-heat/>]



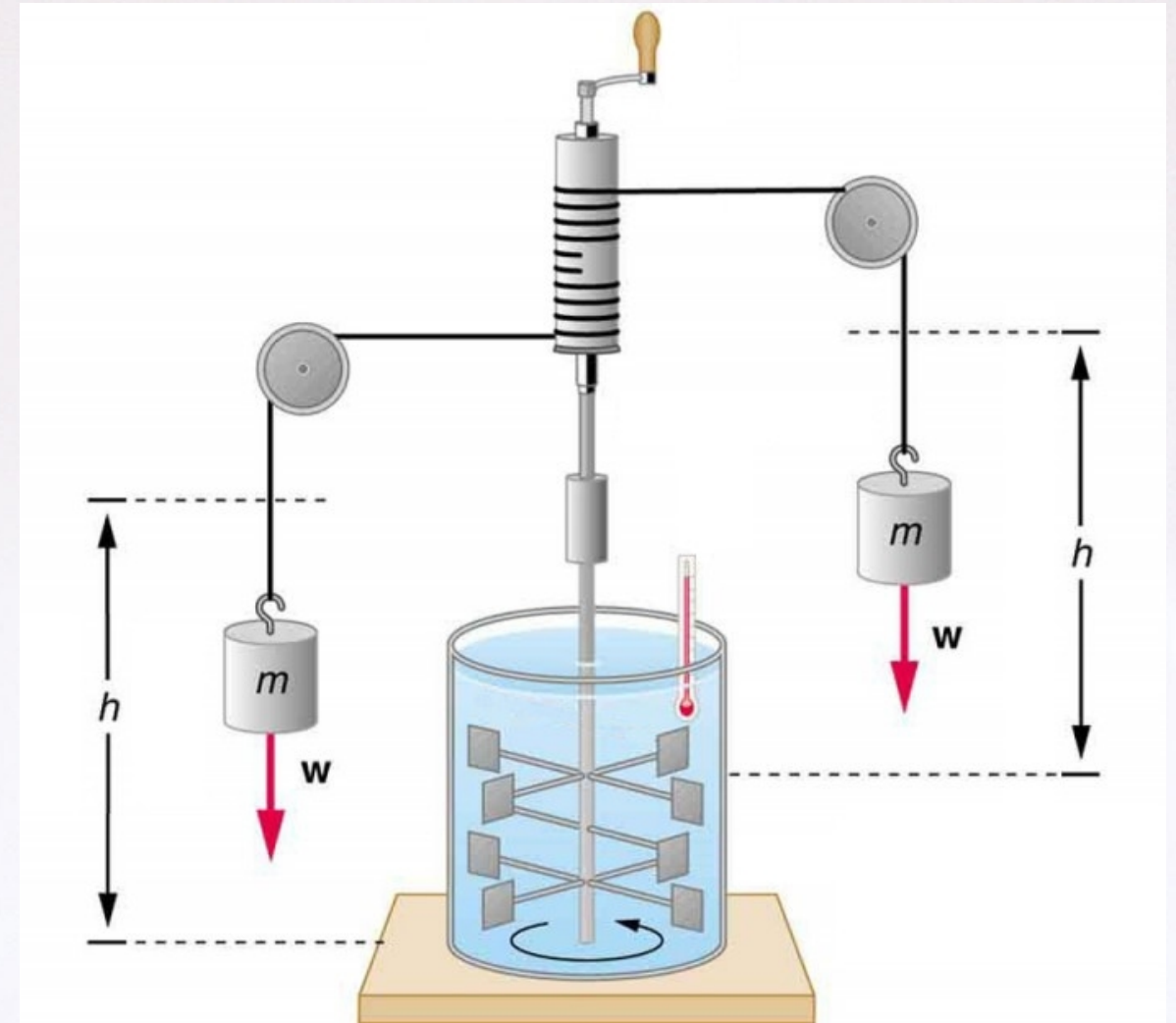
# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

- fluido viscoso

- parte da energia mecânica acaba levando a um pequeno aumento na temperatura.

Assim, há uma relação entre a energia mecânica e a energia térmica.



[Figura adaptada de: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/14-1-heat/>]

# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

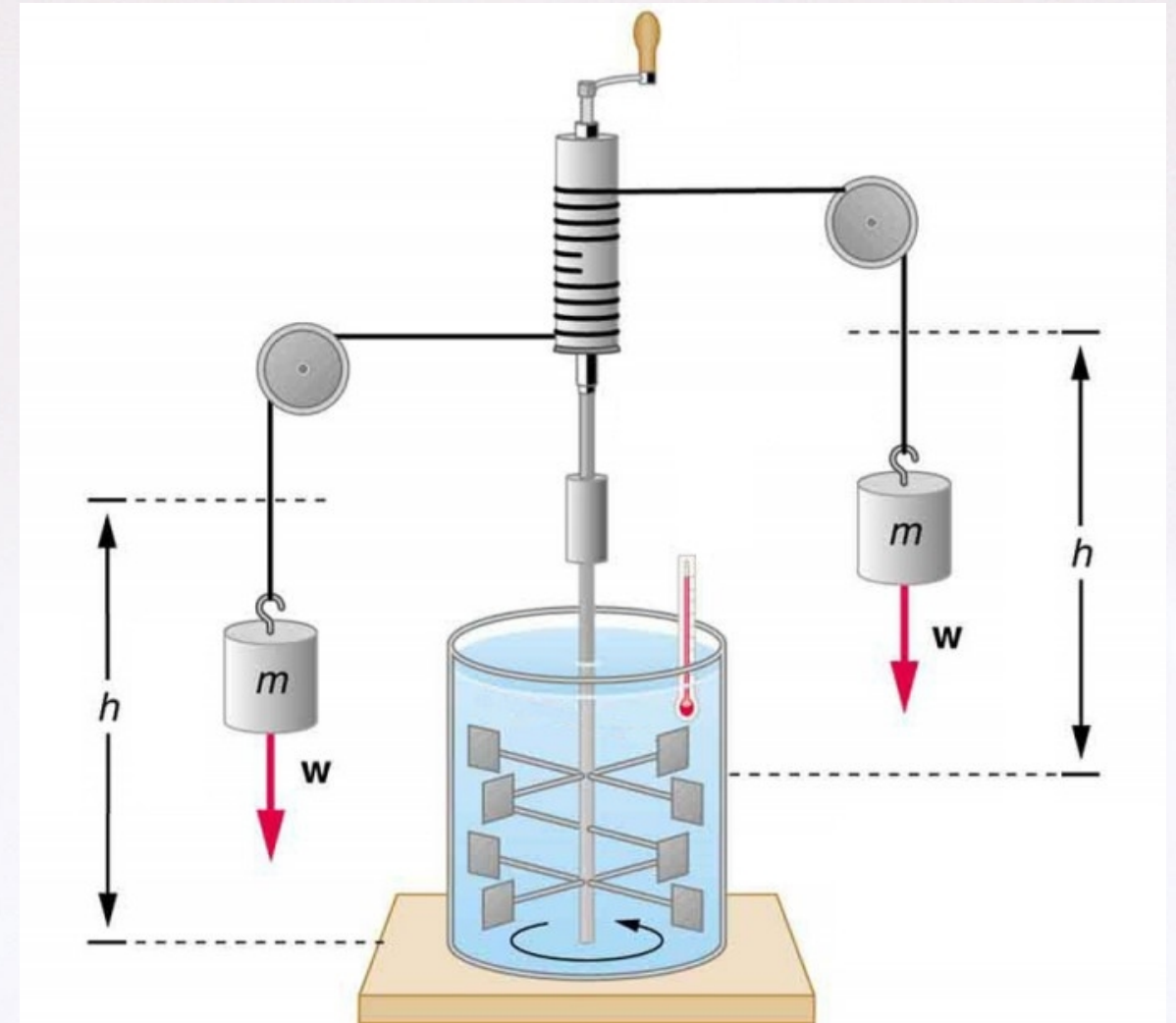
- fluido viscoso

- parte da energia mecânica acaba levando a um pequeno aumento na temperatura.

Assim, há uma relação entre a energia mecânica e a energia térmica.

(Joule 1849)

$$1 \text{ cal} = 4,154 \text{ J}$$





# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

- fluido viscoso

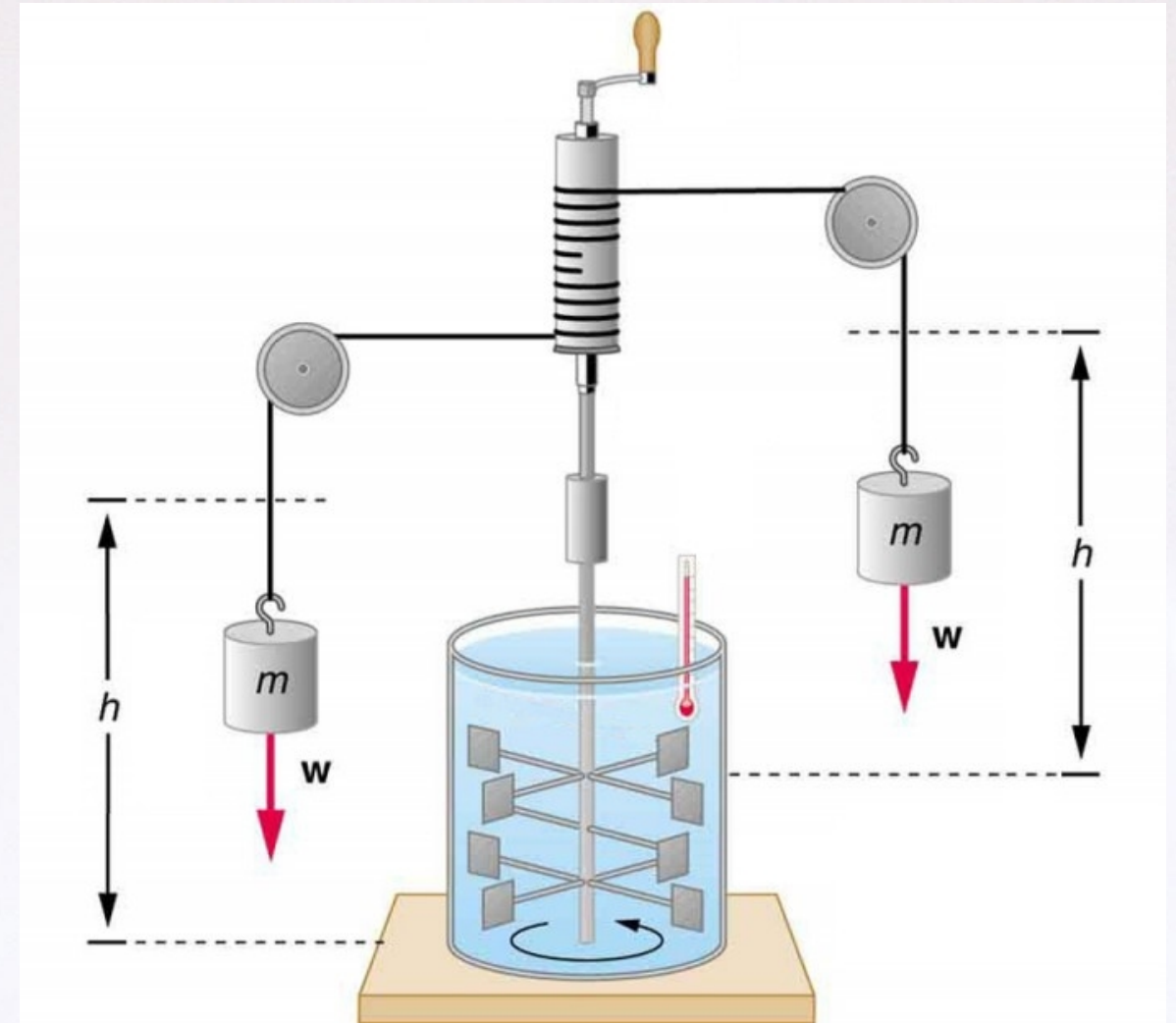
- parte da energia mecânica acaba levando a um pequeno aumento na temperatura.

Assim, há uma relação entre a energia mecânica e a energia térmica.

(Joule 1849)

$$1 \text{ cal} = 4,154 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$



# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

- fluido viscoso

- parte da energia mecânica acaba levando a um pequeno aumento na temperatura.

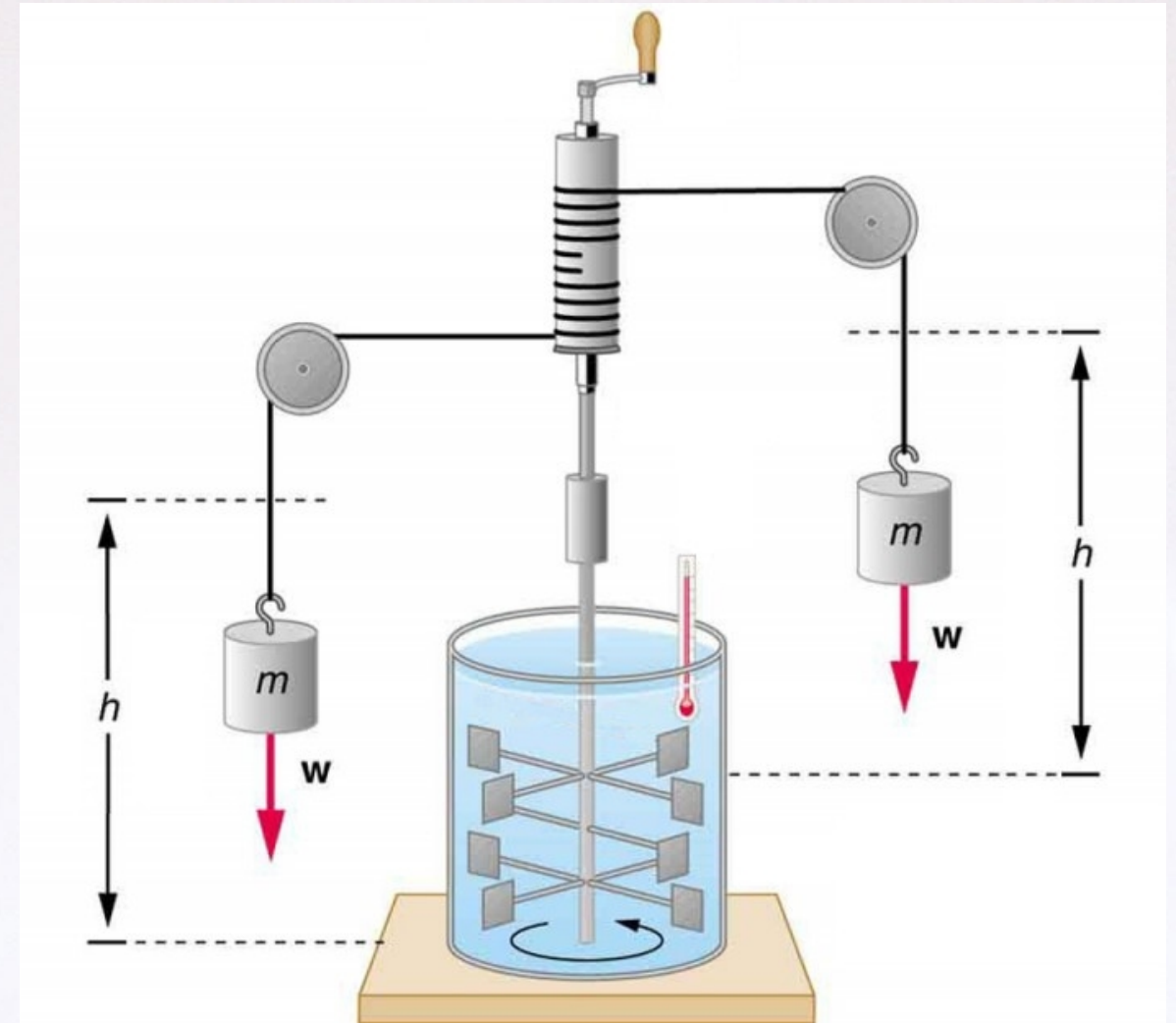
Assim, há uma relação entre a energia mecânica e a energia térmica.

(Joule 1849)

$$1 \text{ cal} = 4,154 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} = 1054 \text{ kJ}$$





# Calor e Transições de fases

→ Equivalente mecânico da caloria

- fluido viscoso

- parte da energia mecânica acaba levando a um pequeno aumento na temperatura.

Assim, há uma relação entre a energia mecânica e a energia térmica.

(Joule 1849)

$$1 \text{ cal} = 4,154 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} = 1054 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ cal}_{IT} = 4,1868 \text{ J}$$

(Internacional Steam Table)

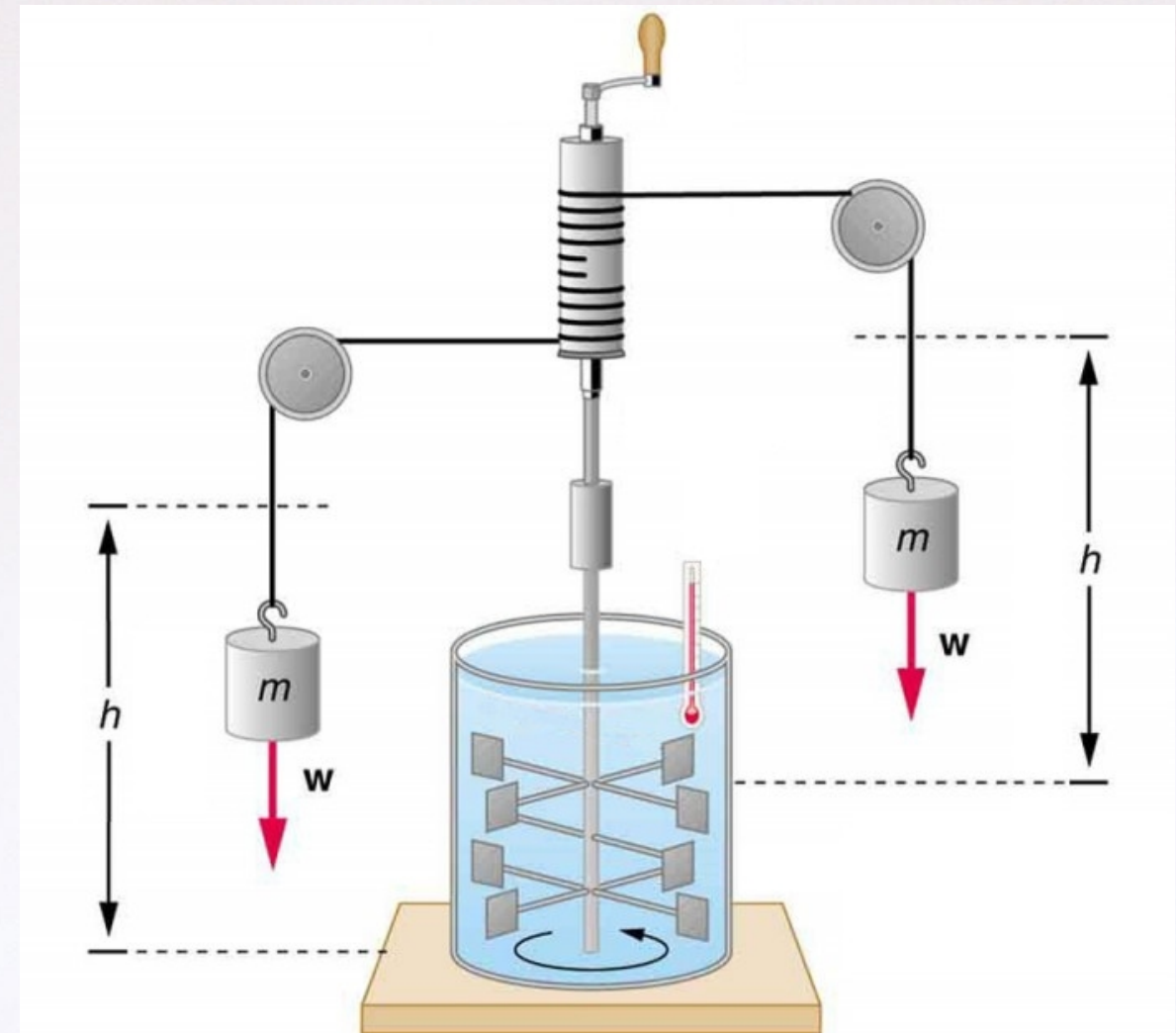
$$1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J}$$

(caloria 15 °C)

$$1 \text{ cal}_{th} = 4,1840 \text{ J}$$

(caloria termoquímica)

(o calor específico varia com a temperatura...)



# On the Mechanical Equivalent of Heat (1849) – James P. Joule

[ 61 ]

III. *On the Mechanical Equivalent of Heat.* By JAMES PRESCOTT JOULE, F.C.S.,  
Sec. Lit. and Phil. Society, Manchester, Cor. Mem. R.A., Turin, &c. Commu-  
nicated by MICHAEL FARADAY, D.C.L., F.R.S., Foreign Associate of the Academy  
of Sciences, Paris, &c. &c. &c.

Received June 6,—Read June 21, 1849.

---

“Heat is a very brisk agitation of the insensible parts of the object, which produces in us that sensation from whence we denominate the object hot; so what in our sensation is *heat*, in the object is nothing but *motion*.”—LOCKE.

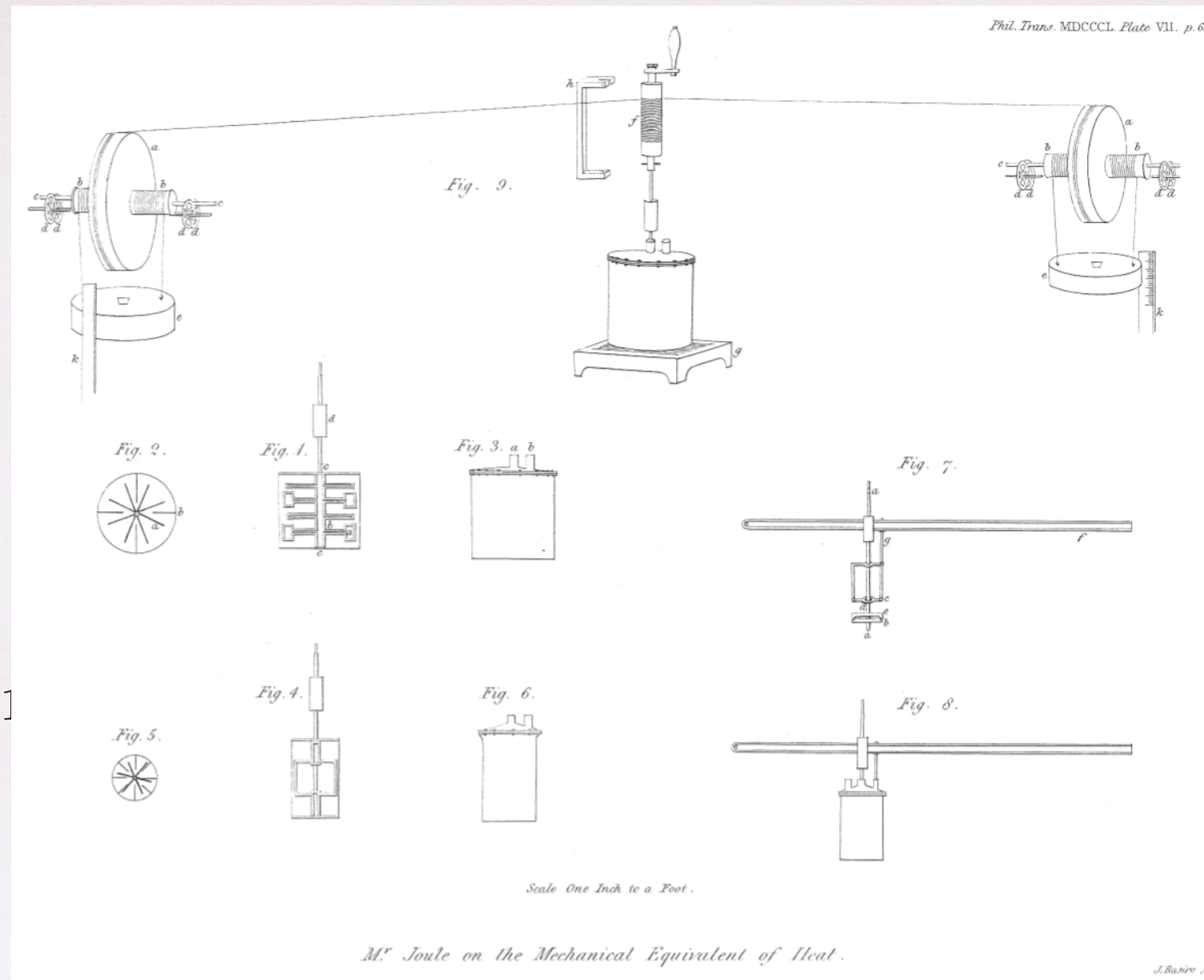
“The *force* of a moving body is proportional to the square of its velocity, or to the height to which it would rise against gravity.”—LEIBNITZ.

---

IN accordance with the pledge I gave the Royal Society some years ago, I have now the honour to present it with the results of the experiments I have made in order to determine the mechanical equivalent of heat with exactness. I will commence with



# On the Mechanical Equivalent of Heat (1849) – James P. Joule



[Artigo: <https://www.jstor.org/stable/pdf/108427.pdf>]

## On the Mechanical Equivalent of Heat (1849) – James P. Joule

1st. *That the quantity of heat produced by the friction of bodies, whether solid or liquid, is always proportional to the quantity of force expended. And,*

2nd. *That the quantity of heat capable of increasing the temperature of a pound of water (weighed in vacuo, and taken at between 55° and 60°) by 1° FAHR., requires for its evolution the expenditure of a mechanical force represented by the fall of 772 lbs. through the space of one foot.*

*Oak Field, near Manchester,  
June 4th, 1849.*

2°. A quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água de 1°F necessita para sua realização de uma quantidade de energia mecânica correspondente àquela disponível na queda de uma massa de 772 libras a uma distância de um pé.



## On the Mechanical Equivalent of Heat (1849) – James P. Joule

1st. *That the quantity of heat produced by the friction of bodies, whether solid or liquid, is always proportional to the quantity of force expended. And,*

2nd. *That the quantity of heat capable of increasing the temperature of a pound of water (weighed in vacuo, and taken at between 55° and 60°) by 1° FAHR., requires for its evolution the expenditure of a mechanical force represented by the fall of 772 lbs. through the space of one foot.*

*Oak Field, near Manchester,  
June 4th, 1849.*

2°. A quantidade de calor capaz de aumentar a temperatura de uma libra de água de 1°F necessita para sua realização de uma quantidade de energia mecânica correspondente àquela disponível na queda de uma massa de 772 libras a uma distância de um pé.

$$m = 772 \text{ lb} = 350,17 \text{ kg} \quad ; \quad 1 \text{ ft} = 0,305 \text{ m} \quad ; \quad m_{\text{agua}} = 1 \text{ lb (pound)} = 0,453592 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 1 \text{ °F} = 1/1.8 \text{ °C} \quad ; \quad c = 1 \text{ cal/g.°C} \quad ; \quad \text{energia : foot-pound force [ft}\cdot\text{lb}_f]$$

## On the Mechanical Equivalent of Heat (1849) – James P. Joule

1st. *That the quantity of heat produced by the friction of bodies, whether solid or liquid, is always proportional to the quantity of force expended. And,*

2nd. *That the quantity of heat capable of increasing the temperature of a pound of water (weighed in vacuo, and taken at between 55° and 60°) by 1° FAHR., requires for its evolution the expenditure of a mechanical force represented by the fall of 772 lbs. through the space of one foot.*

*Oak Field, near Manchester,  
June 4th, 1849.*

$$m = 772 \text{ lb} = 350,17 \text{ kg} \quad ; \quad 1 \text{ ft} = 0,305 \text{ m} \quad ; \quad \Delta T = 1 \text{ °F} = 1/1.8 \text{ °C} \quad ; \quad c = 1 \text{ cal/g.°C}$$

$$W = m g h = (350,17 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)(0,305 \text{ m}) = 1046,66 \text{ J}$$

$$Q = m_{\text{agua}} c \Delta T = (453,59 \text{ g})(1 \text{ cal/g}^\circ\text{C})(1/1.8 \text{ °C}) = 251,99 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = \underline{4,154 \text{ J}} \quad (\text{em 1849})$$

$$1 \text{ cal}_{\text{IT}} = 4,1868 \text{ J} \quad (\text{Internacional Steam Table})$$

$$1 \text{ cal}_{15} = 4,1855 \text{ J} \quad (\text{caloria } 15 \text{ °C})$$

$$1 \text{ cal}_{\text{th}} = 4,1840 \text{ J} \quad (\text{caloria termoquímica})$$



# Calor e Transições de fases

Substância	$c$ , kJ/kg · K	$c$ , kcal/kg · K ou Btu/lb · F°	$c'$ , J/mol · K
Água	4,18	1,00	75,2
Álcool (etílico)	2,4	0,58	111
Alumínio	0,900	0,215	24,3
Bismuto	0,123	0,0294	25,7
Chumbo	0,128	0,0305	26,4
Cobre	0,386	0,0923	24,5
Gelo (−10°C)	2,05	0,49	36,9
Mercúrio	0,140	0,033	28,3
Ouro	0,126	0,0301	25,6
Prata	0,233	0,0558	24,9
Tungstênio	0,134	0,0321	24,8
Vapor (a 1 atm)	2,02	0,48	36,4
Vidro	0,840	0,20	—
Zinco	0,387	0,0925	25,2

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad \frac{[\text{J}]}{[\text{kg}] [\text{K}]}$$

# Calor e Transições de fases

Substância	$c$ (J / Kg K)	$M$ (Kg / mol)	$C_M$ (J / molK)
Alumínio	910	0,0270	24,6
Cobre	390	0,0636	24,8
Ouro	126	0,203	25,6
Chumbo	128	0,207	26,5
Prata	234	0,108	25,3
Álcool etílico	2.428	0,0461	111,9
Mercúrio	138	0,201	27,7
Sal (NaCl)	879	0,0585	51,4
Água	4.186	0,0180	75,4
Gelo ( $-10^{\circ}\text{C}$ )	2.050	0,0180	36,9

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad \frac{[\text{J}]}{[\text{kg}] [\text{K}]}$$



# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de  $390 \text{ J/kg.K}$ . Qual a quantidade de calor necessário para fazer  $2,50 \text{ kg}$  deste material ter sua temperatura aumentada em  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de  $390 \text{ J/kg.K}$ . Qual a quantidade de calor necessário para fazer  $2,50 \text{ kg}$  deste material ter sua temperatura aumentada em  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível



# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de 390 J/kg.K. Qual a quantidade de calor necessário para fazer 2,50 kg deste material ter sua temperatura aumentada em 10 °C?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível

$$c = 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m = 2,50 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$$

# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de 390 J/kg.K. Qual a quantidade de calor necessário para fazer 2,50 kg deste material ter sua temperatura aumentada em 10 °C?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível

$$c = 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q = m c \Delta T$$

$$m = 2,50 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$$



# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de 390 J/kg.K. Qual a quantidade de calor necessário para fazer 2,50 kg deste material ter sua temperatura aumentada em 10 °C?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível

$$c = 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q = m c \Delta T$$

$$m = 2,50 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$$

$$Q = \left( 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (2,50 \text{ kg})(10 \text{ K})$$

# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de 390 J/kg.K. Qual a quantidade de calor necessário para fazer 2,50 kg deste material ter sua temperatura aumentada em 10 °C?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível

$$c = 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q = m c \Delta T$$

$$m = 2,50 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$$

$$Q = \left( 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (2,50 \text{ kg})(10 \text{ K})$$



# Calor e Transições de fases

→ calor sensível

Exemplo: Um certo metal tem calor específico de 390 J/kg.K. Qual a quantidade de calor necessário para fazer 2,50 kg deste material ter sua temperatura aumentada em 10 °C?

- sem transição de fases → variação de temperatura → calor sensível

$$c = 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q = m c \Delta T$$

$$m = 2,50 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$$

$$Q = \left( 390 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (2,50 \text{ kg})(10 \text{ K})$$

$$Q = 9750 \text{ J} = \underline{9,75 \text{ kJ}}$$

# Calor e Transições de fases

→ calor latente

Transições de fases

Quantidade de calor necessário para uma substância mudar de fase = calor latente:



# Calor e Transições de fases

→ calor latente

Transições de fases

Quantidade de calor necessário para uma substância mudar de fase = calor latente:

$$Q = \pm m L$$

$L_F$  = calor latente de fusão

$L_V$  = calor latente de vaporização

# Calor e Transições de fases

→ calor latente

Substância	Fusão		Ebulição	
	Ponto de Fusão (K)	Calor de Fusão $L_F$ (kJ/kg)	Ponto de Ebulição (K)	Calor de Vaporização $L_V$ (kJ/kg)
Hidrogênio	14,0	58,0	20,3	455
Oxigênio	54,8	13,9	90,2	213
Mercúrio	234	11,4	630	296
Água	273	333	373	2256
Chumbo	601	23,2	2017	858
Prata	1235	105	2323	2336
Cobre	1356	207	2868	4730

(1 atm)



# Calor e Transições de fases

→ Vídeo

Ebulição da água em temperatura ambiente

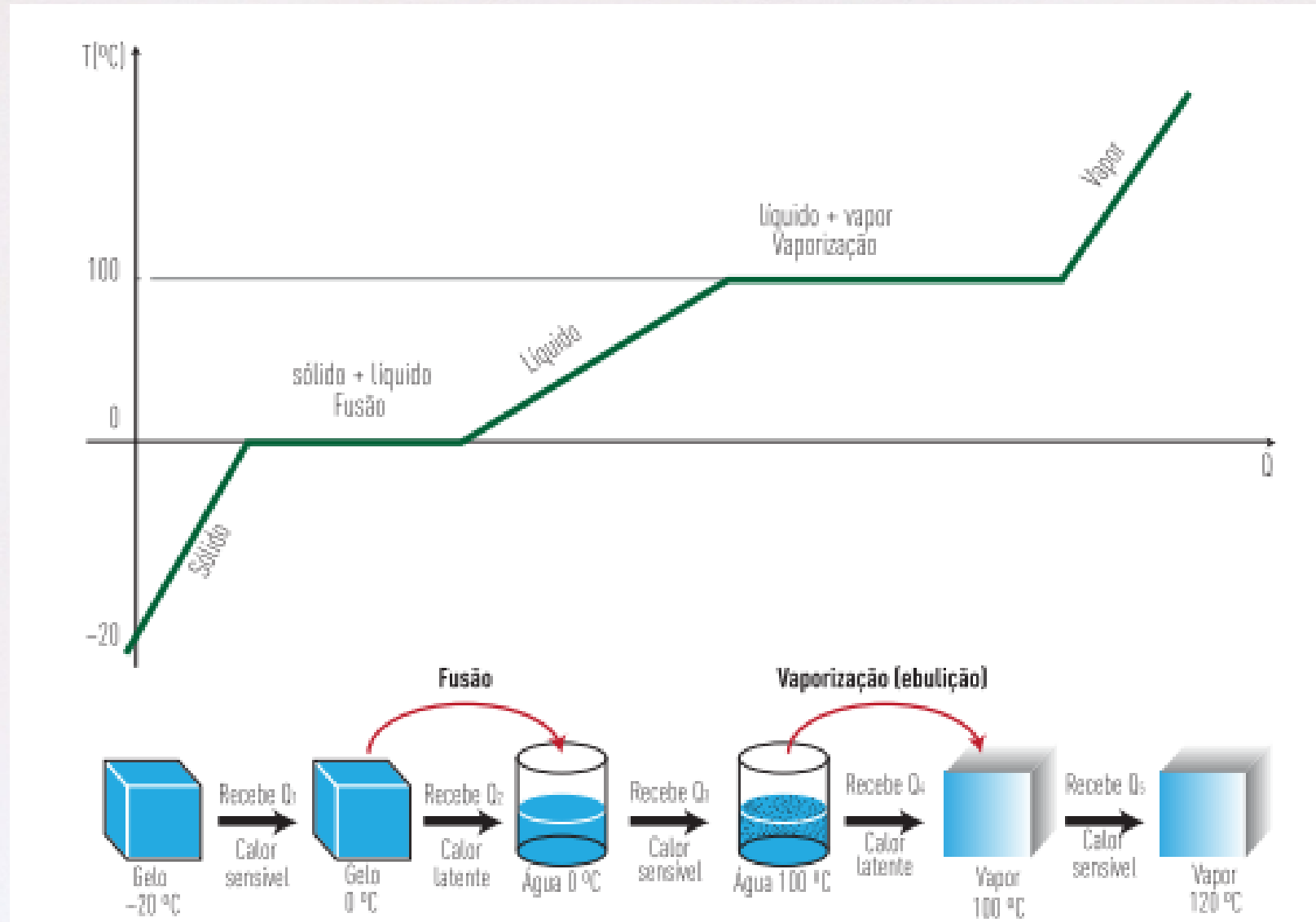


[Vídeo: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling\\_point](https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_point)]

# Calor e Transições de fases

(H<sub>2</sub>O a 1 atm)

(gráfico teórico)

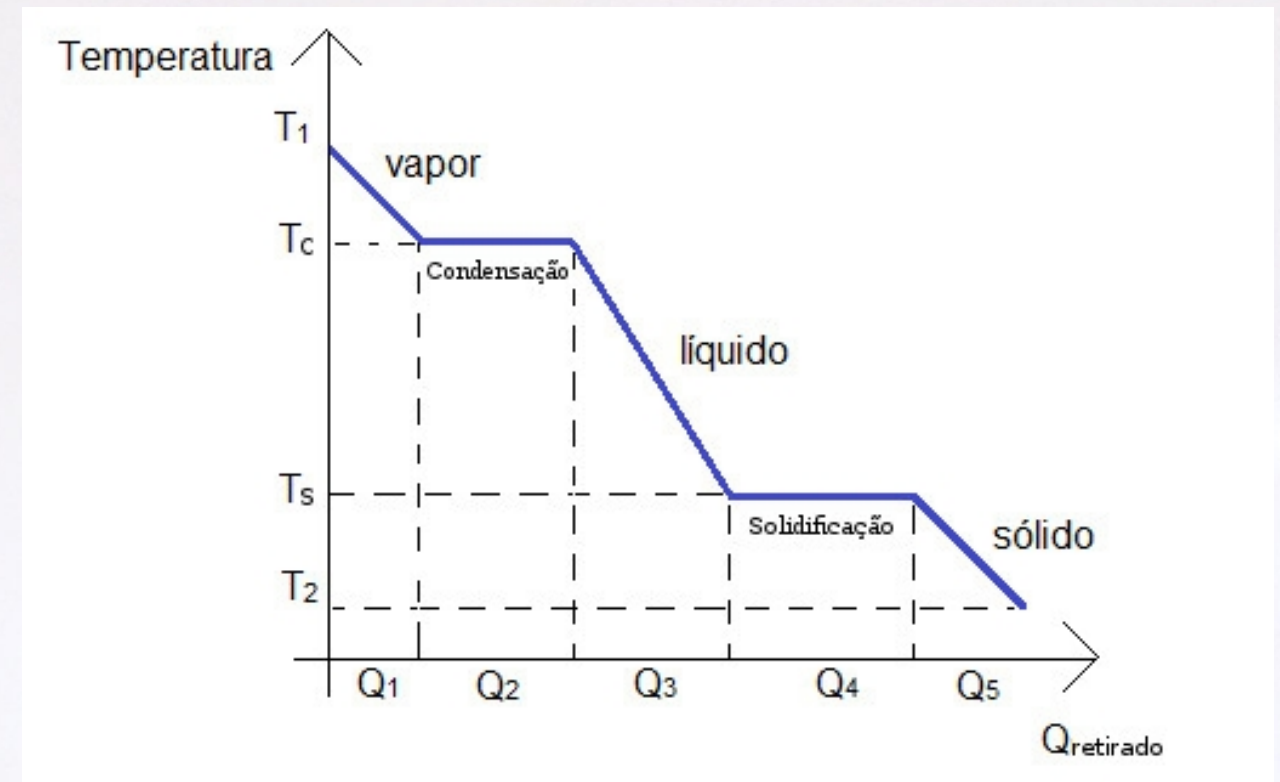
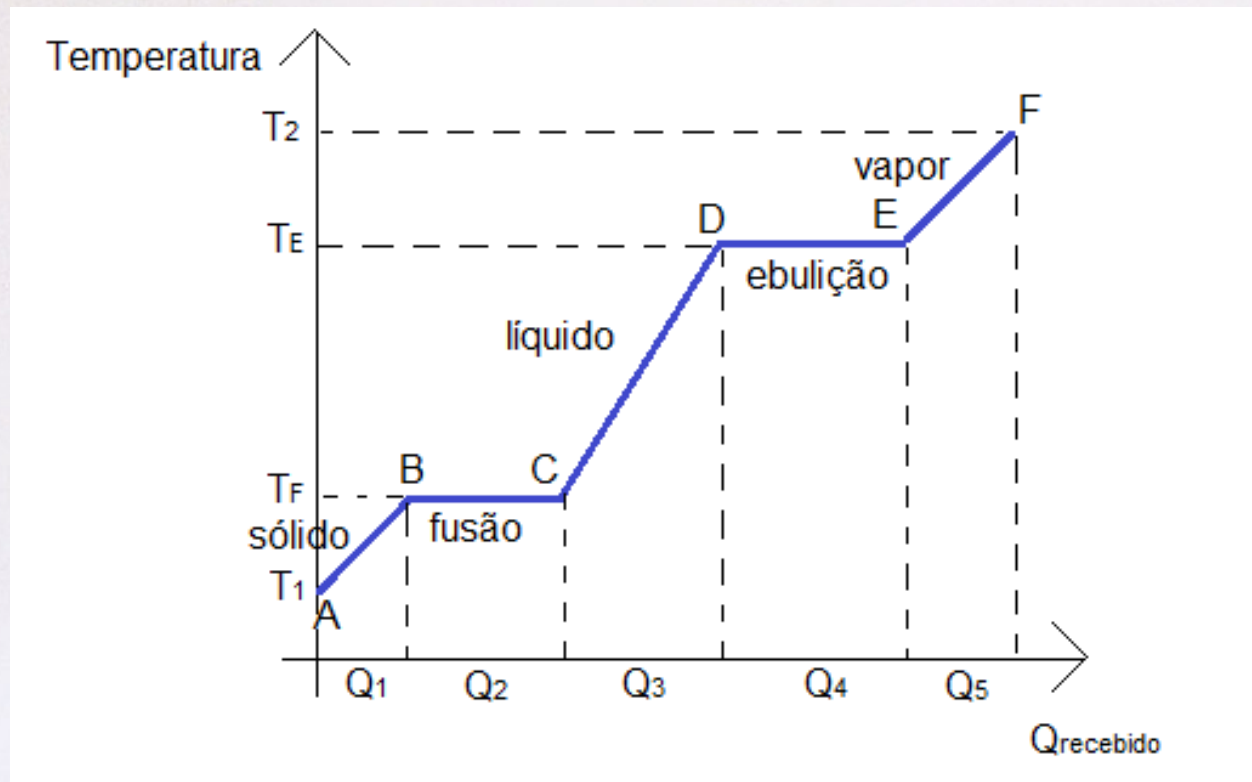


[Figura: <https://coggle.it/diagram/WOWMpzNgWwABaqYp/t/calor-sens%C3%ADvel>]



# Calor e Transições de fases

Transições de fases



[Figuras adaptadas de: <https://www.infoescola.com/fisica/calor-latente/>]

# Calor e Transições de fases

## Transições de fases

Cada fase de uma substância possui um **calor específico**, exemplo:

- Água

$$c = 2093 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

(sólido)

$$c = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

(líquido)

$$c = 2009 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

(vapor)

(Obs.:  $P = \text{cte}$  , e ainda, rigorosamente tais valores mudam com a temperatura)



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

- sem transição de fases  $\rightarrow$  variação de temperatura ( $\Delta T \neq 0$ )  $\rightarrow$  calor sensível

$$Q = m c \Delta T$$

- com transição de fases  $\rightarrow$  temperatura constante ( $\Delta T = 0$ )  $\rightarrow$  calor latente

$$Q = \pm m L$$



# Calor e Transições de fases

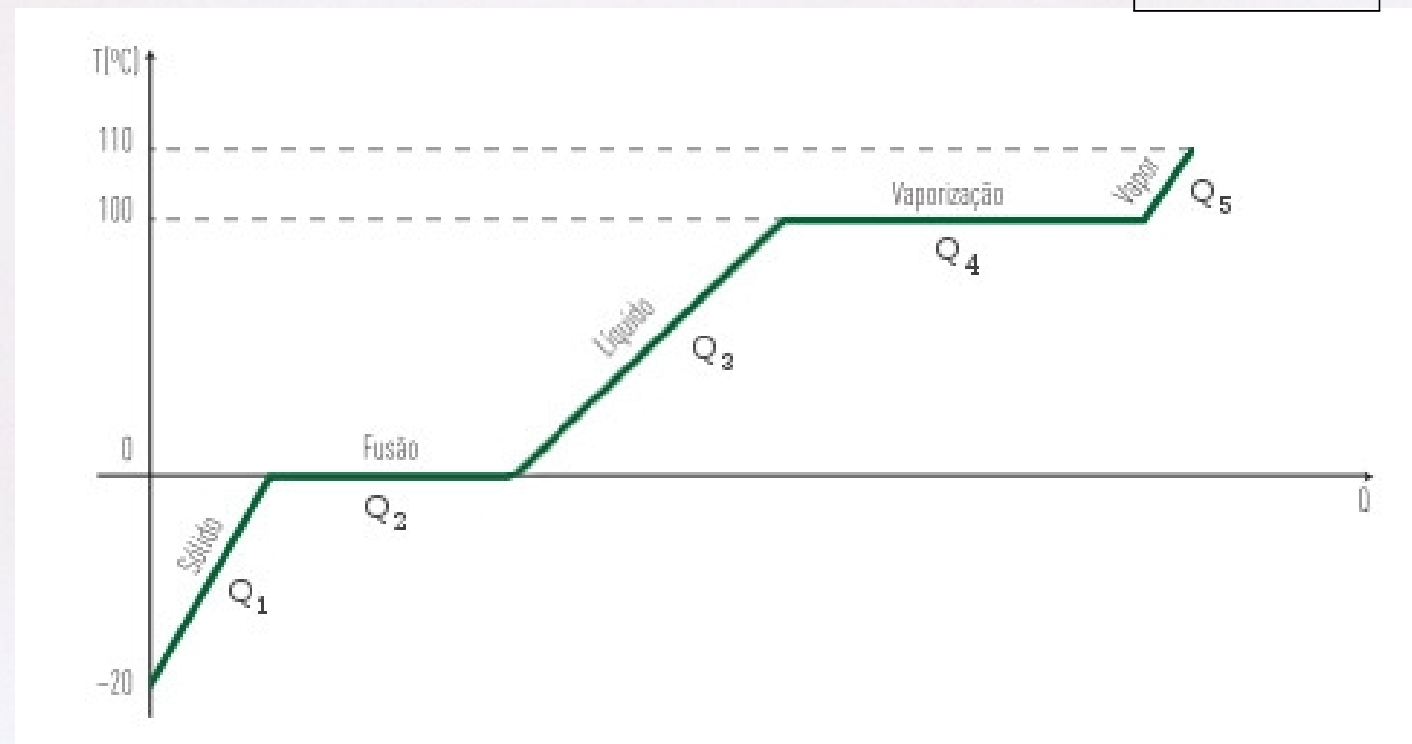
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

- sem transição de fases  $\rightarrow$  variação de temperatura ( $\Delta T \neq 0$ )  $\rightarrow$  calor sensível

$$Q = m c \Delta T$$

- com transição de fases  $\rightarrow$  temperatura constante ( $\Delta T = 0$ )  $\rightarrow$  calor latente

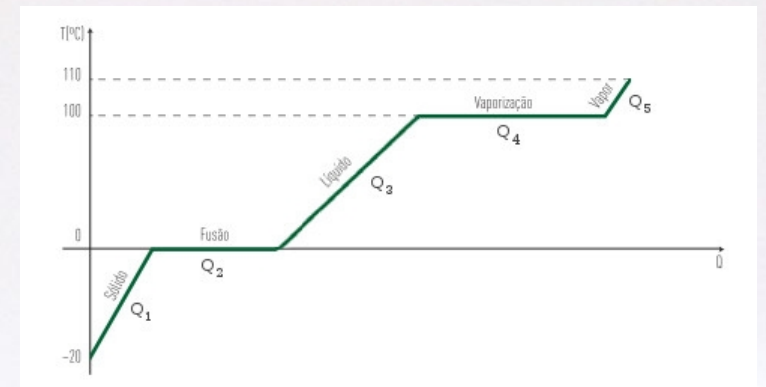
$$Q = \pm m L$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

1) gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :





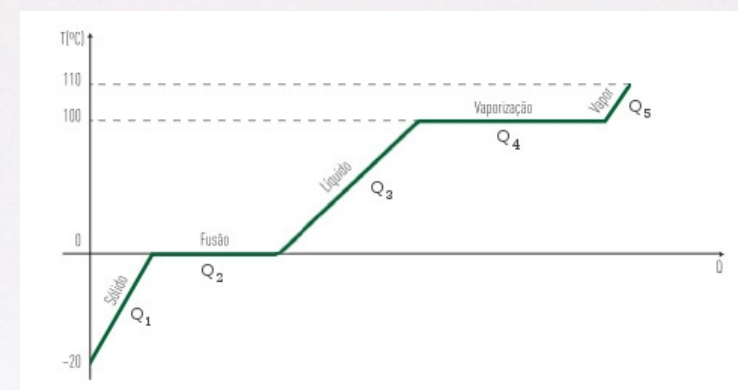
# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

1) gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0 - (-20) = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 20\text{ K}$$

$$c_{\text{gelo}} = 2093\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$



# Calor e Transições de fases

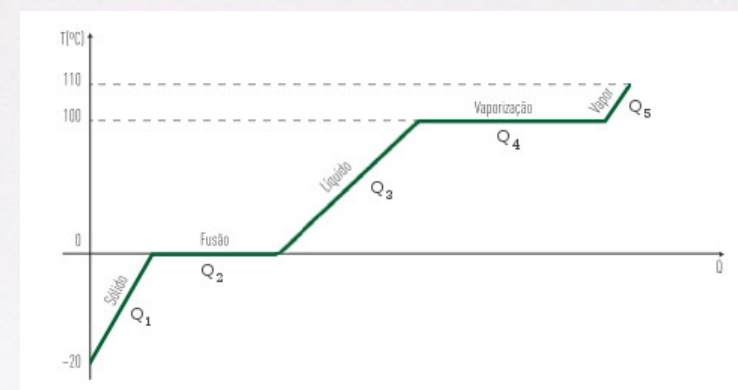
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

1) gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0 - (-20) = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 20\text{ K}$$

$$c_{\text{gelo}} = 2093\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_1 = m \cdot c_{\text{gelo}} \cdot \Delta T$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

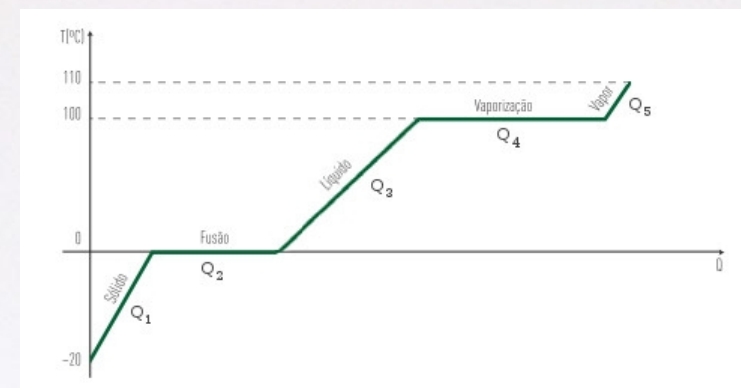
1) gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0 - (-20) = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 20\text{ K}$$

$$c_{\text{gelo}} = 2093\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_1 = m \cdot c_{\text{gelo}} \cdot \Delta T$$

$$Q_1 = (2093\text{ J/kg}\cdot\text{K})(1,0\text{ kg})(20\text{ K})$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

1) gelo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

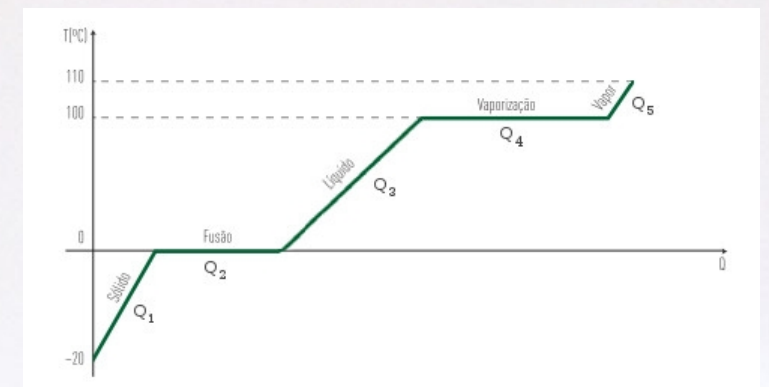
$$\Delta T = 0 - (-20) = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 20\text{ K}$$

$$c_{\text{gelo}} = 2093\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_1 = m \cdot c_{\text{gelo}} \cdot \Delta T$$

$$Q_1 = (2093\text{ J/kg}\cdot\text{K})(1,0\text{ kg})(20\text{ K})$$

$$Q_1 = 41.860\text{ J} = \underline{41,86\text{ kJ}}$$

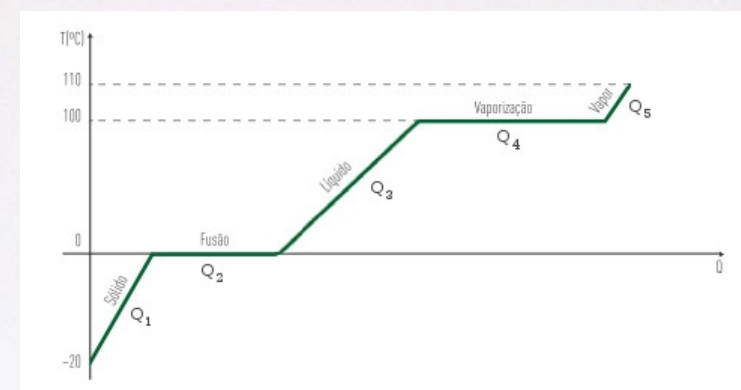




# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

2) fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :



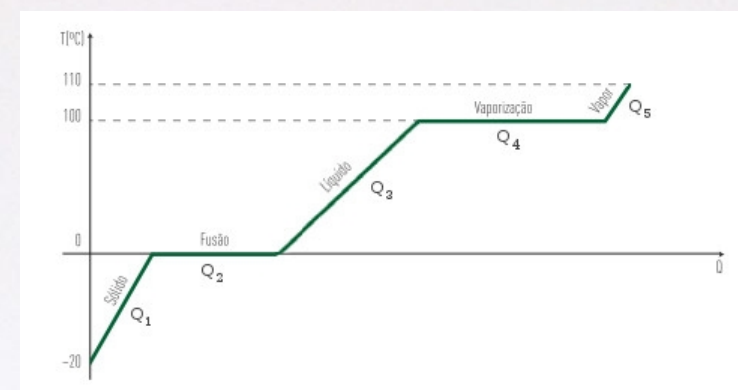
# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

2) fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_F = 333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$





# Calor e Transições de fases

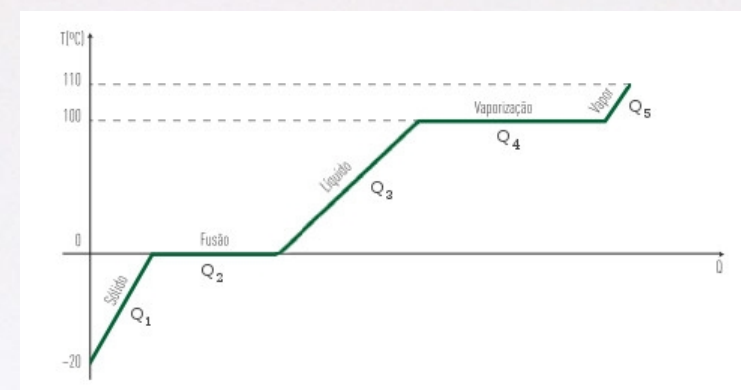
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

2) fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_F = 333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_2 = m \cdot L_F$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

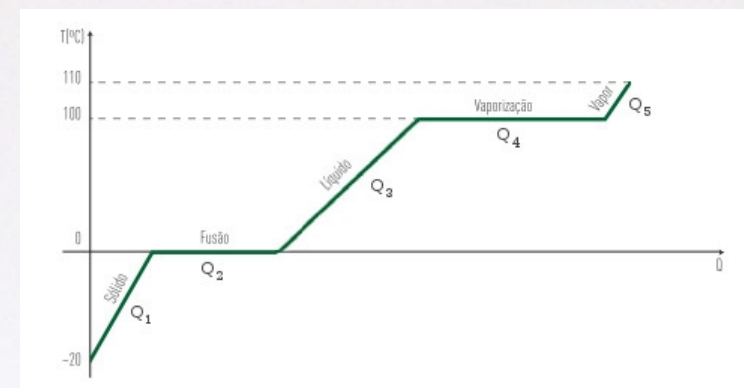
2) fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_F = 333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_2 = m \cdot L_F$$

$$Q_2 = (1,0 \text{ kg})(333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg})$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

2) fusão do gelo a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

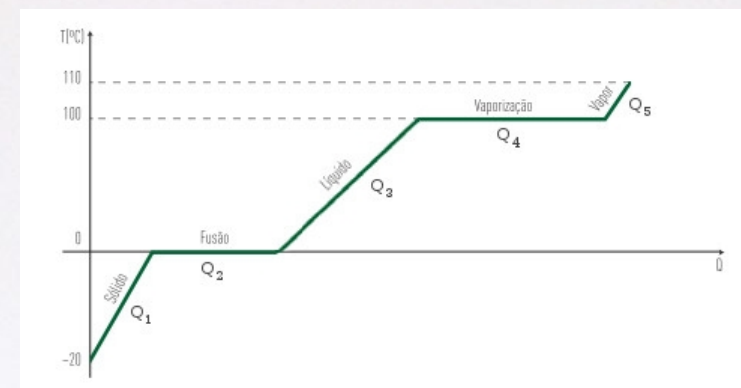
$$\Delta T = 0$$

$$L_F = 333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_2 = m \cdot L_F$$

$$Q_2 = (1,0 \text{ kg})(333,5 \cdot 10^3 \text{ J/kg})$$

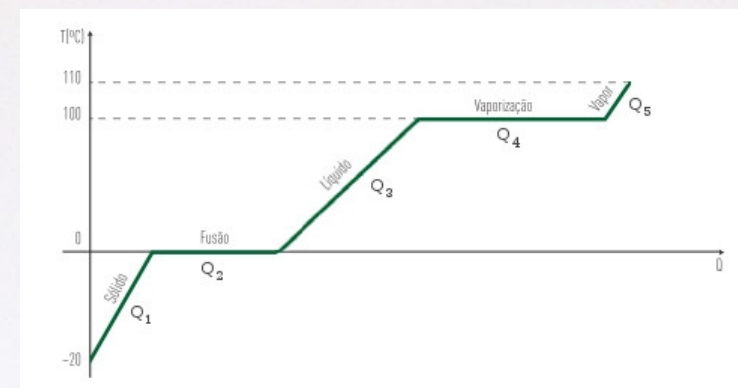
$$Q_2 = 333,5 \cdot 10^3 \text{ J} = \underline{333,5 \text{ kJ}}$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

3) água vai de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :





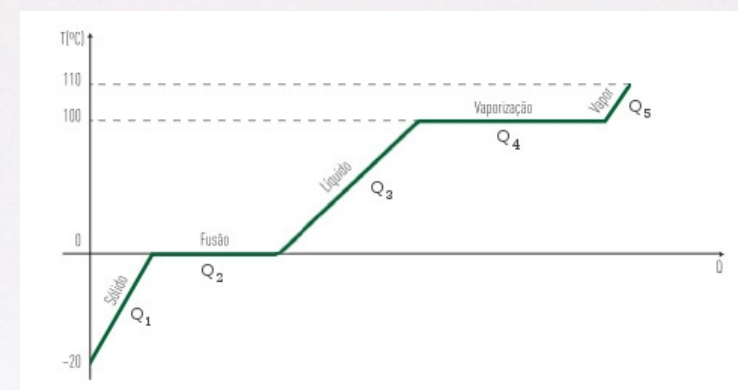
# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

3) água vai de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 100 - 0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ K}$$

$$c_{\text{água}} = 4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$



# Calor e Transições de fases

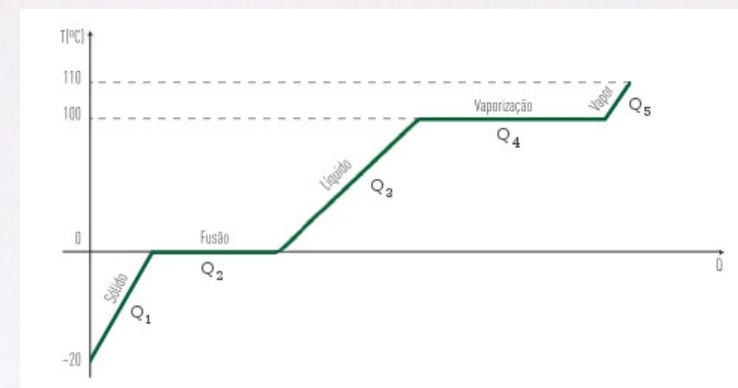
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

3) água vai de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 100 - 0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ K}$$

$$c_{\text{água}} = 4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_3 = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

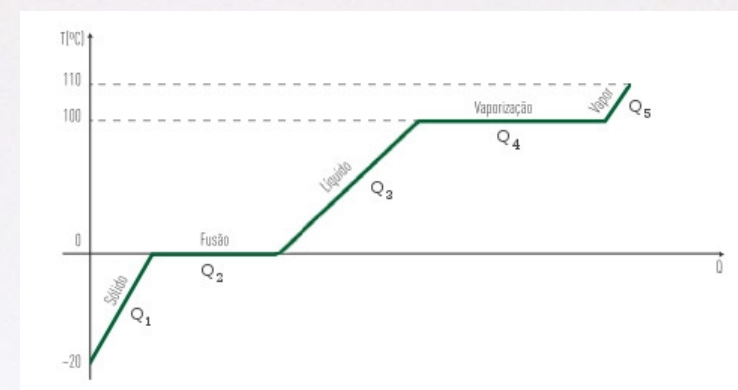
3) água vai de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 100 - 0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ K}$$

$$c_{\text{água}} = 4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_3 = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T$$

$$Q_3 = (4186\text{ J/kg}\cdot\text{K})(1,0\text{ kg})(100\text{ K})$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

3) água vai de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

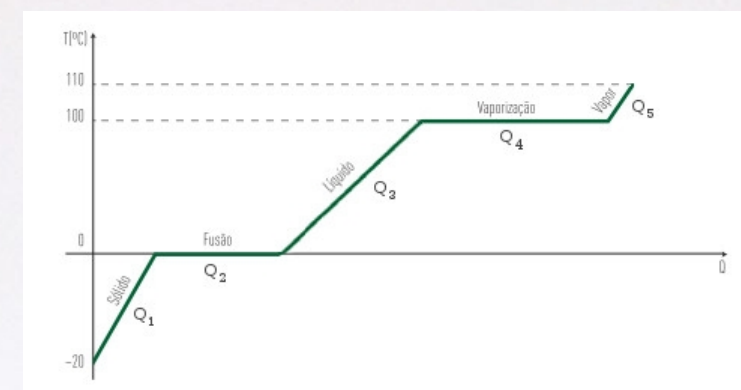
$$\Delta T = 100 - 0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 100\text{ K}$$

$$c_{\text{água}} = 4186\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_3 = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta T$$

$$Q_3 = (4186\text{ J/kg}\cdot\text{K})(1,0\text{ kg})(100\text{ K})$$

$$Q_3 = 418,6 \cdot 10^3\text{ J} = \underline{418,6\text{ kJ}}$$

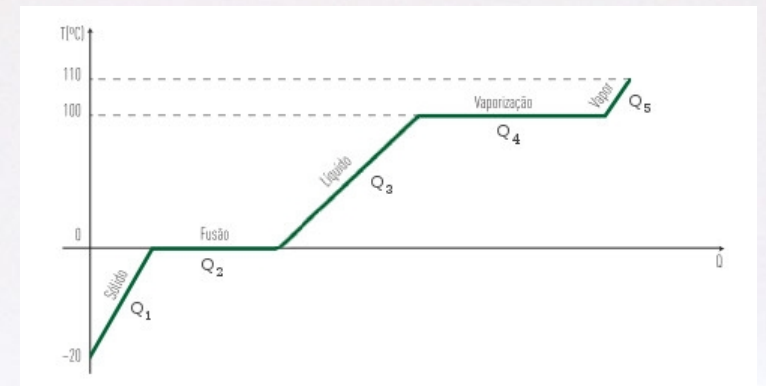




# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

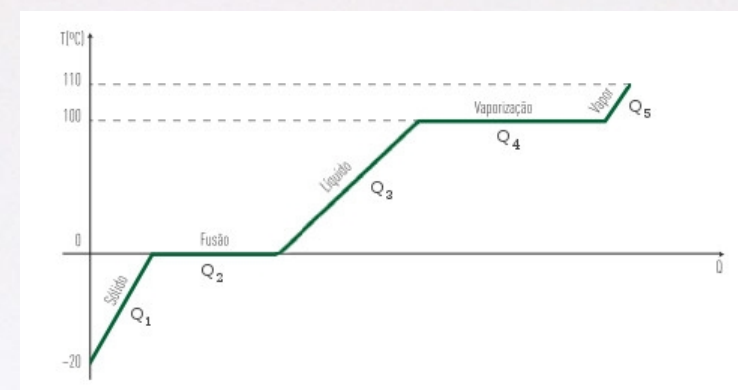
4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :





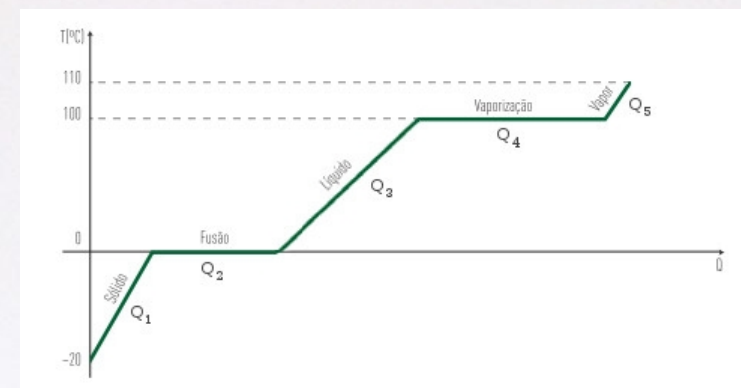
# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_V = 2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$



# Calor e Transições de fases

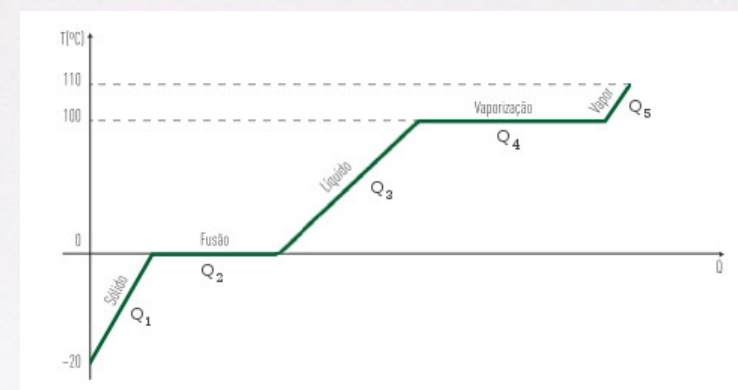
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_V = 2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_4 = m \cdot L_V$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

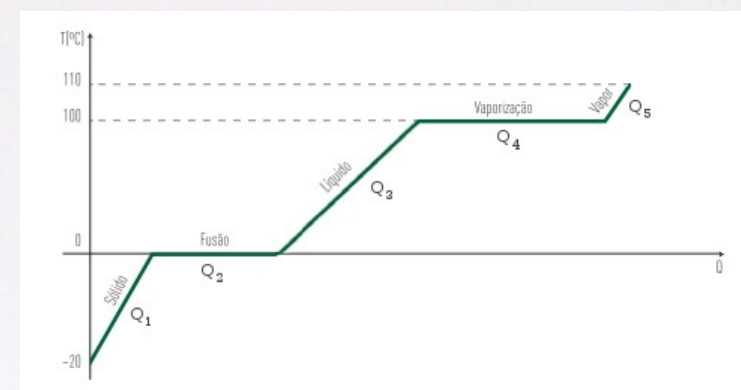
4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 0$$

$$L_V = 2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_4 = m \cdot L_V$$

$$Q_4 = (1,0 \text{ kg})(2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg})$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

4) vaporização da água a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta T = 0$

$$L_V = 2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

$$Q_4 = m \cdot L_V$$

$$Q_4 = (1,0 \text{ kg})(2256 \cdot 10^3 \text{ J/kg})$$

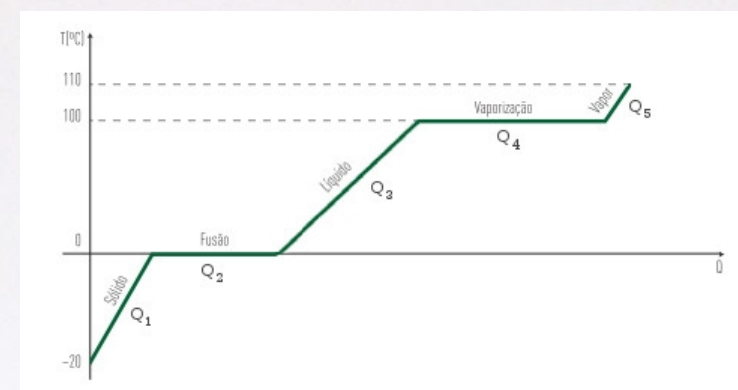
$$Q_4 = 2256 \cdot 10^3 \text{ J} = \underline{2256 \text{ kJ}}$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

5) vapor vai de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ :



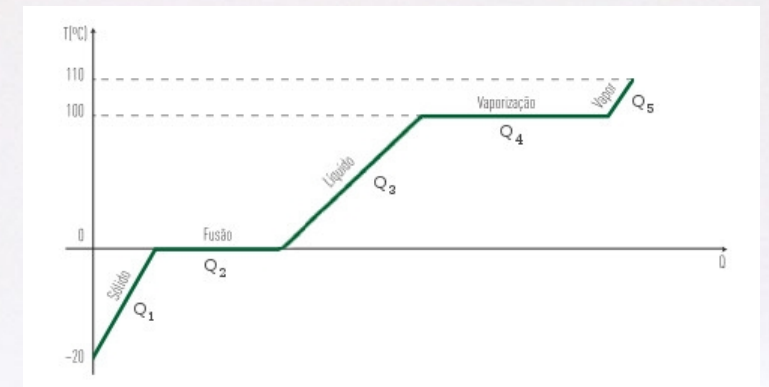
# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

5) vapor vai de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 110 - 100 = 10\text{ }^{\circ}\text{C} = 10\text{ K}$$

$$c_{\text{vapor}} = 2009\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$





# Calor e Transições de fases

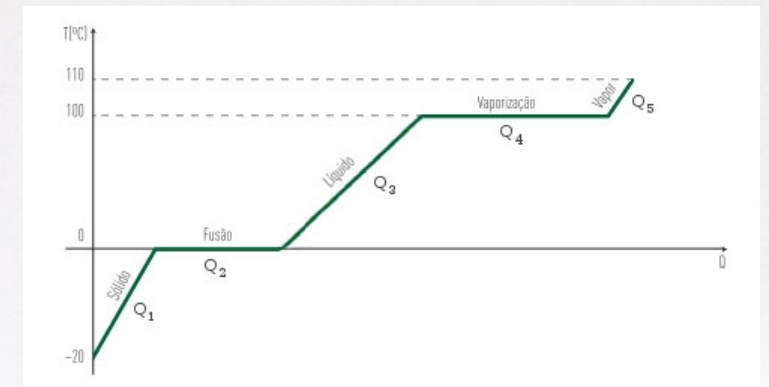
Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

5) vapor vai de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 110 - 100 = 10\text{ }^{\circ}\text{C} = 10\text{ K}$$

$$c_{\text{vapor}} = 2009\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_5 = m \cdot c_{\text{vapor}} \cdot \Delta T$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

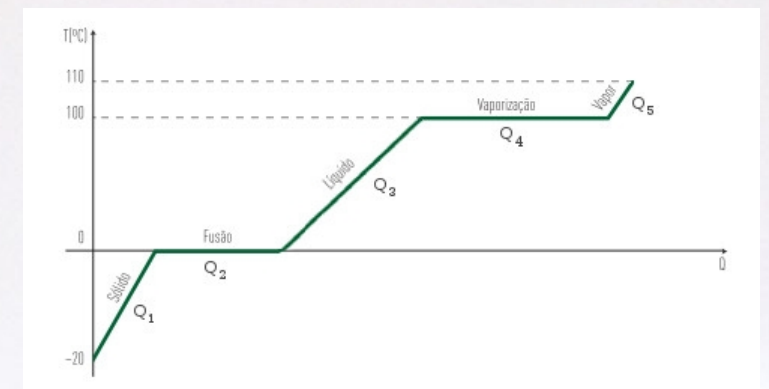
5) vapor vai de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$\Delta T = 110 - 100 = 10\text{ }^{\circ}\text{C} = 10\text{ K}$$

$$c_{\text{vapor}} = 2009\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_5 = m \cdot c_{\text{vapor}} \cdot \Delta T$$

$$Q_5 = (1,0\text{ kg})(2009\text{ J/kg}\cdot\text{K})(10\text{ K})$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

5) vapor vai de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

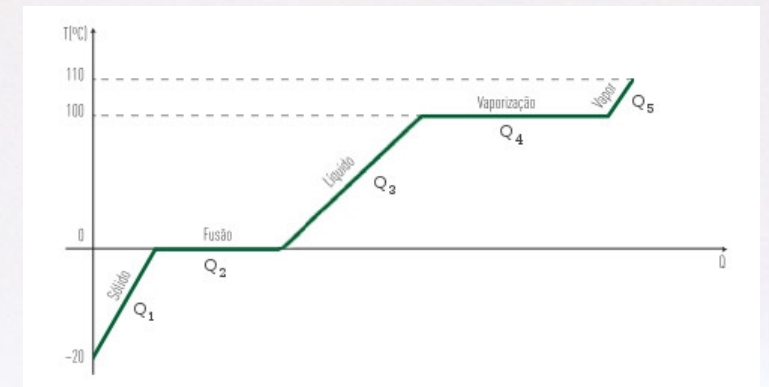
$$\Delta T = 110 - 100 = 10\text{ }^{\circ}\text{C} = 10\text{ K}$$

$$c_{\text{vapor}} = 2009\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$Q_5 = m \cdot c_{\text{vapor}} \cdot \Delta T$$

$$Q_5 = (1,0\text{ kg})(2009\text{ J/kg}\cdot\text{K})(10\text{ K})$$

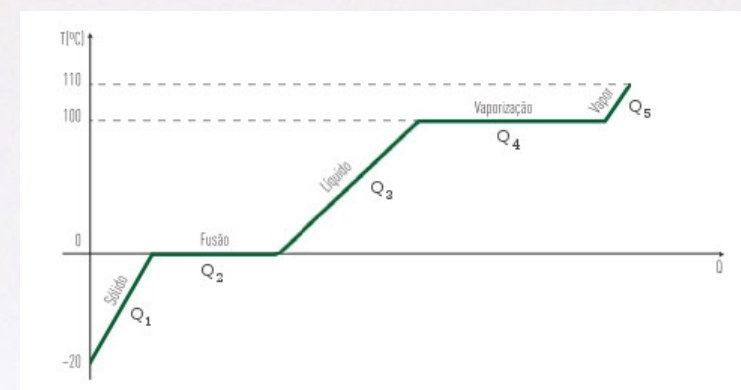
$$Q_5 = 20.090\text{ J} = \underline{20,09\text{ kJ}}$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

Calor total:



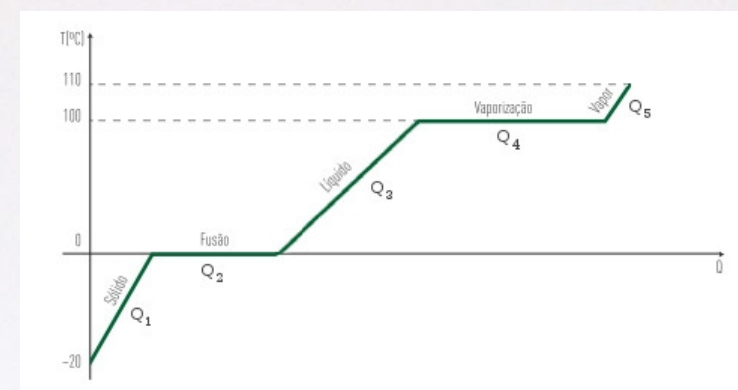


# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

Calor total:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$



# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

Calor total:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

sabendo que:

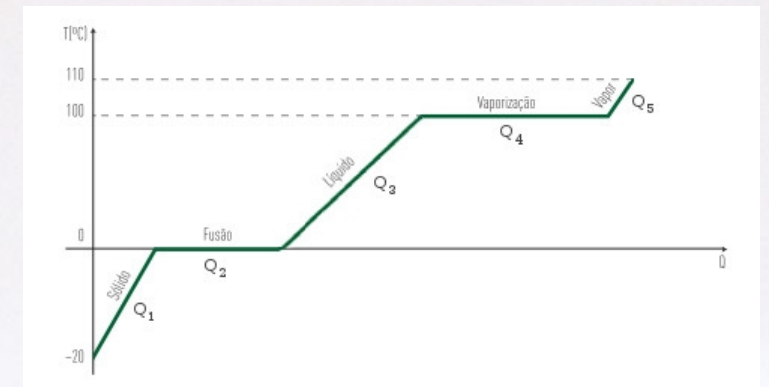
$$Q_1 = 41,86 \text{ kJ}$$

$$Q_3 = 418,6 \text{ kJ}$$

$$Q_5 = 20,09 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = 333,5 \text{ kJ}$$

$$Q_4 = 2256 \text{ kJ}$$





# Calor e Transições de fases

Exemplo: Calcule a quantidade de calor necessária para converter 1,0 kg de gelo a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  em vapor a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A pressão permanece constante a 1 atm.

Calor total:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

sabendo que:

$$Q_1 = 41,86 \text{ kJ} \quad Q_3 = 418,6 \text{ kJ} \quad Q_5 = 20,09 \text{ kJ}$$

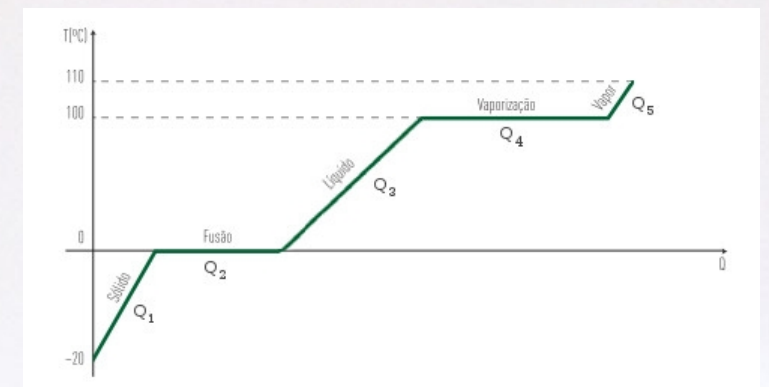
$$Q_2 = 333,5 \text{ kJ} \quad Q_4 = 2256 \text{ kJ}$$

Então:

$$Q = 41,86 + 333,5 + 418,6 + 2256 + 20,09$$

$$Q = 3.070,05 \text{ kJ}$$

$$(3,07 \times 10^6 \text{ J} = 3,07 \text{ MJ})$$

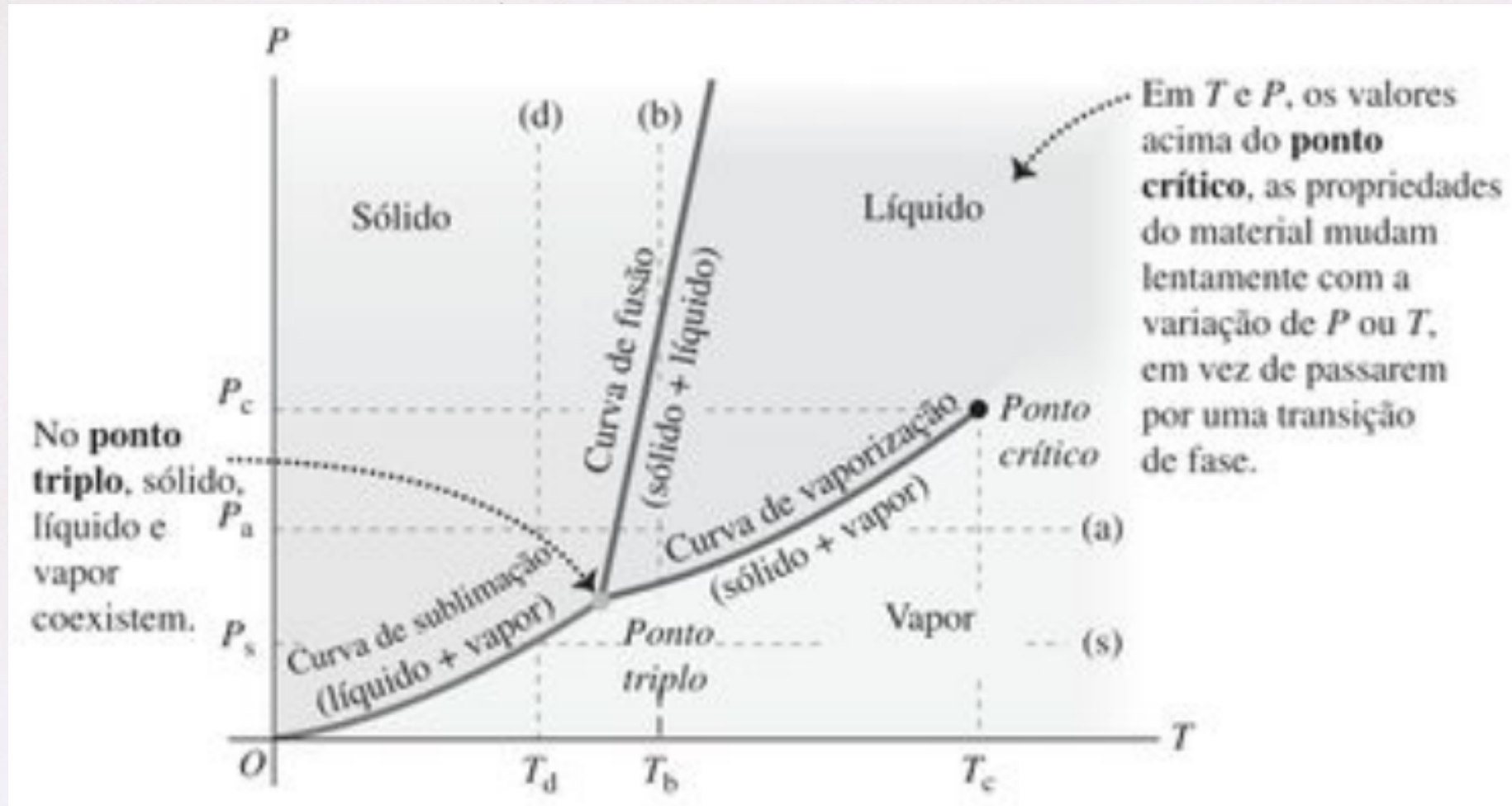


# Calor e Transições de fases

## DIAGRAMAS DE FASES



# Calor e Transições de fases



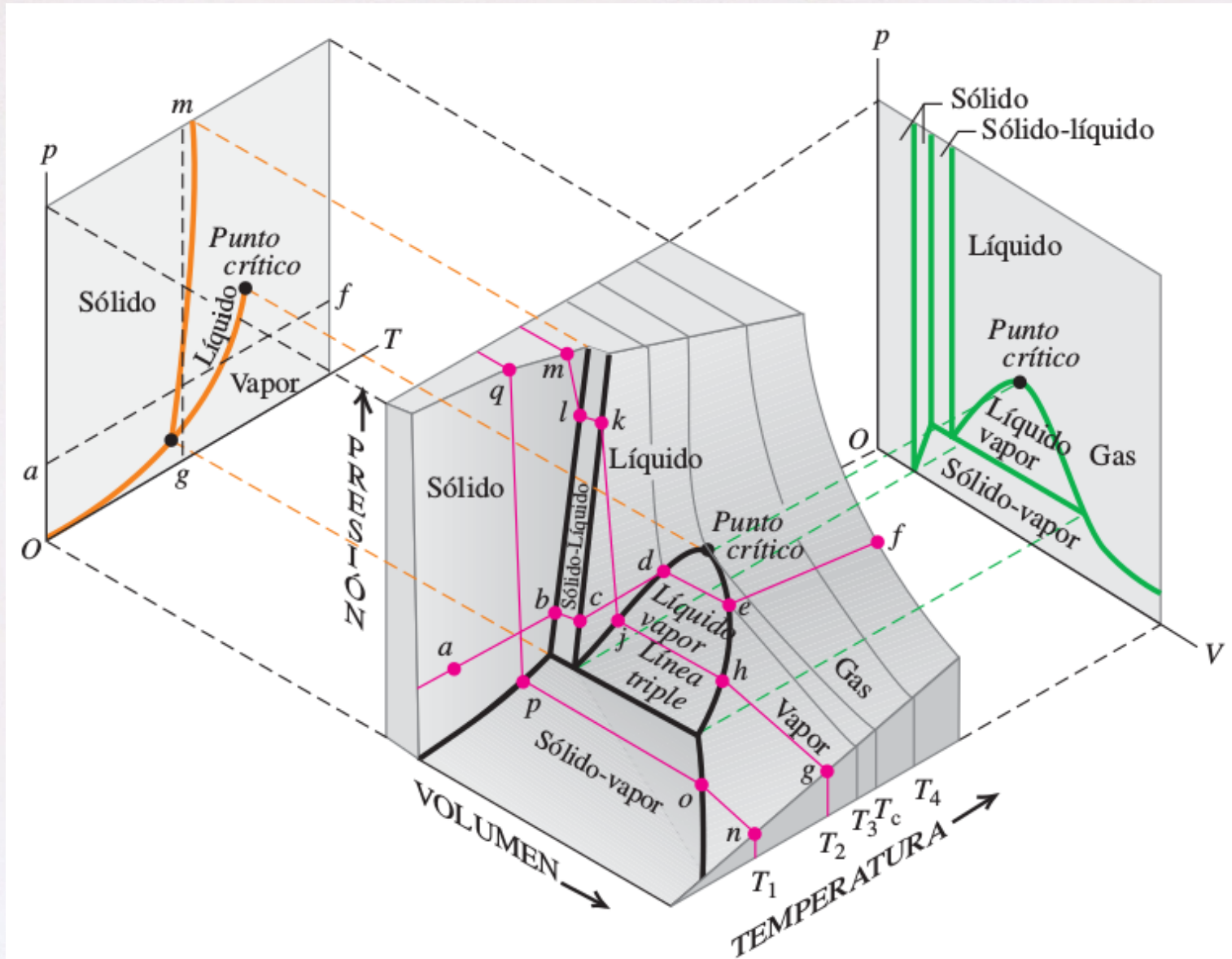
# Calor e Transições de fases

Substância	Temperatura (K)	Pressão (Pa)
Hidrogênio	13,80	$0,0704 \times 10^5$
Deutério	18,63	$0,171 \times 10^5$
Neônio	24,56	$0,432 \times 10^5$
Nitrogênio	63,18	$0,125 \times 10^5$
Oxigênio	54,36	$0,00152 \times 10^5$
Amônia	195,40	$0,0607 \times 10^5$
Dióxido de carbono	216,55	$5,17 \times 10^5$
Dióxido de enxofre	197,68	$0,00167 \times 10^5$
Água	273,16	$0,00610 \times 10^5$

(ponto triplo – coexistência de 3 fases)

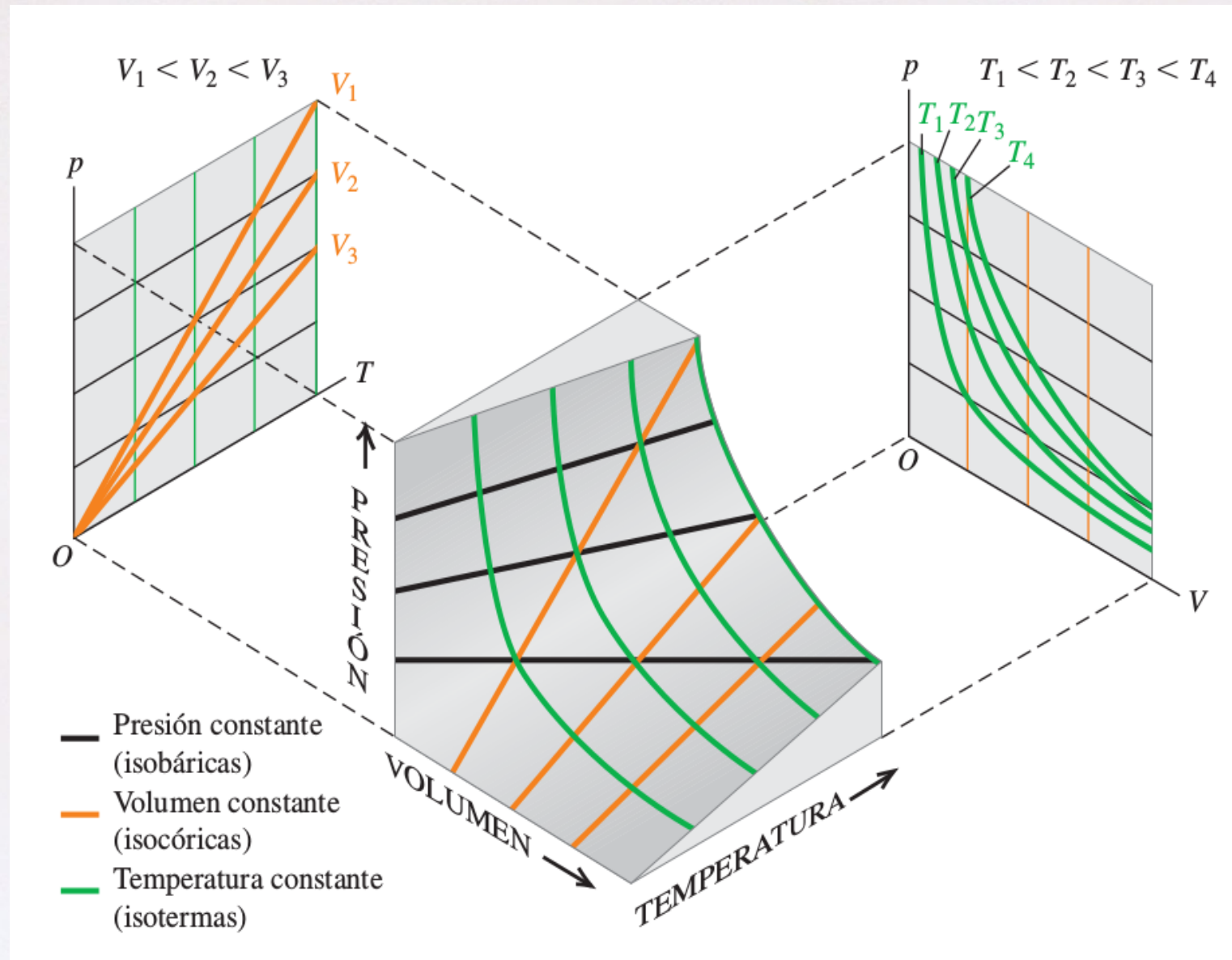


# Calor e Transições de fases



[HUGH, Young. FREEDMAN, Roger, Física Universitária, SEARS-ZEMANSKY, vol 2, 12a Ed., Pearson, 2009]

# Calor e Transições de fases



[HUGH, Young. FREEDMAN, Roger, Física Universitária, SEARS-ZEMANSKY, vol 2, 12a Ed., Pearson, 2009]



# 1ª Lei da Termodinâmica

# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

Muito do desenvolvimento da Termodinâmica ocorreu em função do estudo de

→ máquinas térmicas

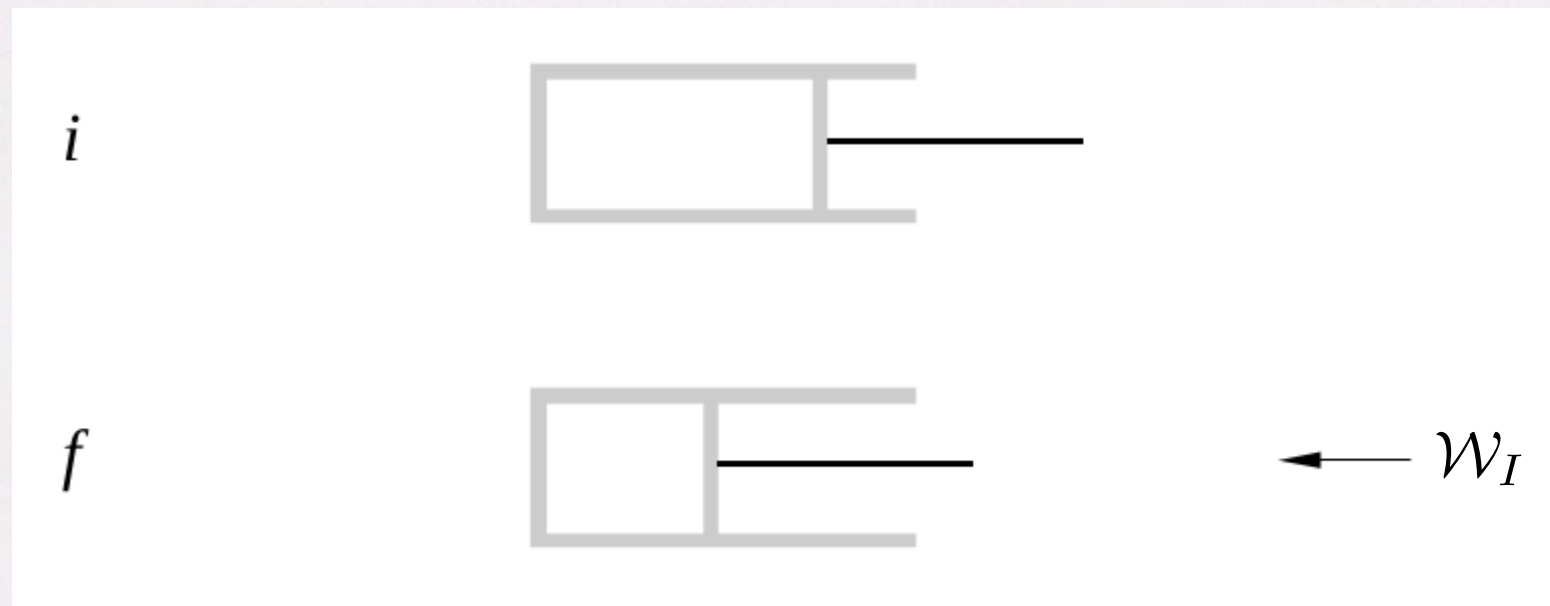
→ comportamento de gases



# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

1)



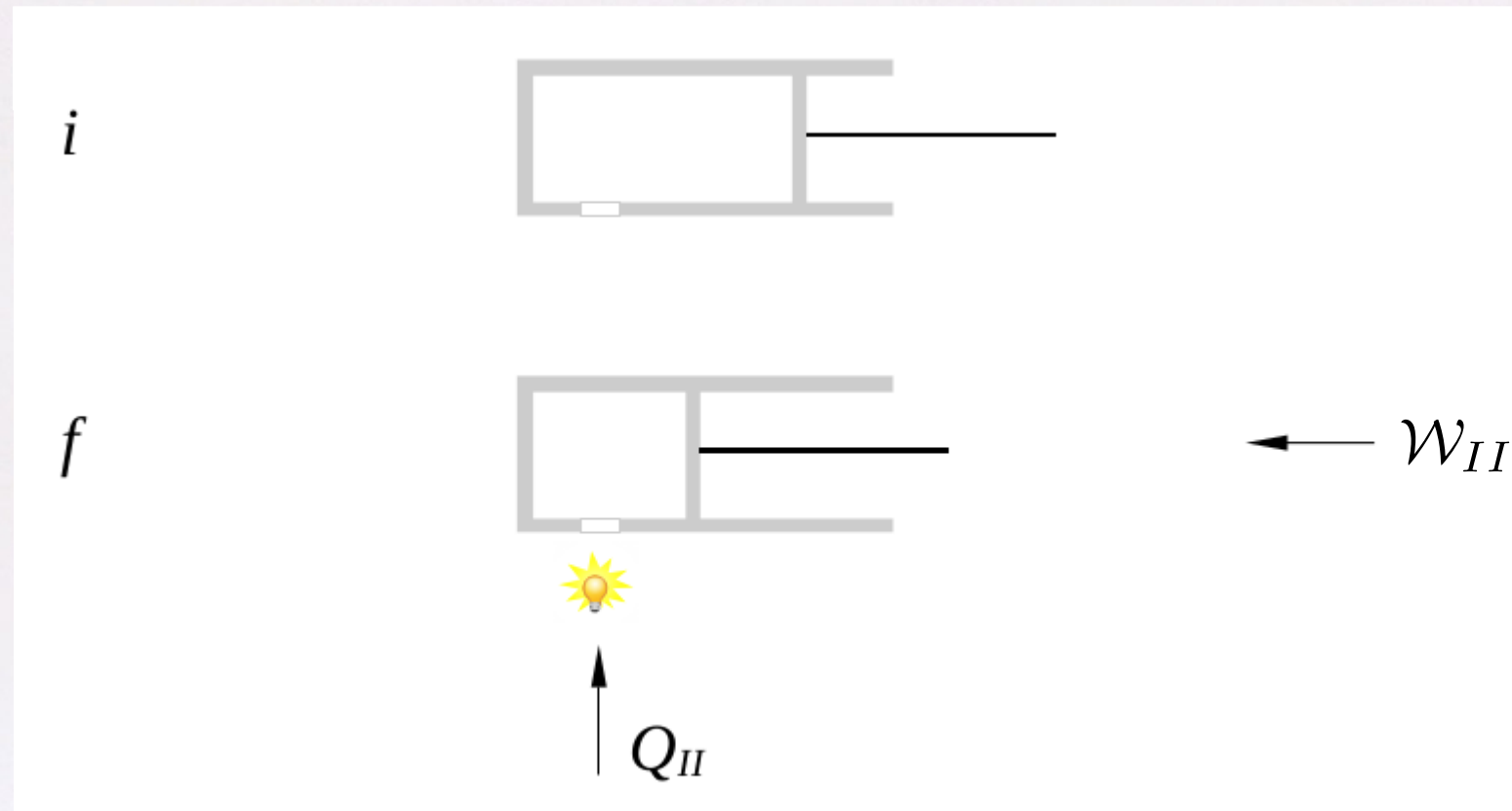
$$\Delta U_I = U_f - U_i = \mathcal{W}_I$$

$$Q_I = 0$$

# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

II)



$$\Delta U_{II} = U_f - U_i = Q_{II} + W_{II}$$

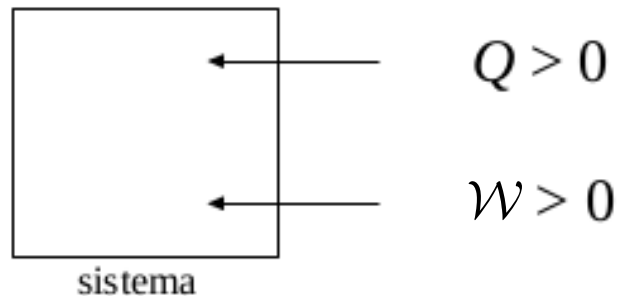


# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

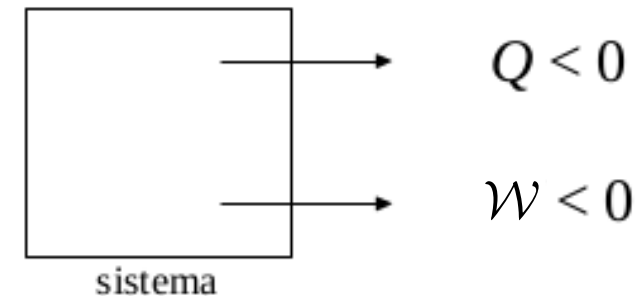
$$\Delta U = Q + W$$

Convenção de sinais:



Fluxo de energia para dentro do sistema  
(aumenta  $\Delta U$ )

Trabalho realizado sobre o sistema



Fluxo de energia para fora do sistema  
(diminui  $\Delta U$ )

Trabalho realizado pele sistema

# 1ª Lei da Termodinâmica

Alguns autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = - \int P dV$

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$

Outros autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q - \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = \int P dV$

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$



# 1ª Lei da Termodinâmica

Alguns autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = - \int P dV$

(Tipler)

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$

Outros autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q - \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = \int P dV$

(Halliday)  
(Moysés)

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$

# 1ª Lei da Termodinâmica

Alguns autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = - \int P dV$

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$

Outros autores definem a 1ª lei como:

$$\Delta U = Q - \mathcal{W}$$

Neste caso:  $\mathcal{W} = \int P dV$

Assim:

$$\Delta U = Q - \int P dV$$

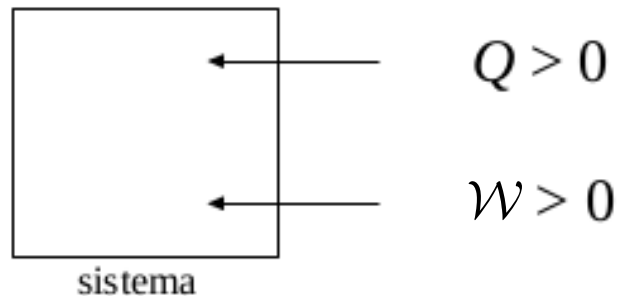


# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

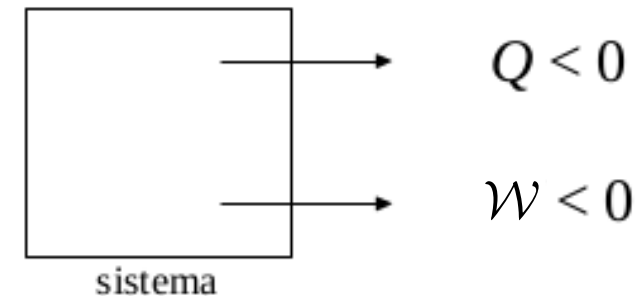
$$\Delta U = Q + W$$

Convenção de sinais:



Fluxo de energia para dentro do sistema  
(aumenta  $\Delta U$ )

Trabalho realizado sobre o sistema



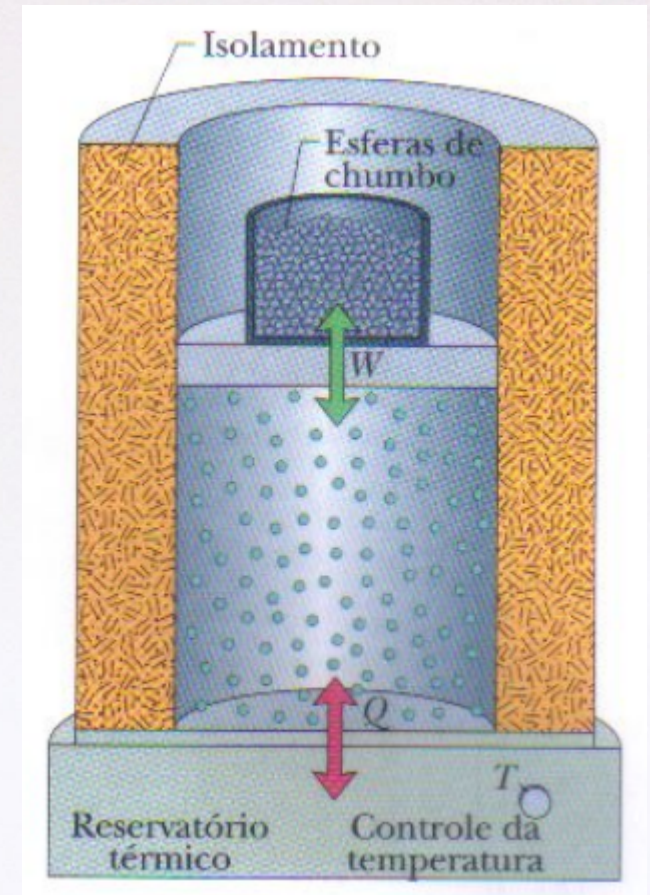
Fluxo de energia para fora do sistema  
(diminui  $\Delta U$ )

Trabalho realizado pele sistema

# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$



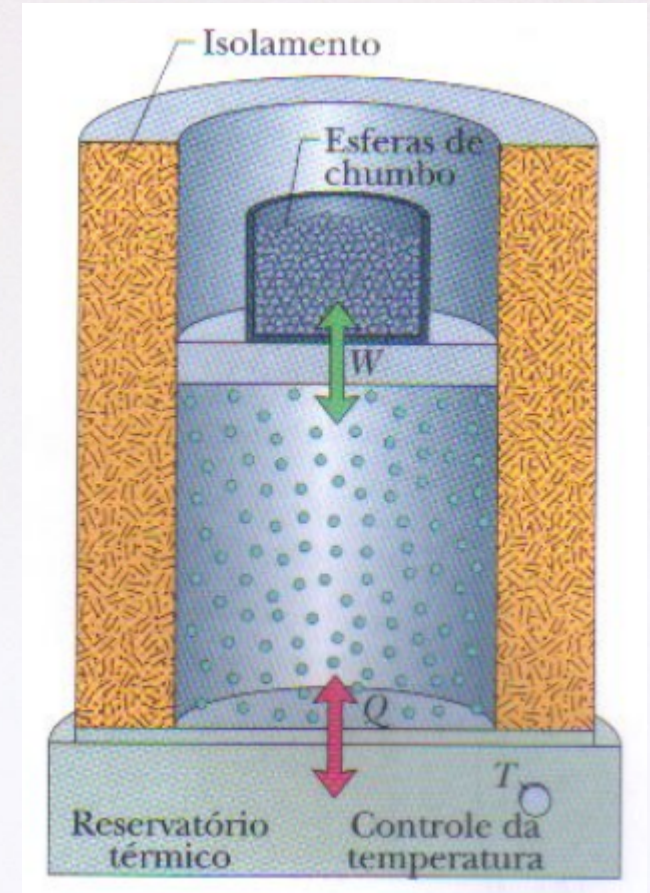


# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar





# 1ª Lei da Termodinâmica

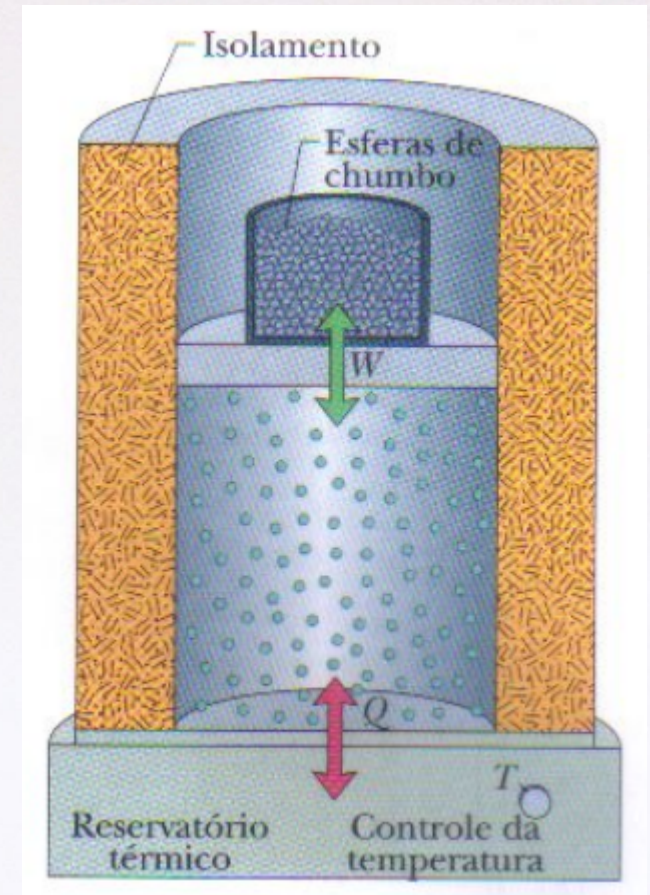
→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

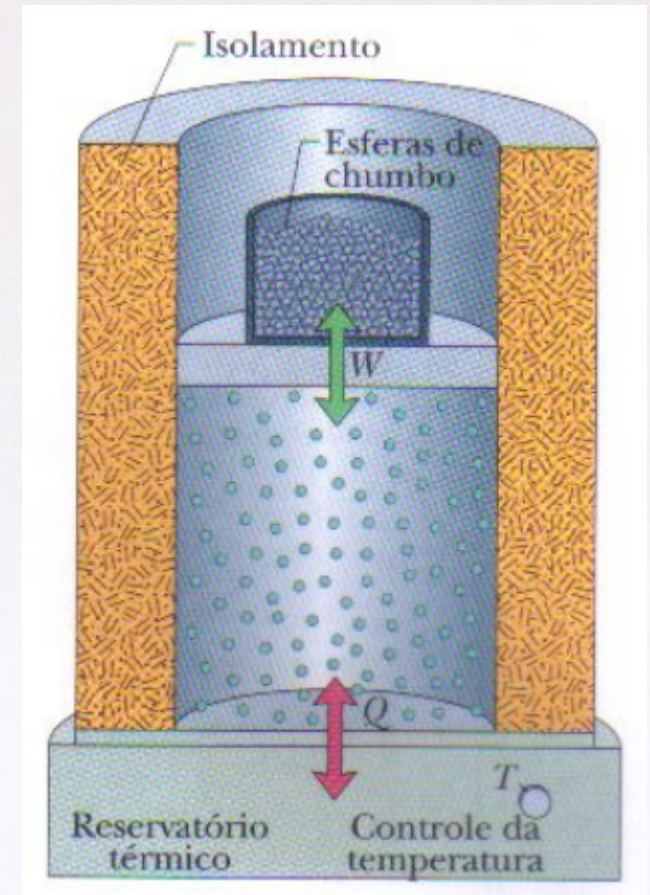
- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$c_p$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

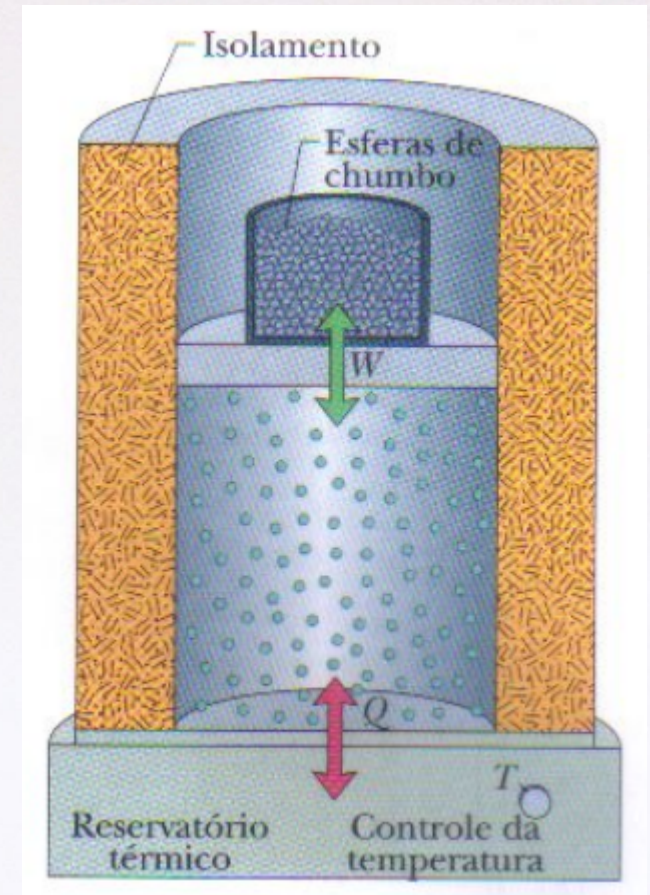
→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar
- Trabalho ( $W$ ):

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

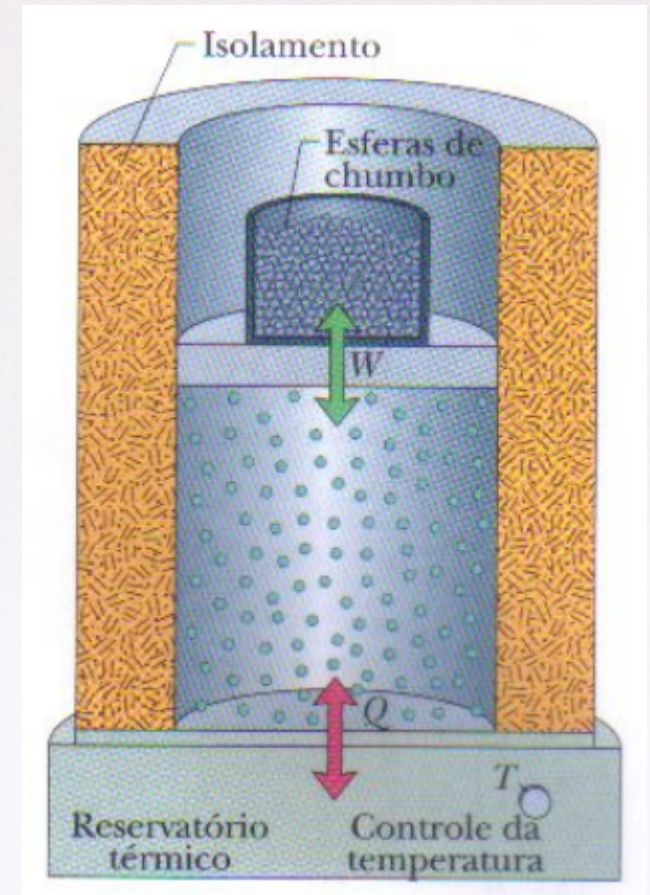
- Trabalho mec. ( $W$ ):

$$W = -\vec{F} \cdot \vec{d}$$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

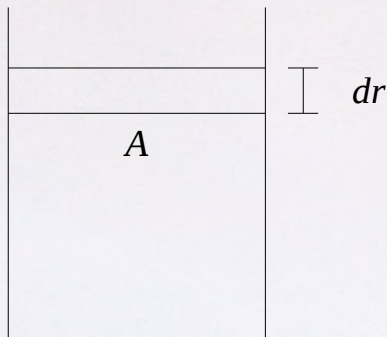
→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

- Trabalho mec. ( $W$ ):

$$W = -\vec{F} \cdot \vec{d}$$

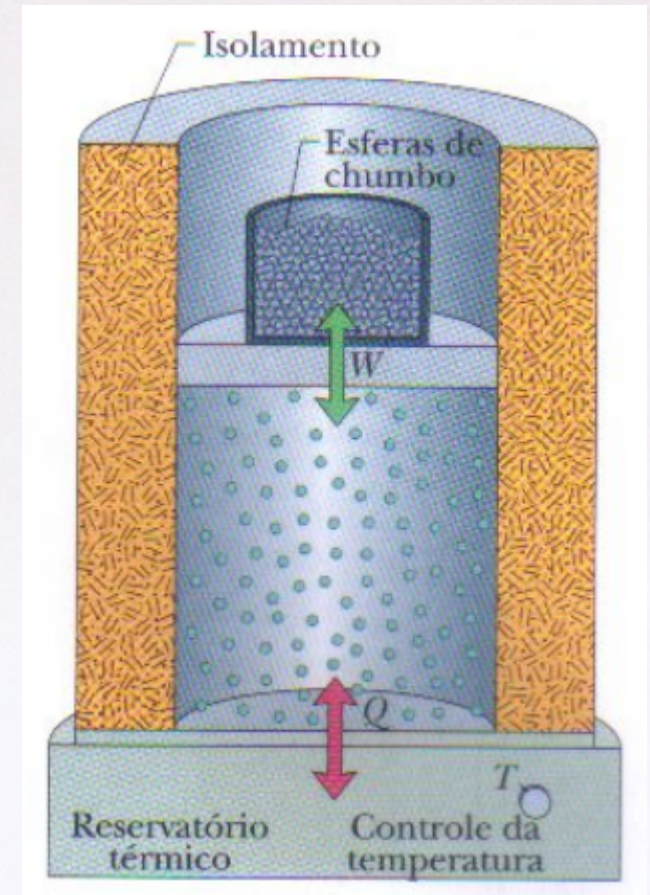
$$dW = -F dr$$



$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

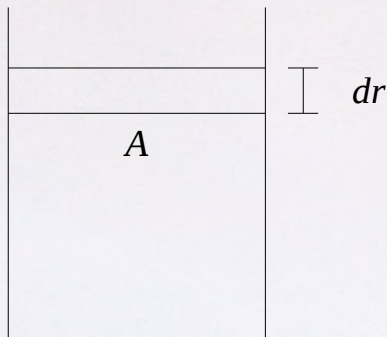
→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

- Trabalho mec. ( $W$ ):

$$W = -\vec{F} \cdot \vec{d}$$

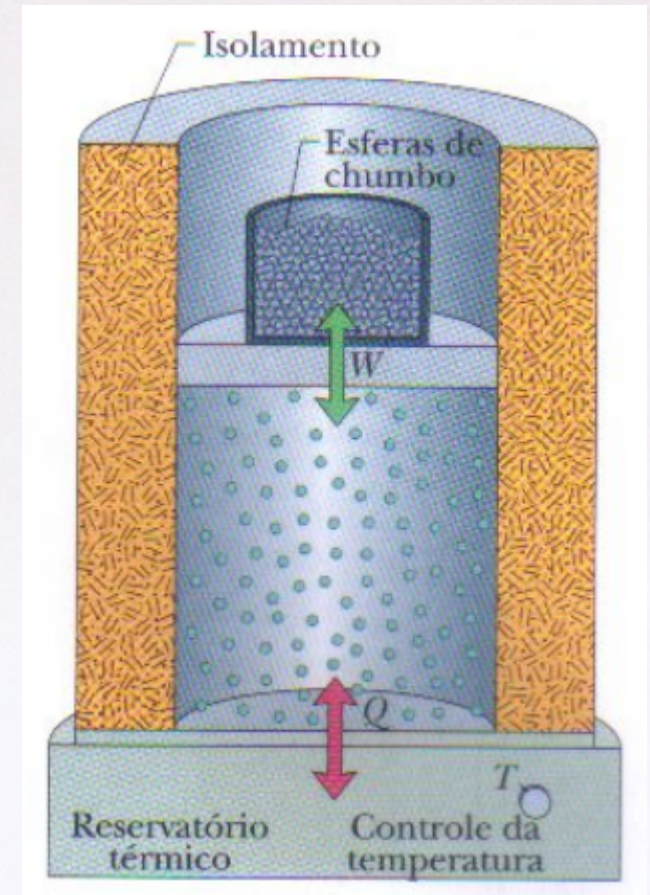
$$dW = -F dr = -(P \cdot A)(dr)$$



$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

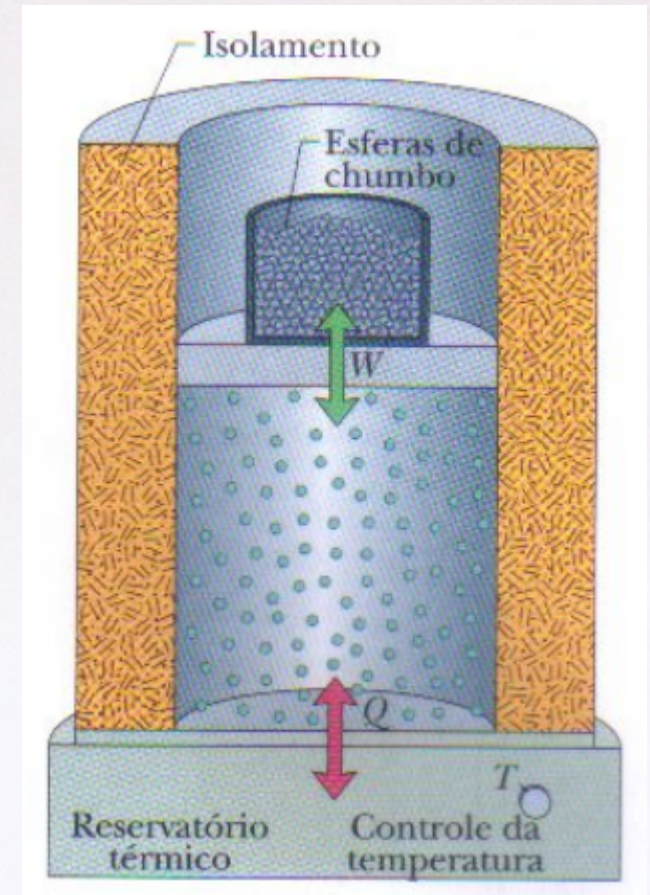
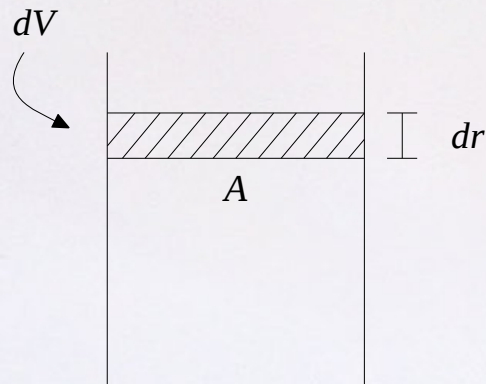
$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = \pm mL$$

- Trabalho mec. ( $W$ ):  $W = -\vec{F} \cdot \vec{d}$

$$dW = -F dr = -(P \cdot A)(dr)$$

$$dW = -(P)(A \cdot dr) = -(P)(dV)$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

- Calor ( $Q$ ) já vimos como contabilizar

$$Q = mc\Delta T$$

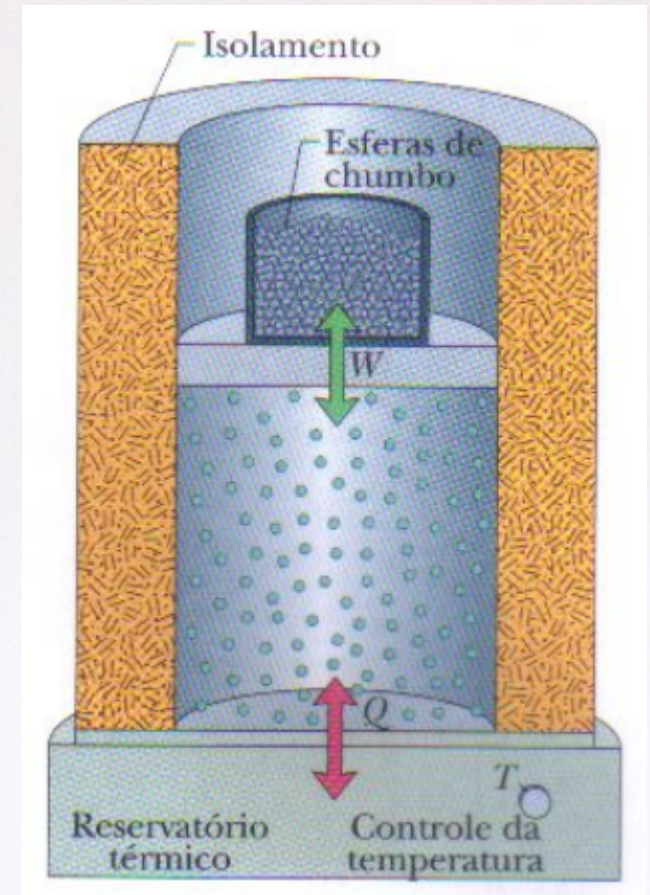
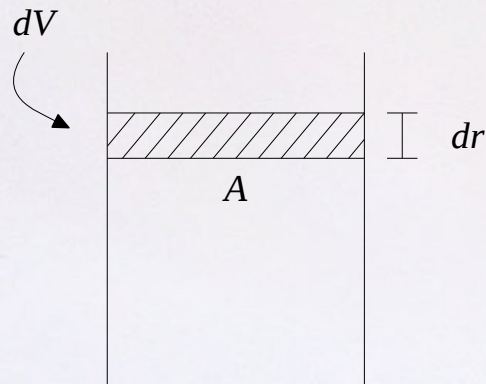
$$Q = \pm mL$$

- Trabalho mec. ( $W$ ):  $W = -\vec{F} \cdot \vec{d}$

$$dW = -F dr = -(P \cdot A)(dr)$$

$$dW = -(P)(A \cdot dr) = -(P)(dV)$$

$$W = -\int P dV$$





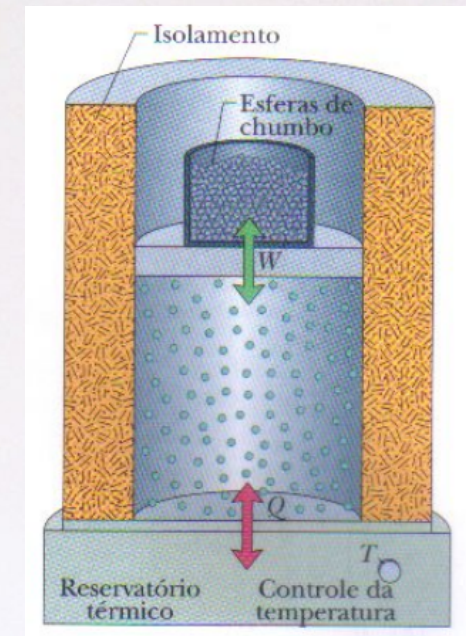
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Trabalho mec. ( $\mathcal{W}$ ):

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

$$\mathcal{W} = \quad ?$$





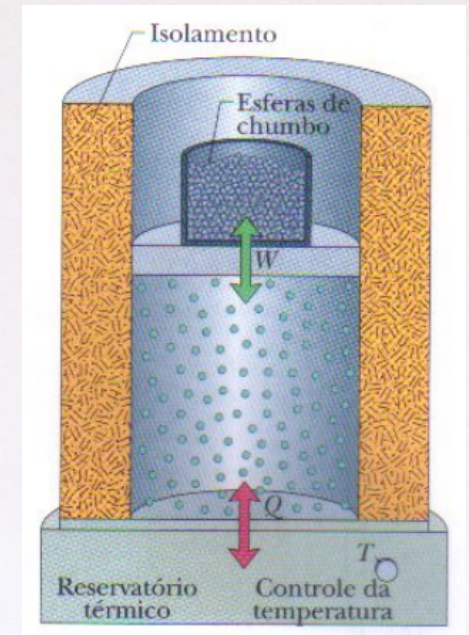
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

- Trabalho ( $\mathcal{W}$ ):

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

$$\mathcal{W} = \mathcal{W}_{mec} + \mathcal{W}_e + \mathcal{W}_m + \dots$$





# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

• Trabalho ( $W$ ):

$$W = W_{mec} + W_e + W_m + \dots$$

Podemos ter realização de trabalho sem variação de volume.

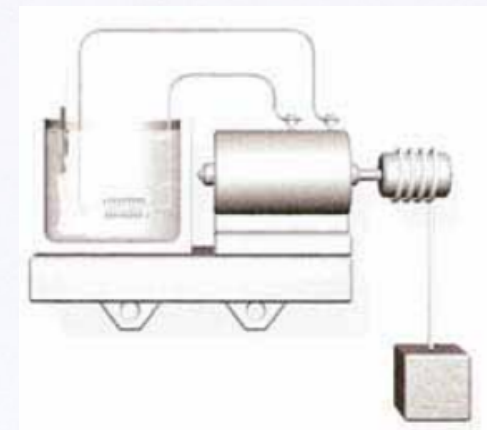
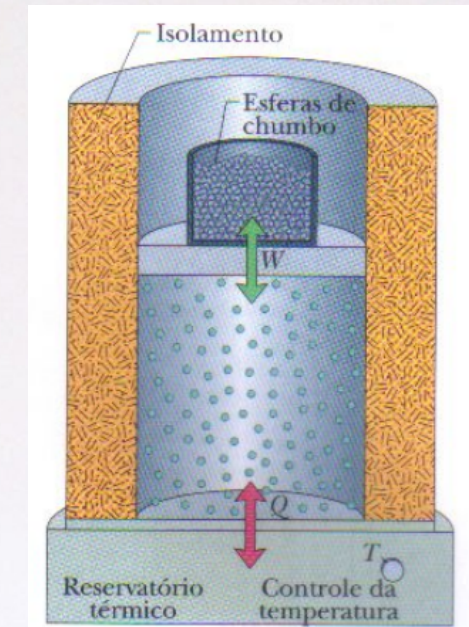
Exemplos:

- agitação da água no experimento de Joule
- um resistor que transfere energia para o sistema através de uma corrente elétrica.  
(o gerador de corrente elétrica realiza trabalho sobre o sistema)

Podemos ter variação de volume sem realização de trabalho

Exemplo:

- expansão livre de um gás





# 1ª Lei da Termodinâmica

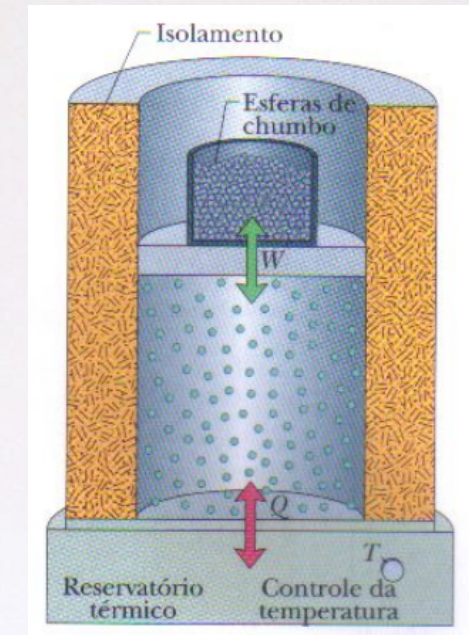
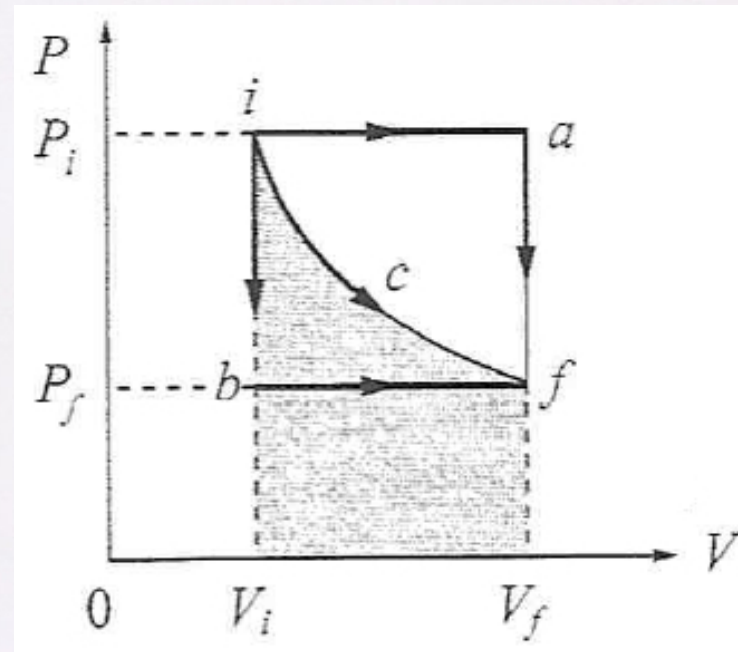
→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

• Trabalho ( $W$ ):

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$ :





# 1ª Lei da Termodinâmica

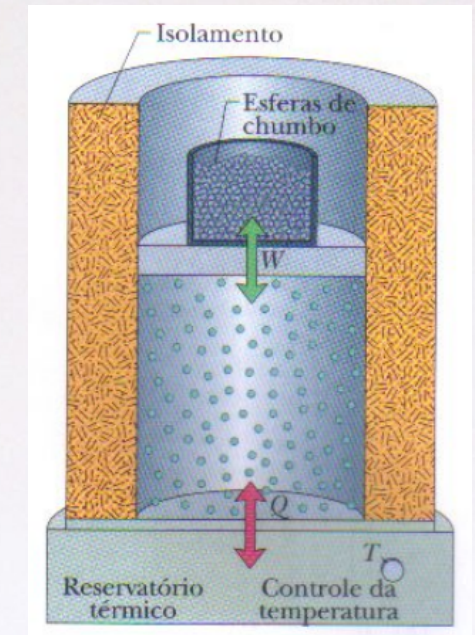
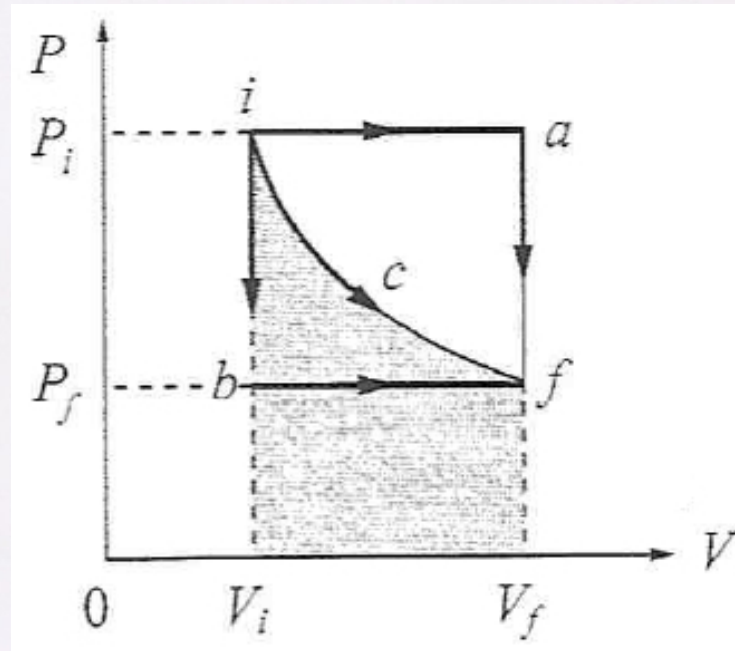
→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

• Trabalho ( $W$ ):

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$ :



$$\Delta U = U_f - U_i$$



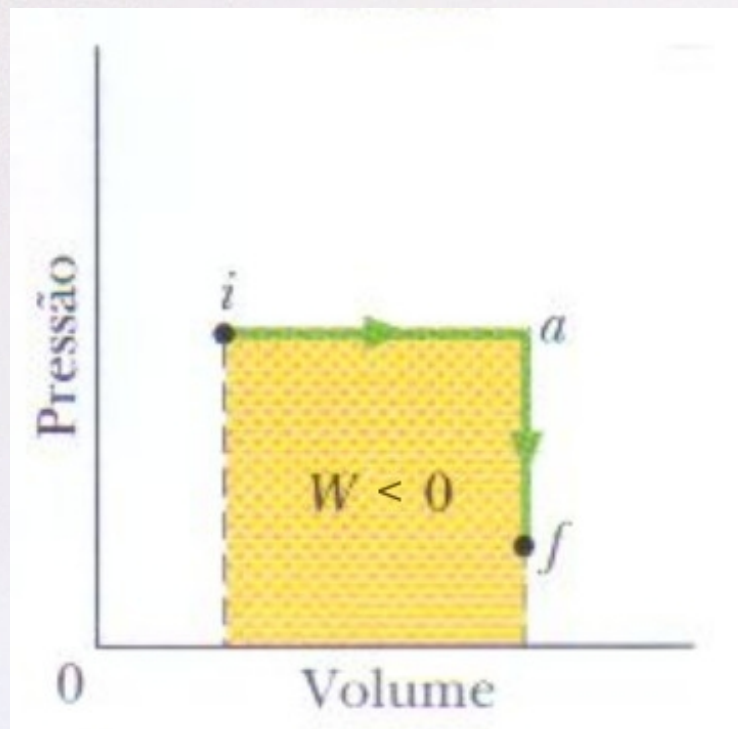
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$  :



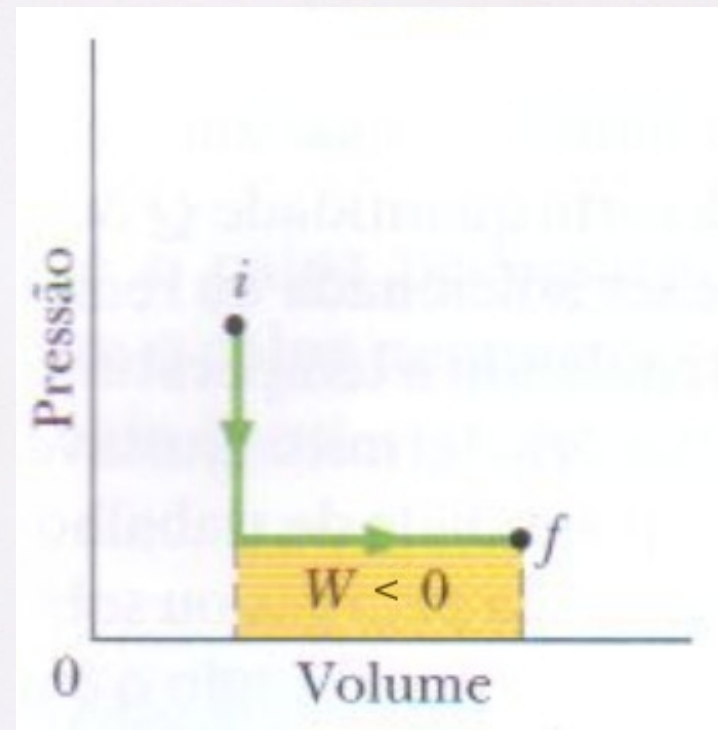
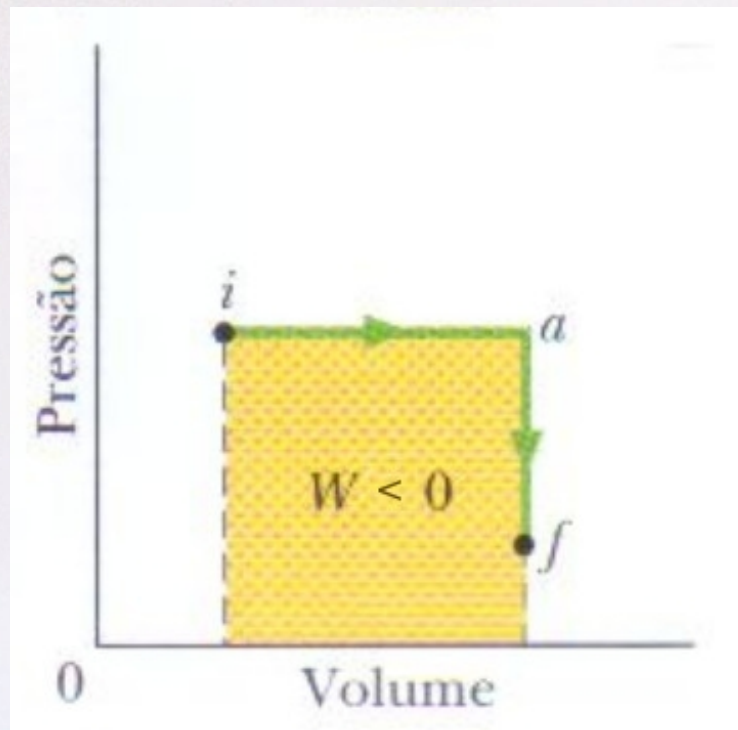
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$ :





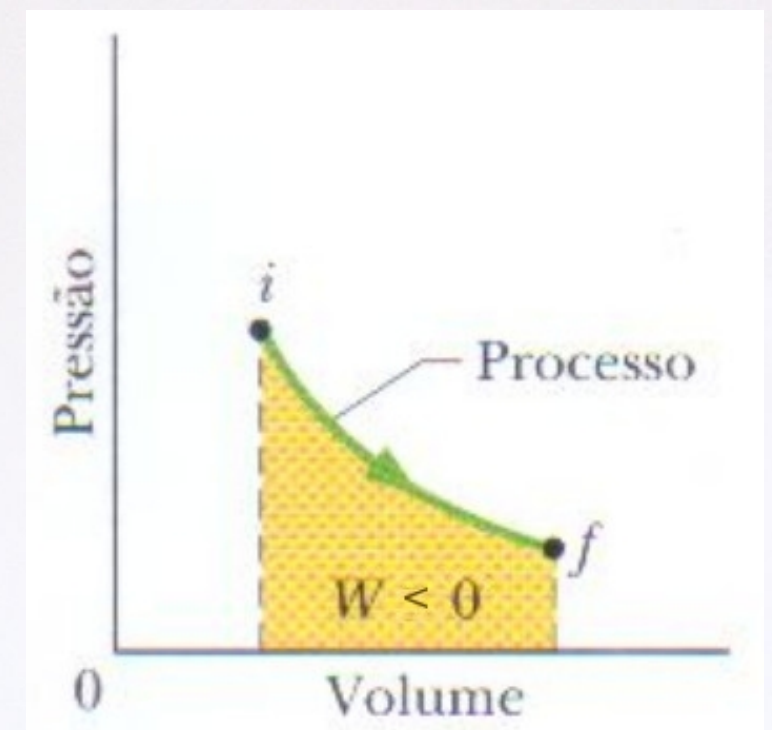
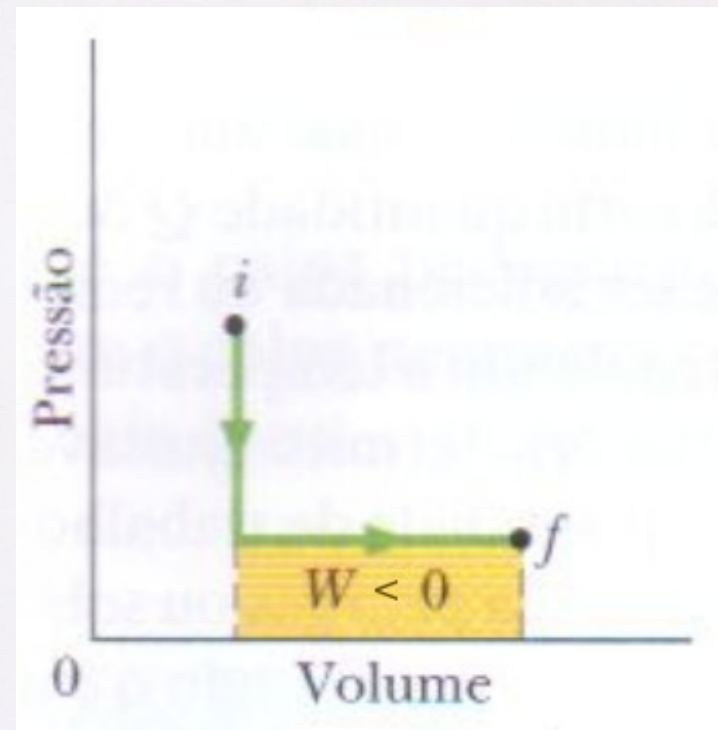
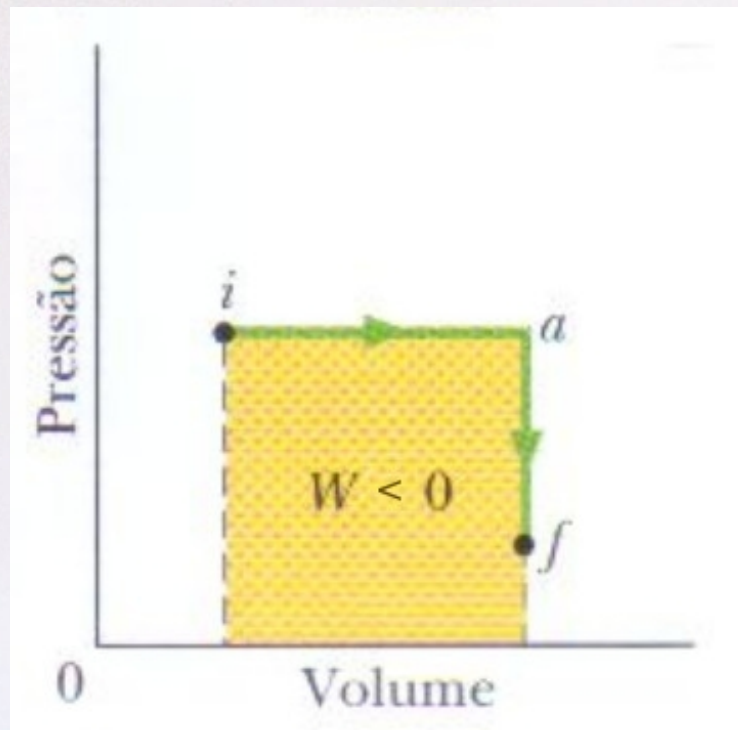
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$ :



# 1ª Lei da Termodinâmica

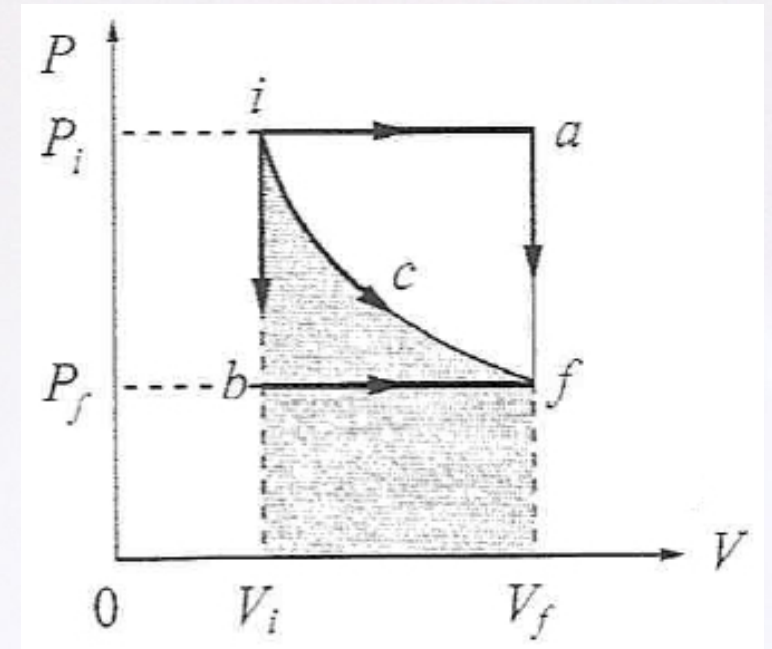
→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = - \int P dV$$

$\Delta U$  : não depende do caminho

$Q$  e  $W$  : dependem do caminho





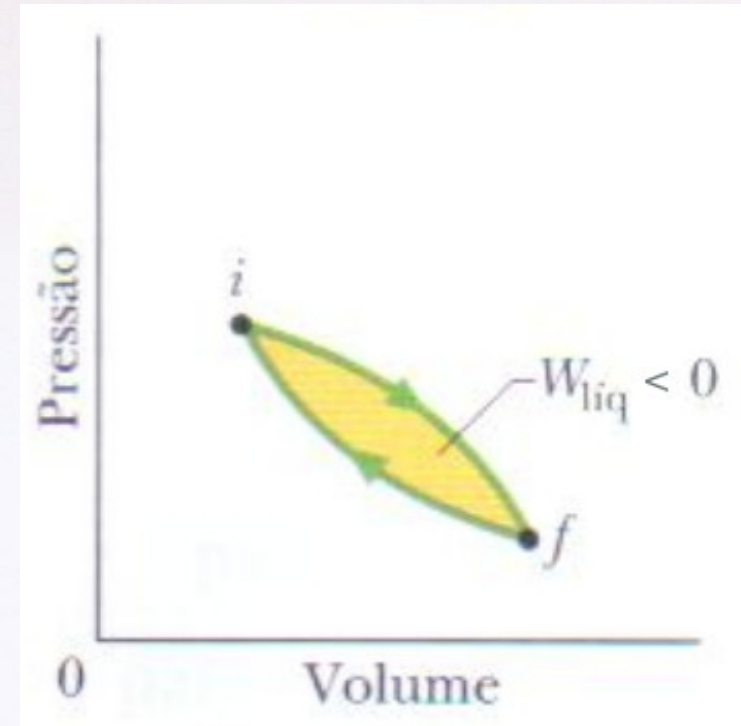
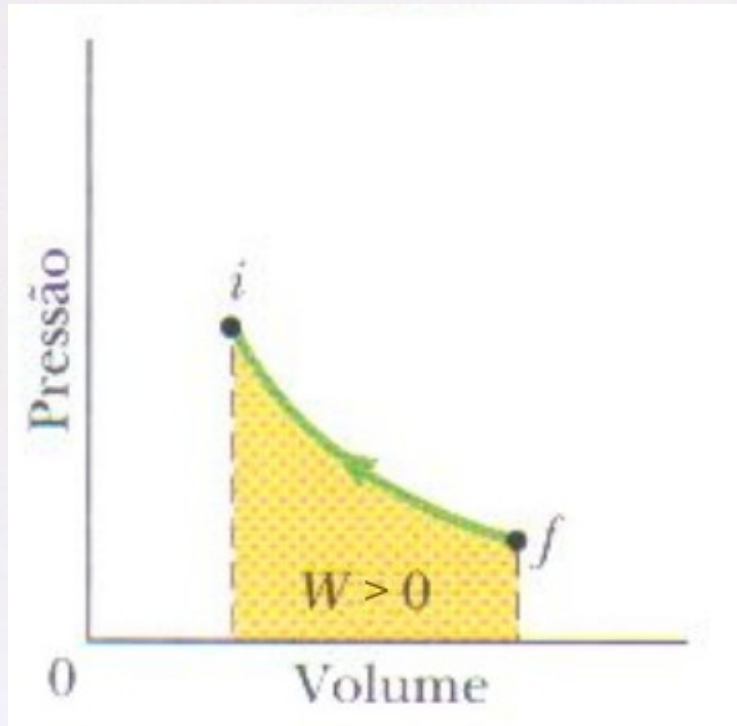
# 1ª Lei da Termodinâmica

→ Calor, Trabalho e Energia interna

$$\Delta U = Q + W$$

$$W = - \int P dV$$

- Diagrama  $P \times V$ :



Sentido horário:

$$W < 0$$



Sentido anti-horário:

$$W > 0$$

# 1ª Lei da Termodinâmica

## Casos Especiais

<b>Processo</b>	<b>Restrição</b>	<b>Consequência</b>
Adiabático	$Q = 0$	$\Delta U = \mathcal{W}$
Isocórico	$\mathcal{W} = 0$	$\Delta U = Q$
Cíclico	$\Delta U = 0$	$Q = -\mathcal{W}$
Expansão livre	$Q = \mathcal{W} = 0$	$\Delta U = 0$

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$



# 1ª Lei da Termodinâmica

$$\Delta U = Q + \mathcal{W}$$

## Casos Especiais

Processo	Restrição	Consequência
Adiabático	$Q = 0$	$\Delta U = \mathcal{W}$
Isocórico	$\mathcal{W} = 0$	$\Delta U = Q$
Cíclico	$\Delta U = 0$	$Q = -\mathcal{W}$
Expansão livre	$Q = \mathcal{W} = 0$	$\Delta U = 0$

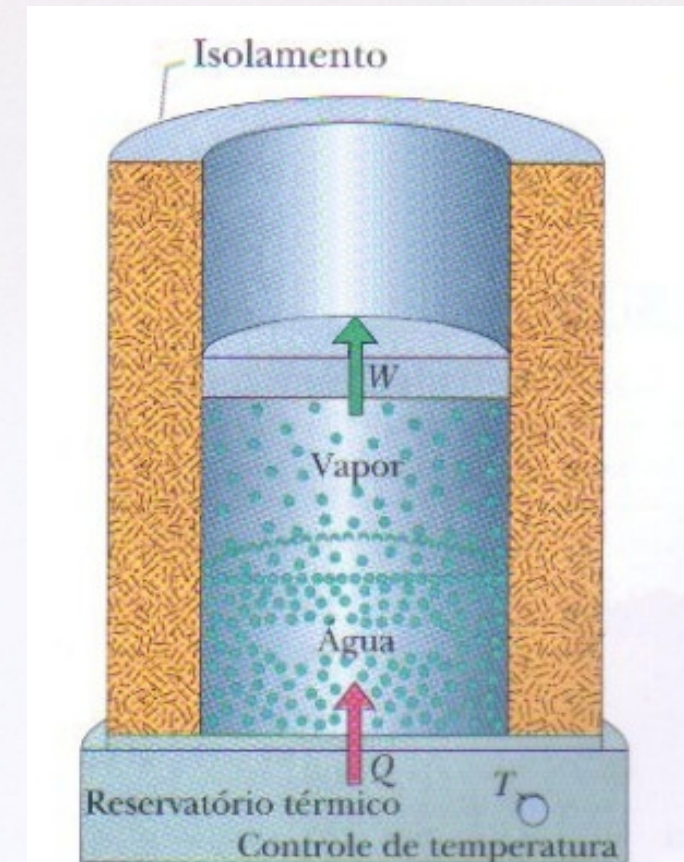
## Outros

Isobárico	$P = \text{cte}$	$\mathcal{W} = -P \Delta V$
Isotérmico <small>[gás ideal <math>U=U(T)</math>]</small>	$\Delta U = 0$	$Q = -\mathcal{W}$
Sistema Isolado	$Q = \mathcal{W} = 0$	$\Delta U = 0 ; U = \text{cte}$

# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: A massa de 1,00 kg de água a 100 °C é convertida em vapor a 100 °C em pressão constante (1 atm). O volume de água varia de um valor inicial de  $1,000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  (1L) no estado líquido para  $1,671 \text{ m}^3$  (1671 L) como vapor.

- (a) Qual o valor do trabalho envolvido no processo?
- (b) Quanto de energia térmica foi transferida durante o processo?
- (c) Qual é a variação da energia interna do sistema durante o processo?





# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: A massa de 1,00 kg de água a 100 °C é convertida em vapor a 100 °C em pressão constante (1 atm). O volume de água varia de um valor inicial de  $1,000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  (1L) no estado líquido para  $1,671 \text{ m}^3$  (1671 L) como vapor.

**(a) Qual o valor do trabalho envolvido no processo?** [realizado pelo sistema ou sobre o sistema?]

O trabalho realizado pelo sistema é negativo  $\mathcal{W} < 0$ , pois  $\Delta V > 0$  e parte da energia sai do sistema

$$(P = \text{cte}) \quad \mathcal{W} = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = -P \int_{V_i}^{V_f} dV = -P(V_f - V_i)$$

$$\mathcal{W} = -(1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa})(1,671 \text{ m}^3 - 1,000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$\mathcal{W} = -(1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa})(1,670 \text{ m}^3)$$

$$\mathcal{W} = -1,69 \cdot 10^5 \text{ J} = \underline{\underline{-169 \text{ kJ}}}$$

# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: A massa de 1,00 kg de água a 100 °C é convertida em vapor a 100 °C em pressão constante (1 atm). O volume de água varia de um valor inicial de  $1,000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  (1L) no estado líquido para  $1,671 \text{ m}^3$  (1671 L) como vapor.

**(b) Quanto de energia térmica foi transferida durante o processo?**

(liq → vapor  $Q > 0$ )

$$Q = m L_V$$

$$Q = (1,00 \text{ kg})(2256 \text{ kJ/kg})$$

$$Q = \underline{2256 \text{ kJ}}$$



# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: A massa de 1,00 kg de água a 100 °C é convertida em vapor a 100 °C em pressão constante (1 atm). O volume de água varia de um valor inicial de  $1,000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  (1L) no estado líquido para  $1,671 \text{ m}^3$  (1671 L) como vapor.

**(c) Qual é a variação da energia interna do sistema durante o processo?**

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q = 2256 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = 2256 - 169$$

$$W = -169 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = \underline{2087 \text{ kJ}} \quad (2,09 \text{ MJ})$$

A energia interna aumentou no processo de ebulição e expansão no volume ocupado pela substância na nova fase (transição de fases + expansão). Da energia fornecida ao sistema (2256 kJ) uma parte ( $169/2256 = 7,5\%$ ) foi utilizada para o vapor se expandir, isto é, abrir caminho na atmosfera. O restante aumentou a energia interna do sistema a fim de manter as moléculas de água dissociadas em relação estado líquido.

# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: Um sistema termodinâmico é constituído de 3,0 kg de água a 80 °C. Mediante agitação da água, realiza-se 25,0 kJ de trabalho sobre o sistema e ao mesmo tempo removem-se 15,0 kcal de energia térmica. Determine:

- (a) A variação da energia interna.
- (b) A temperatura final do sistema.



# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: Um sistema termodinâmico é constituído de 3,0 kg de água a 80 °C. Mediante agitação da água, realiza-se 25,0 kJ de trabalho sobre o sistema e ao mesmo tempo removem-se 15,0 kcal de energia térmica. Determine:

## (a) A variação da energia interna.

Converter unidade:

$$(15,0 \cdot 10^3 \text{ cal}) (4,186 \text{ J/cal}) = 62,8 \cdot 10^3 \text{ J}$$

Energia térmica removida do sistema ( $Q < 0$ ):

$$Q = -62,8 \text{ kJ}$$

Trabalho sobre o sistema ( $W > 0$ ):

$$W = 25,0 \text{ kJ}$$

Variação da energia interna:

$$\Delta U = Q + W = -62,8 + 25,0 = \underline{\underline{-37,8 \text{ kJ}}}$$

# 1ª Lei da Termodinâmica

Exemplo: Um sistema termodinâmico é constituído de 3,0 kg de água a 80 °C. Mediante agitação da água, realiza-se 25,0 kJ de trabalho sobre o sistema e ao mesmo tempo removem-se 15,0 kcal de energia térmica. Determine:

**(b) A temperatura final do sistema.**

$$T_i = 80 \text{ °C}$$

$$c = 4,186 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\Delta T = T_f - T_i \quad \Rightarrow \quad T_f = T_i + \Delta T$$

$$Q = m c \Delta T$$

Energia efetivamente retirada do sistema  $\rightarrow \Delta U = -37,8 \text{ kJ}$

$$\Delta T = \frac{(-37,8 \text{ kJ})}{(3,0 \text{ kg})(4,186 \text{ kJ/kg.K})} = -3,0 \text{ K} = -3,0 \text{ °C}$$

$$T_f = T_i + \Delta T = -3 + 80 = \underline{77 \text{ °C}}$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

# Propriedades dos Gases

**Processos termodinâmicos:** são transformações que produzem alterações nas variáveis termodinâmicas que definem o estado do sistema.

**Estado:** condição em que se encontra um sistema, do ponto de vista macroscópico, descrita por suas variáveis ou propriedades termodinâmicas (exemplo:  $T$ ,  $P$ ,  $V$ ).

quantidade – relacionada à massa ( $m$ )

Na Termodinâmica existem grandezas físicas sem uma interpretação devida sobre sua natureza (exemplo:  $T$ ,  $P$ ,  $S$ ), elas são usadas como **variáveis de estado** para fins de cálculos e medidas. Ganham significado na Mecânica Estatística.

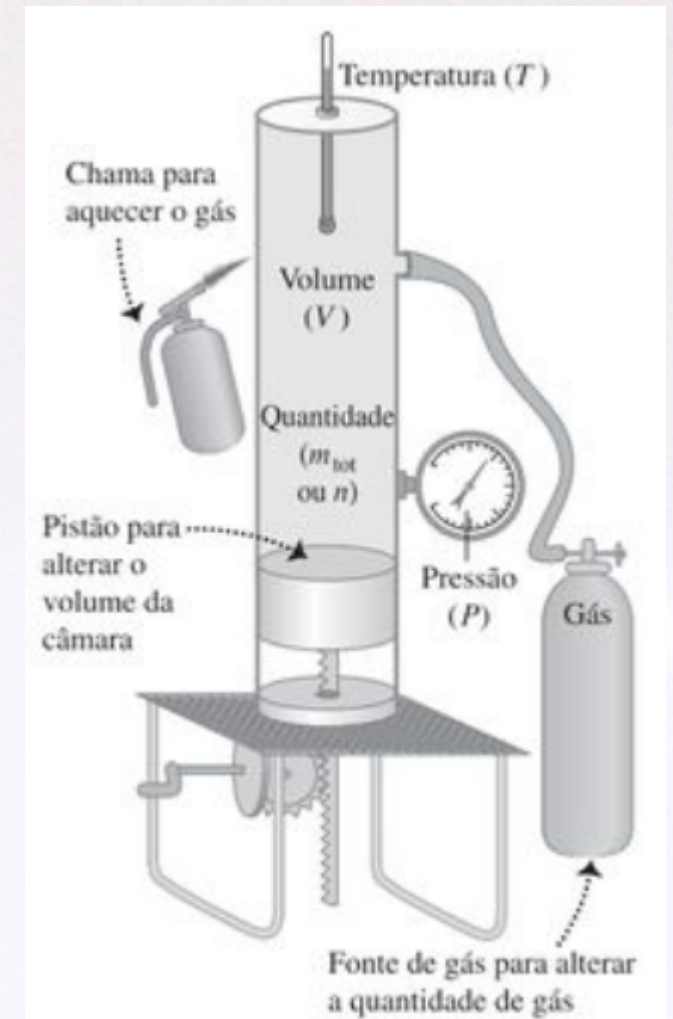
Há relações algébricas entre as variáveis de estado e estas relações são chamadas de **equações de estado**.

As equações de estado não são deduções baseadas em alguma teoria, são fruto de observações experimentais, visto a Termodinâmica ser fenomenológica. Cada sistema possui a sua equação de estado com validade dentro de um certo intervalo de valores.



# Propriedades dos Gases

Observações experimentais para uma dada quantidade de gás:



# Propriedades dos Gases

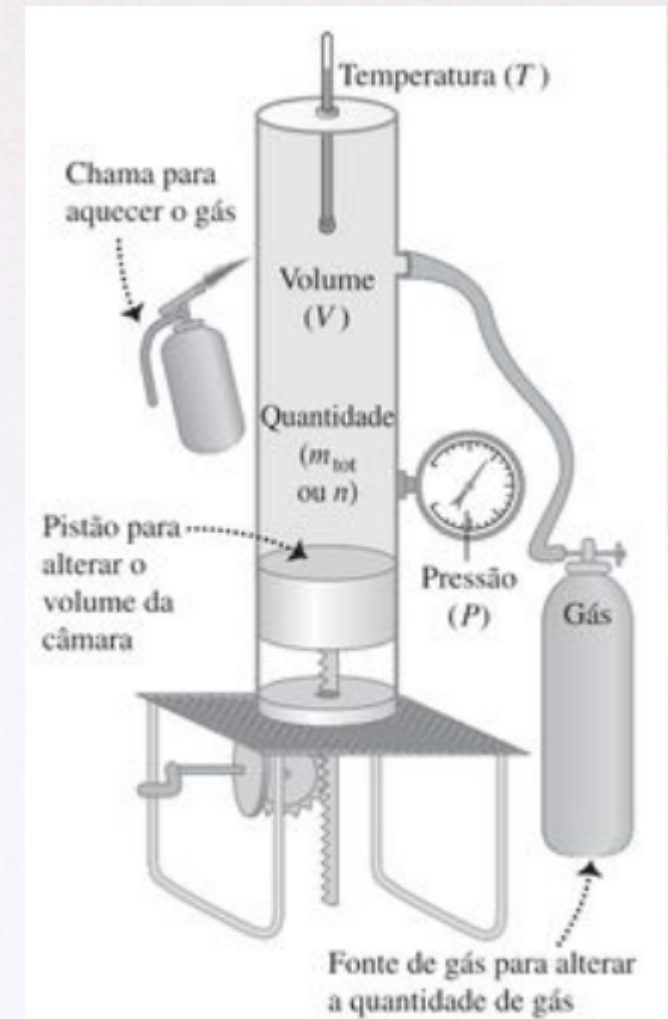
Observações experimentais para uma dada quantidade de gás:

- Lei de Boyle (1662) e Marriot (1676):

$$T = \text{cte} \quad ;$$

$$P \propto \frac{1}{V}$$

$$PV = \text{cte}$$





# Propriedades dos Gases

Observações experimentais para uma dada quantidade de gás:

- Lei de Boyle (1662) e Marriot (1676):

$$T = \text{cte} \quad ;$$

$$P \propto \frac{1}{V}$$

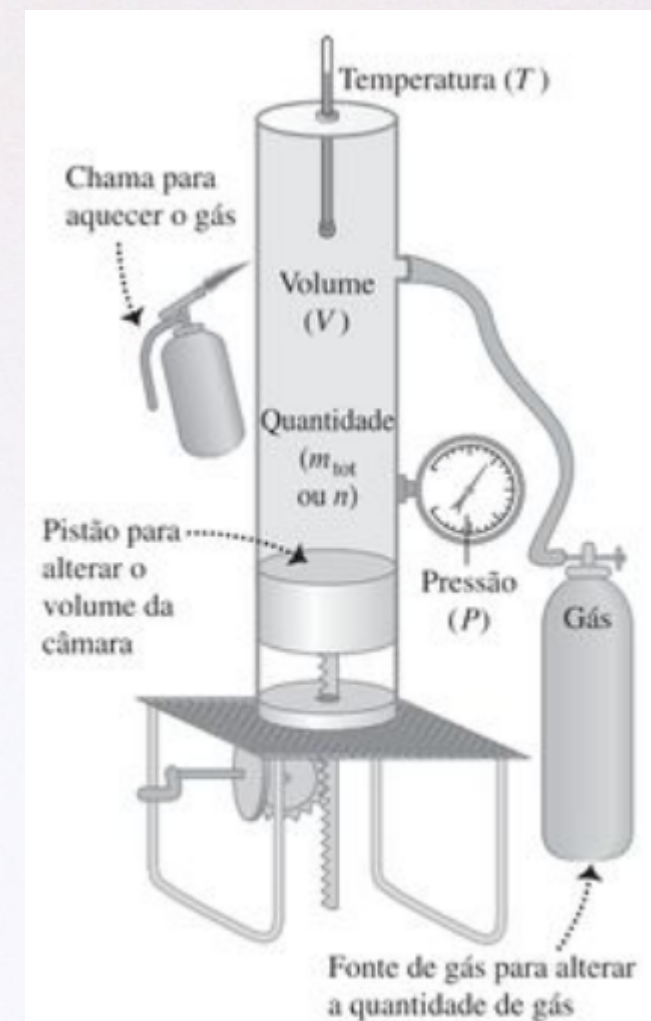
$$PV = \text{cte}$$

- Lei de Charles (1787):

$$P = \text{cte} \quad ;$$

$$V \propto T$$

$$\frac{V}{T} = \text{cte}$$



# Propriedades dos Gases

Observações experimentais para uma dada quantidade de gás:

- Lei de Boyle (1662) e Marriot (1676):

$$T = \text{cte} \quad ;$$

$$P \propto \frac{1}{V}$$

$$PV = \text{cte}$$

- Lei de Charles (1787):

$$P = \text{cte} \quad ;$$

$$V \propto T$$

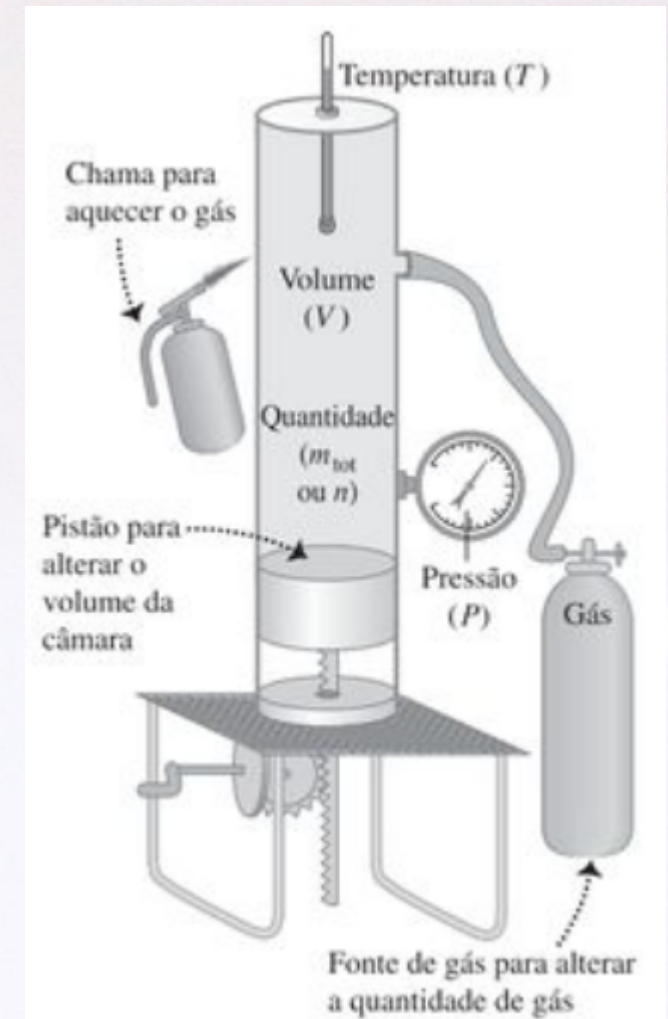
$$\frac{V}{T} = \text{cte}$$

- Lei de Gay-Lussac (1802):

$$V = \text{cte} \quad ;$$

$$P \propto T$$

$$\frac{P}{T} = \text{cte}$$





# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

- Hipótese de Avogadro (1811):

“Volumes iguais de gases diferentes, sob as mesmas condições de pressão e de temperatura, contêm igual número de moléculas.”

CNTP:

$$V = 22,415 \text{ L}$$

**Volume molar:**

$$22,415 \text{ L/mol}$$

(CNTP)

	He	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Volume	22,4 L	22,4 L	22,4 L
Pressão	1 atm	1 atm	1 atm
Temperatura	0 °C	0 °C	0 °C
Massa do gás	4,00 g	28,0 g	16,0 g
	1 mol	1 mol	1 mol

# Propriedades dos Gases

- Lei de Avogadro (1811):

“O volume de gás a uma dada pressão é diretamente proporcional à quantidade de substância do gás”



# Propriedades dos Gases

- Lei de Avogadro (1811):

“O volume de gás a uma dada pressão é diretamente proporcional à quantidade de substância do gás”

$$P = \text{cte} ;$$
$$T = \text{cte} ;$$

$$V \propto n$$

$$\frac{V}{n} = \text{cte} \quad (V = \text{cte} \cdot n)$$

quantidade de matéria  $m$  (massa)

quantidade de substância  $n$  (mol)

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = \text{cte}$$

# Propriedades dos Gases

- Lei de Avogadro (1811):

“O volume de gás a uma dada pressão é diretamente proporcional à quantidade de substância do gás”

$$P = \text{cte} \ ;$$

$$T = \text{cte} \ ;$$

$$V \propto n$$

$$\frac{V}{n} = \text{cte} \quad (V = \text{cte} \cdot n)$$

quantidade de matéria  $m$  (massa)

quantidade de substância  $n$  (mol)

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = \text{cte}$$

**Qual o número de partículas (ou moléculas) em 1 mol ?**

Mais tarde a lei de Avogadro passou a ser expressa em termos de uma quantidade chamada número de Avogadro  $N_A$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Em 1834 Émile Clapeyron combinou as observações anteriores obtendo o que chamamos de **equação de estado** para o gás ideal, ou lei do gás ideal:

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Em 1834 Émile Clapeyron combinou as observações anteriores obtendo o que chamamos de **equação de estado** para o gás ideal, ou lei do gás ideal:

$T = \text{cte} ;$	$V \propto \frac{1}{P}$	$PV = \text{cte}$
$P = \text{cte} ;$	$V \propto T$	$\frac{V}{T} = \text{cte}$
$V = \text{cte} ;$	$P \propto T$	$\frac{P}{T} = \text{cte}$
$P = \text{cte} ;$	$V \propto n$	$\frac{V}{n} = \text{cte}$
$T = \text{cte} ;$		



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Em 1834 Émile Clapeyron combinou as observações anteriores obtendo o que chamamos de **equação de estado** para o gás ideal, ou lei do gás ideal:

$T = \text{cte} ;$	$V \propto \frac{1}{P}$	$PV = \text{cte}$
$P = \text{cte} ;$	$V \propto T$	$\frac{V}{T} = \text{cte}$
$V = \text{cte} ;$	$P \propto T$	$\frac{P}{T} = \text{cte}$
$P = \text{cte} ;$	$V \propto n$	$\frac{V}{n} = \text{cte}$
$T = \text{cte} ;$		

Assim:

$$V \propto \frac{nT}{P}$$

$$PV \propto nT$$

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Então:

$$PV \propto nT$$

$$\boxed{PV = nRT}$$

(Eq. de estado  
do gás ideal)

ou

$$PV = N k_B T$$

Onde:

$N$  é o número de partículas (ou moléculas) do gás

$R$  é a constante dos gases ideais  $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$

$k_B$  é a constante de Boltzmann  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$$R = \frac{PV}{nT}$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$R = \frac{PV}{nT}$$

CNTP:

$$P = 1 \text{ atm (101,32 kPa)} \quad ; \quad T = 0 \text{ }^\circ\text{C (273,15 K)}$$

$$n = 1 \text{ mol} \quad ; \quad V = 22,415 \text{ L (22,415} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$R = \frac{PV}{nT}$$

CNTP:

$$P = 1 \text{ atm (101,32 kPa)} \quad ; \quad T = 0 \text{ °C (273,15 K)}$$

$$n = 1 \text{ mol} \quad ; \quad V = 22,415 \text{ L (22,415} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$R = \frac{PV}{nT}$$

CNTP:

$$P = 1 \text{ atm (101,32 kPa)} \quad ; \quad T = 0 \text{ }^\circ\text{C (273,15 K)}$$

$$n = 1 \text{ mol} \quad ; \quad V = 22,415 \text{ L (22,415} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

**TABELA 10.2** Valores numéricos da constante dos gases,  $R$ , em várias unidades

Unidades	Valores numéricos
L atm/mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,08206
J/mol <sup>-1</sup> K <sup>-1a</sup>	8,314
cal/mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1,987
m <sup>3</sup> Pa/mol <sup>-1</sup> K <sup>-1a</sup>	8,314
L torr/mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	62,36

<sup>a</sup> Unidade SI.

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$PV = nRT$$

- Observando algumas relações vistas anteriormente:

$$PV = \text{cte}$$

$$\frac{V}{T} = \text{cte}$$

$$\frac{P}{T} = \text{cte}$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$PV = nRT$$

- Observando algumas relações vistas anteriormente:

$$PV = \text{cte} \quad \longrightarrow \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots \quad (T, n = \text{cte})$$

$$\frac{V}{T} = \text{cte}$$

$$\frac{P}{T} = \text{cte}$$

$$PV = nRT$$

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

- Observando algumas relações vistas anteriormente:

$$PV = \text{cte} \quad \longrightarrow \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots \quad (T, n = \text{cte})$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{V}{T} = \text{cte} \\ \frac{P}{T} = \text{cte} \end{array} \right\} \longrightarrow \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \dots \quad (n = \text{cte})$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

**Qual o número de  
partículas (ou moléculas)  
em 1 mol ?**

$$PV = nRT$$

$$PV = N k_B T$$

Eq. de estado  
do gás ideal

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Qual o número de  
partículas (ou moléculas)  
em 1 mol ?

$$PV = nRT$$

$$PV = N k_B T$$

Eq. de estado  
do gás ideal

O número de mols é dado em termos do número de partículas (ou moléculas)  $N$  e do número de Avogadro  $N_A$

$$N = n N_A$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Qual o número de partículas (ou moléculas) em 1 mol?

$$PV = nRT$$

$$PV = Nk_B T$$

(Eq. de estado do gás ideal)

O número de mols é dado em termos do número de partículas (ou moléculas)  $N$  e do número de Avogadro  $N_A$

$$N = n N_A \quad ; \quad n = \frac{N}{N_A} \quad ; \quad n = \frac{m}{M} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{(massa)} \\ \leftarrow \text{(massa molar)} \end{array}$$

# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

Qual o número de partículas (ou moléculas) em 1 mol ?

$$PV = nRT$$

(Eq. de estado do gás ideal)

$$PV = N k_B T$$

O número de mols é dado em termos do número de partículas (ou moléculas)  $N$  e do número de Avogadro  $N_A$

$$N = n N_A \quad ; \quad n = \frac{N}{N_A} \quad ; \quad n = \frac{m}{M} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{(massa)} \\ \leftarrow \text{(massa molar)} \end{array}$$

O número de Avogadro (e o nome) foi determinado inicialmente por Jean Perrin em 1909, outros métodos passaram a ser usados além da contribuição de outros cientistas, usando diferentes métodos. Inicialmente obteu-se:

$$(1909) \quad N_A = 7,05 \cdot 10^{23} \text{ partículas/mol}$$

$$(atual) \quad N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ entes/mol}$$



# Propriedades dos Gases

(Gás Ideal)

$$PV = nRT$$

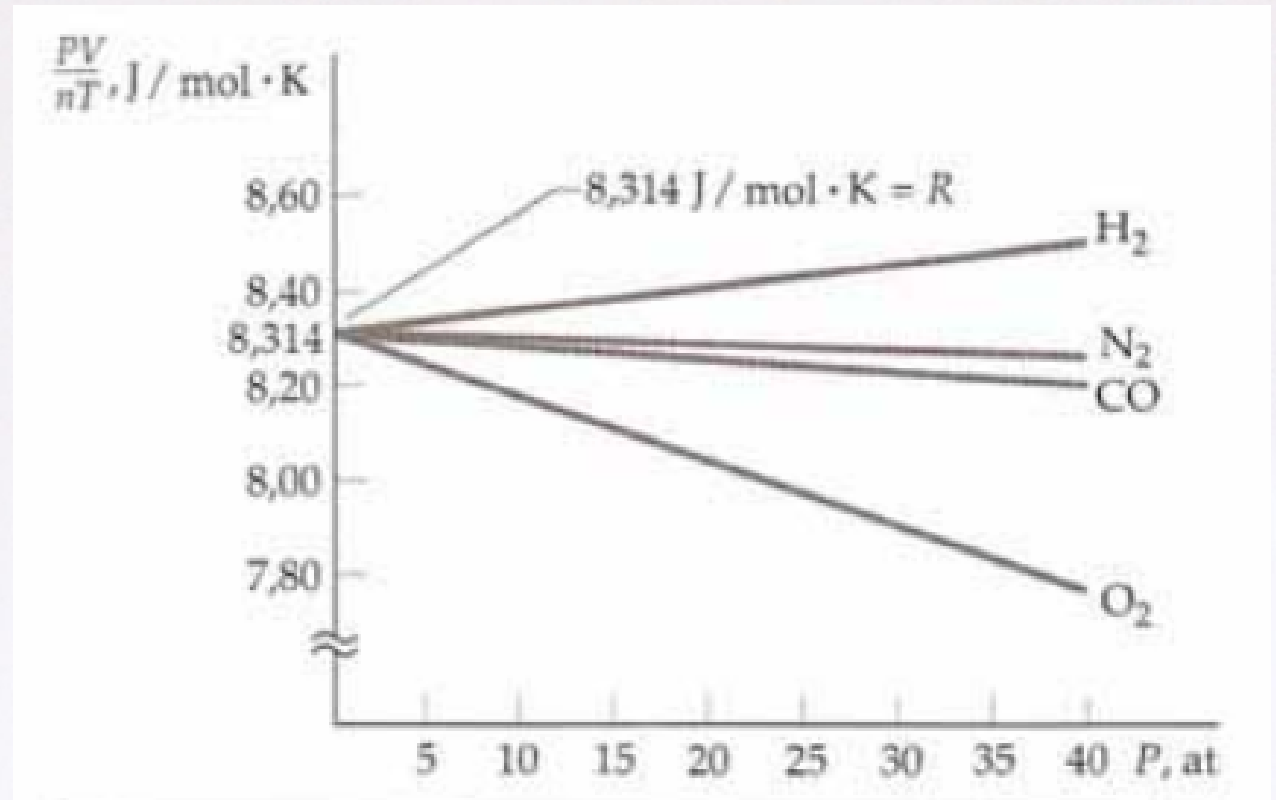
- densidade:

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

- Gás ideal:

- sem interação
- partículas sem dimensão
- sem transição de fases

(Gás real)



(gases rarefeitos – baixa pressão, tendem ao gás ideal)

# Propriedades dos Gases

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

- a) Qual a temperatura da amostra?
- b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

(mol é a unidade, a pronúncia no plural é mols, porém, continuamos a escrever a unidade 'mol')



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

$$T = \frac{PV}{nR}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{(1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa})(54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}{(2,27 \text{ mol})(8,314 \text{ J/mol.K})}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{(1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa})(54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}{(2,27 \text{ mol})(8,314 \text{ J/mol.K})}$$

$$T = 289,85 \text{ K}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

a) Qual a temperatura da amostra?

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{100 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 2,27 \text{ mol}$$

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{(1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa})(54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}{(2,27 \text{ mol})(8,314 \text{ J/mol.K})}$$

$$T = 289,85 \text{ K} = \underline{16,7 \text{ }^\circ\text{C}}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = \frac{(2,27 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/mol.K}) (289,85 \text{ K})}{(80 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = \frac{(2,27 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/mol.K}) (289,85 \text{ K})}{(80 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}$$

$$P = 0,684 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = \frac{(2,27 \text{ mol}) (8,314 \text{ J/mol.K}) (289,85 \text{ K})}{(80 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3)}$$

$$P = 0,684 \cdot 10^5 \text{ Pa} = \underline{0,675 \text{ atm}}$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

(II) b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

(Lei de Boyle/Marriot)

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

(II) b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

(Lei de Boyle/Marriot)

$$(1 \text{ atm}) (54 \text{ L}) = P_2 \cdot (80 \text{ L})$$



# Propriedades dos Gases

$$PV = nRT$$

$$R = 8,314 \text{ J/mol.K}$$

Exemplo: Uma amostra de 100 g de  $\text{CO}_2$  cuja massa molar é  $M \approx 44 \text{ g/mol}$ , ocupa o volume de 54 L na pressão de 1,0 atm. Sendo assim:

(II) b) Se o volume for aumentado para 80 L e a temperatura for mantida constante, qual a nova pressão?

$$T = 289,85 \text{ K}$$

$$n = 2,27 \text{ mol}$$

$$V = 80 \text{ L}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

(Lei de Boyle/Marriot)

$$(1 \text{ atm}) (54 \text{ L}) = P_2 \cdot (80 \text{ L})$$

$$P_2 = \underline{0,675 \text{ atm}}$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$

→ Gás real:

1ª aproximação:

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$

→ Gás real:

1ª aproximação:

$$\left( P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$

→ Gás real:

1ª aproximação:

$$\left( P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

Eq. de  
Van der Waals

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$

→ Gás real:

1ª aproximação:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right) (V - nb) = nRT$$

Eq. de  
Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) (v - b) = RT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal:

$$PV = nRT$$

→ Gás real:

1ª aproximação:

$$\left( P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

Eq. de  
Van der Waals

2ª aproximação:

...

$$\left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$



$$PV = nRT$$

(gás ideal)

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

(eq. de Van der Waals)

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{\sqrt{T}V_m(V_m + b)}$$

(eq. de Redlich-Kwong)

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$

(eq. de Peng-Robinson)

$$P = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}\right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T}\right) \rho^3 + \alpha \left(a + \frac{d}{T}\right) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2)$$

(eq. de Benedict-Webb-Rubin)

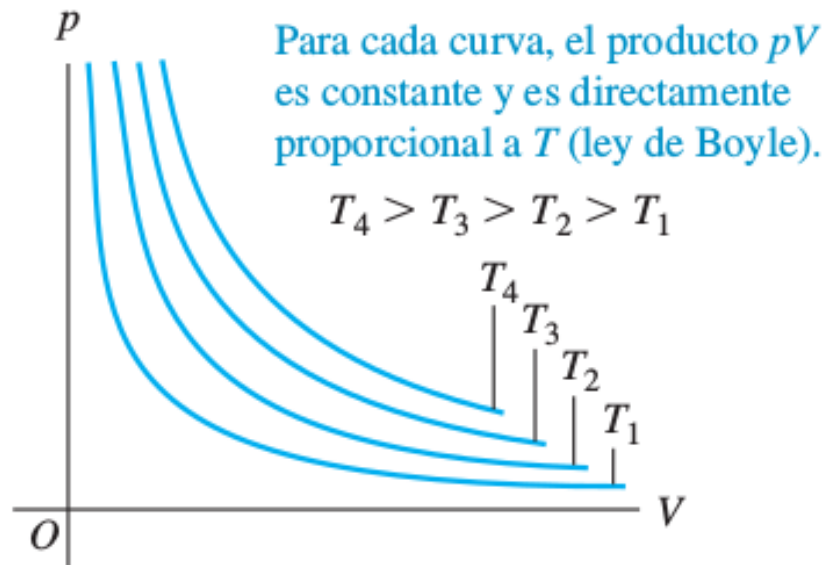


# Propriedades dos Gases

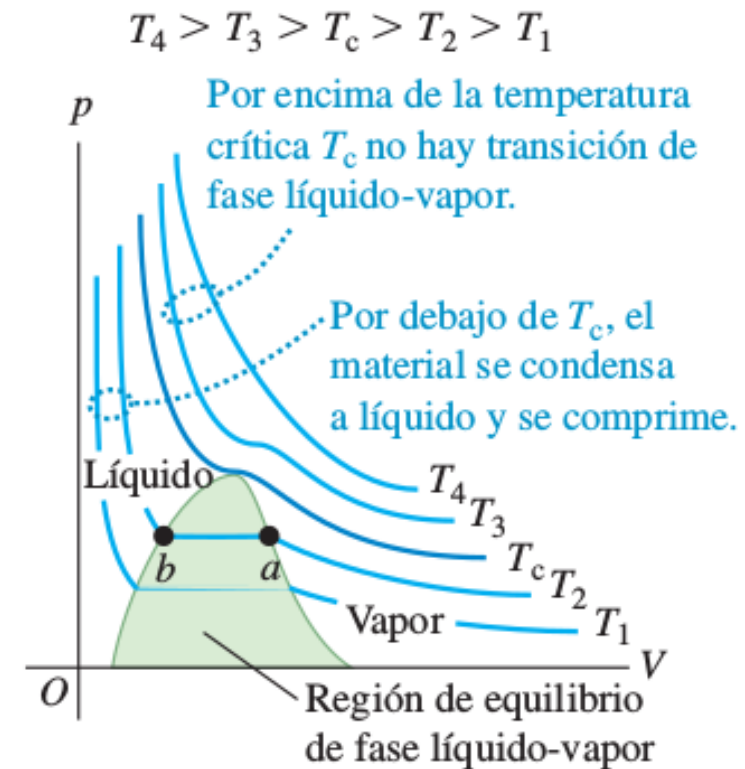
- Processo isotérmico:

(gás ideal)

$$P = \frac{nRT}{V}$$



(gás real)



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

- Trabalho em uma expansão isotérmica:



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

- Trabalho em uma expansão isotérmica:

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

- Trabalho em uma expansão isotérmica:



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

● Trabalho em uma expansão isotérmica:

$$(T = \text{cte})$$

$$P = P(V)$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

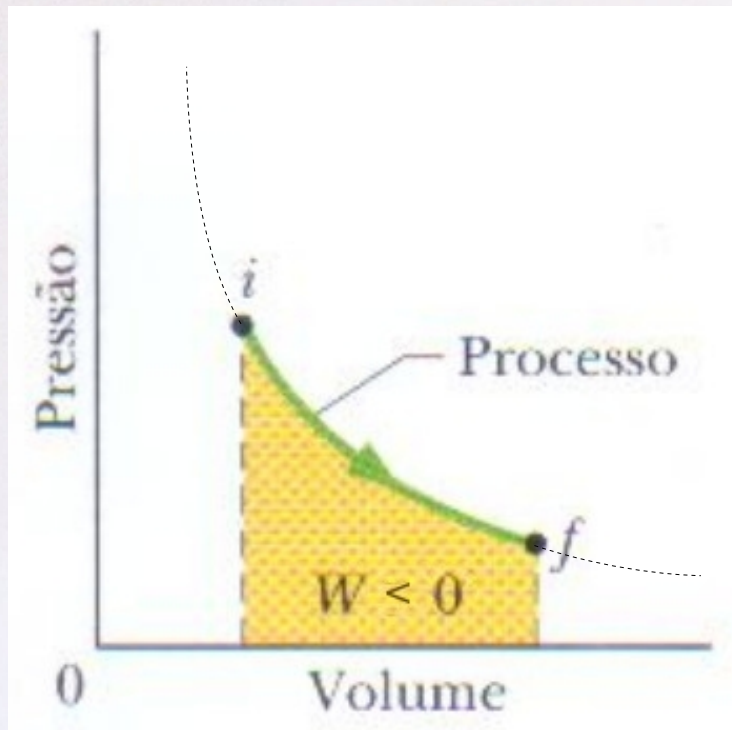
$$P = P(V, T)$$

( $n = \text{cte}$ )

● Trabalho em uma expansão isotérmica:

( $T = \text{cte}$ )

$$P = P(V)$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

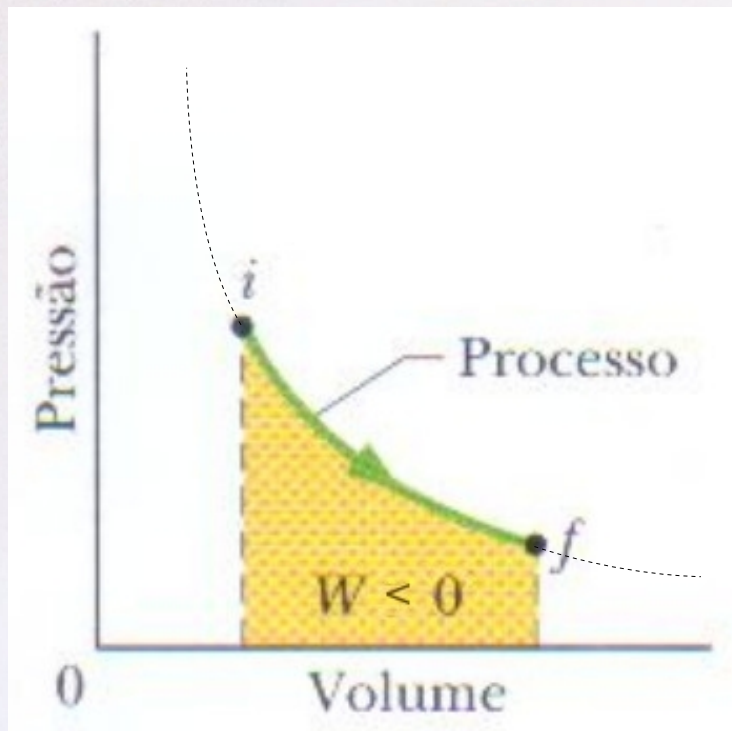
( $n = \text{cte}$ )

● Trabalho em uma expansão isotérmica:

( $T = \text{cte}$ )

$$P = P(V)$$

$$W = - \int P dV$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

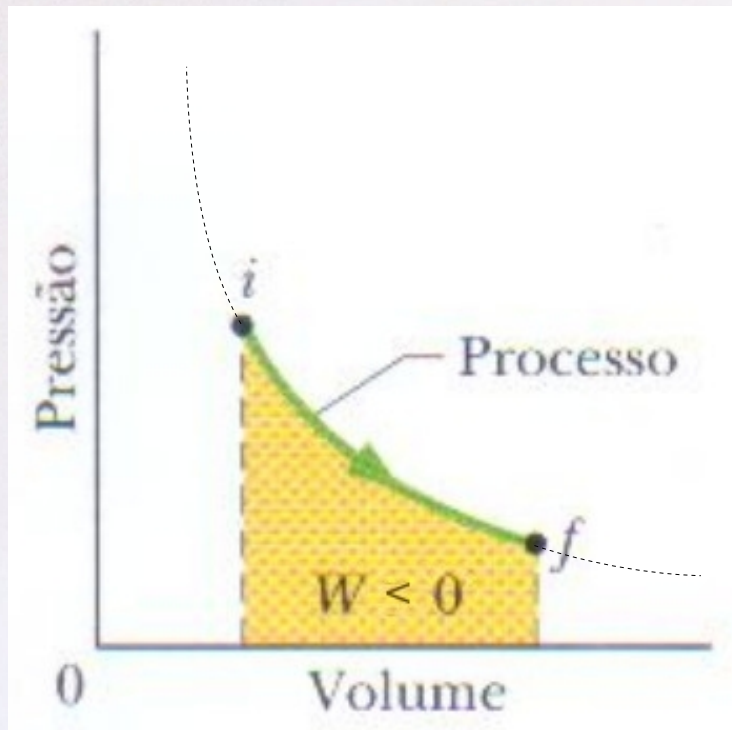
● Trabalho em uma expansão isotérmica:

( $T = \text{cte}$ )

$$P = P(V)$$

$$W = - \int P dV$$

$$W = - \int \frac{nRT}{V} dV$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

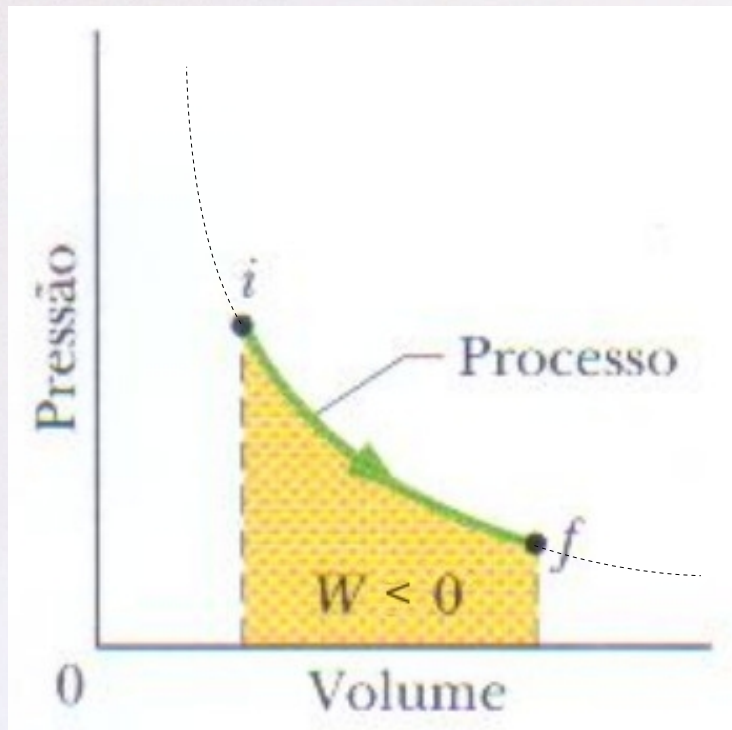
● Trabalho em uma expansão isotérmica:

( $T = \text{cte}$ )

$$P = P(V)$$

$$W = - \int P dV$$

$$W = - \int \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Trabalho em uma expansão isotérmica:

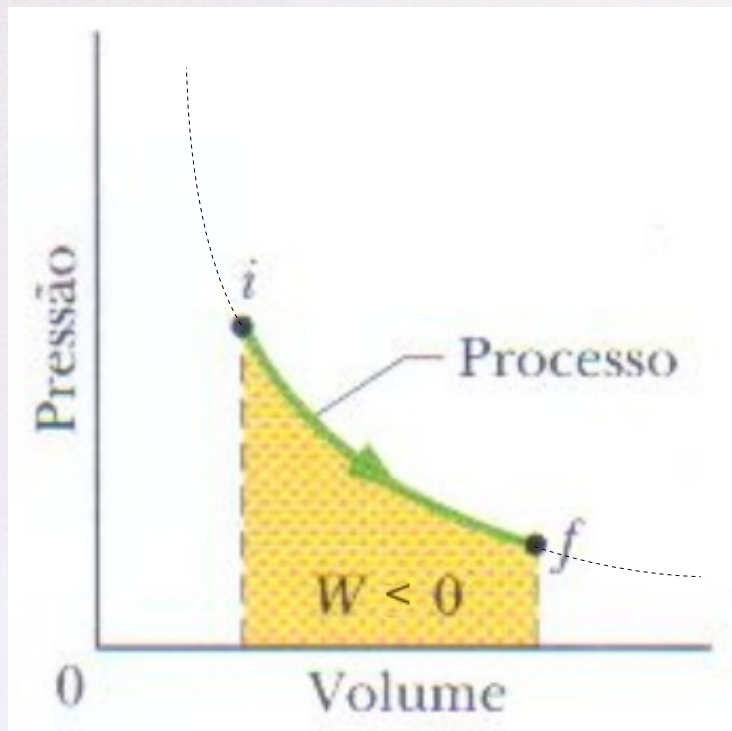
( $T = \text{cte}$ )

$$P = P(V)$$

$$W = - \int P dV$$

$$W = - \int \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT [\ln(V_f) - \ln(V_i)]$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

• Trabalho em uma expansão isotérmica:

( $T = \text{cte}$ )

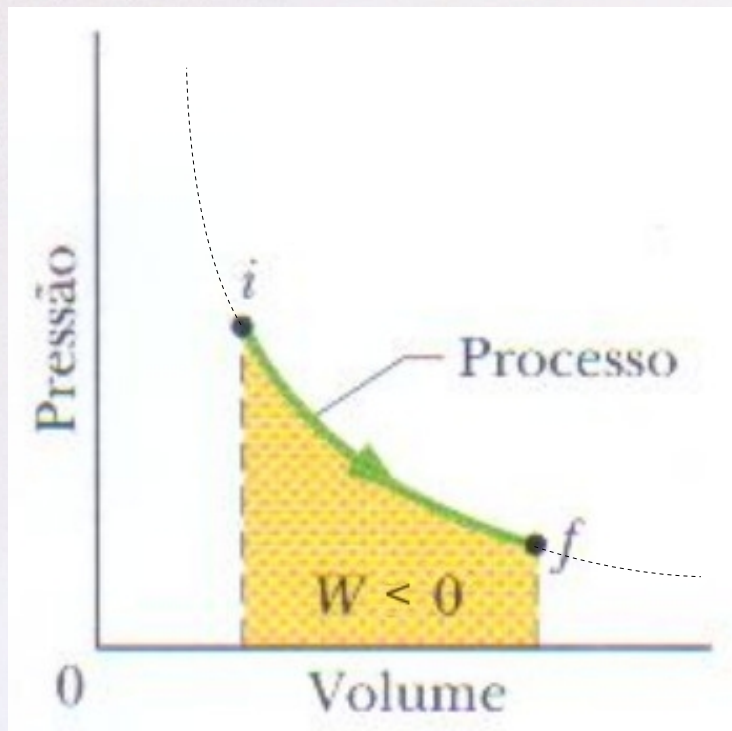
$$P = P(V)$$

$$W = - \int P dV$$

$$W = - \int \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT [\ln(V_f) - \ln(V_i)]$$

$$W = -nRT \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

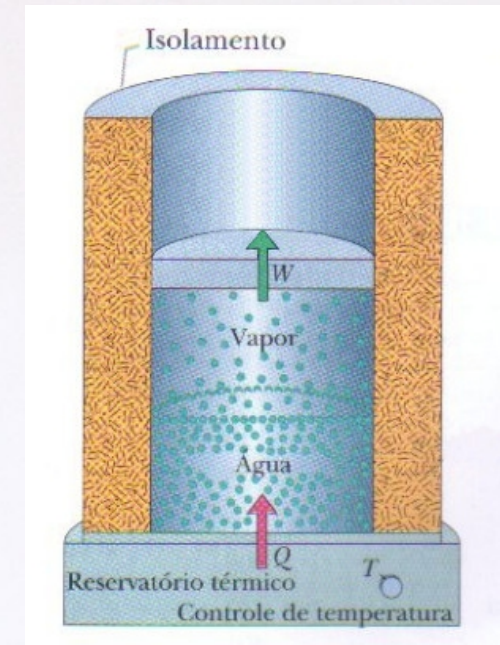
$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

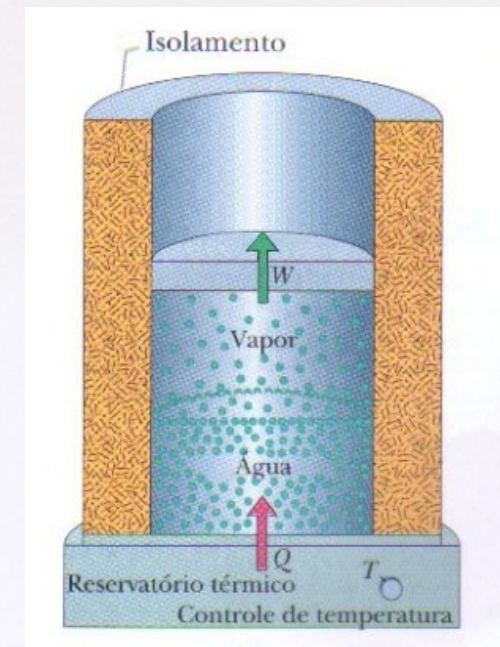
● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

$$Q = C \cdot \Delta T$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

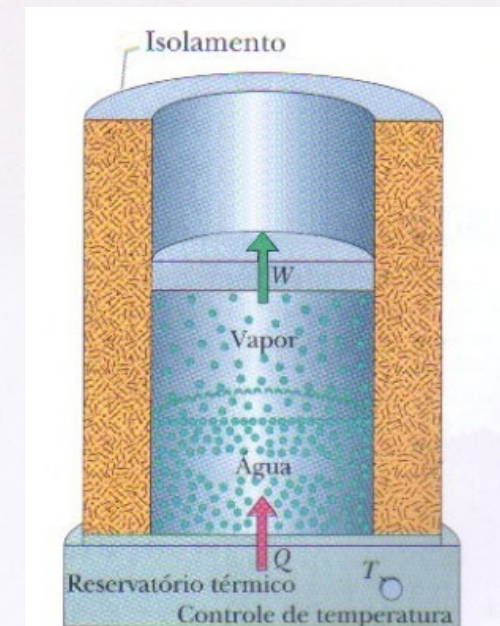
$$Q = C \cdot \Delta T$$

Logo:

$$Q_V = C_V \cdot \Delta T$$

e sabendo que:

$$\Delta U = Q + W$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Logo:

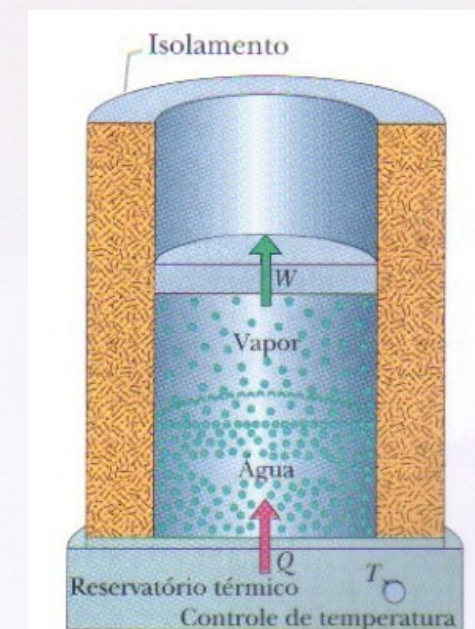
$$Q_V = C_V \cdot \Delta T$$

e sabendo que:

$$\Delta U = Q + W$$

Lembrando que quando  $V = \text{cte}$ , temos que  $W = 0$ , logo:

$$\Delta U = Q_V$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Logo:

$$Q_V = C_V \cdot \Delta T$$

e sabendo que:

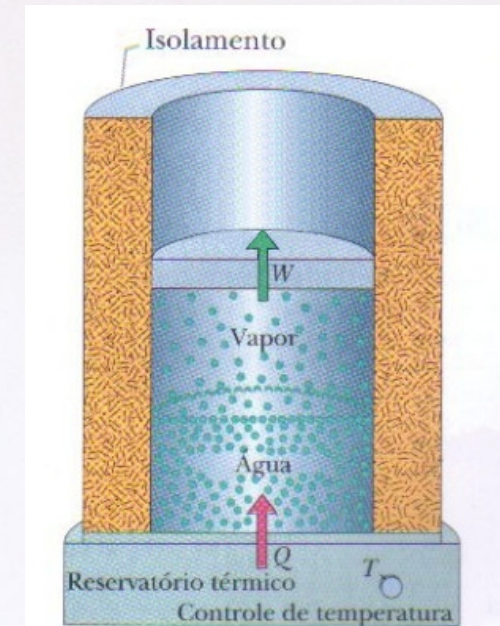
$$\Delta U = Q + W$$

Lembrando que quando  $V = \text{cte}$ , temos que  $W = 0$ , logo:

$$\Delta U = Q_V$$

→

$$\Delta U = C_V \cdot \Delta T$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Logo:

$$Q_V = C_V \cdot \Delta T$$

e sabendo que:

$$\Delta U = Q + W$$

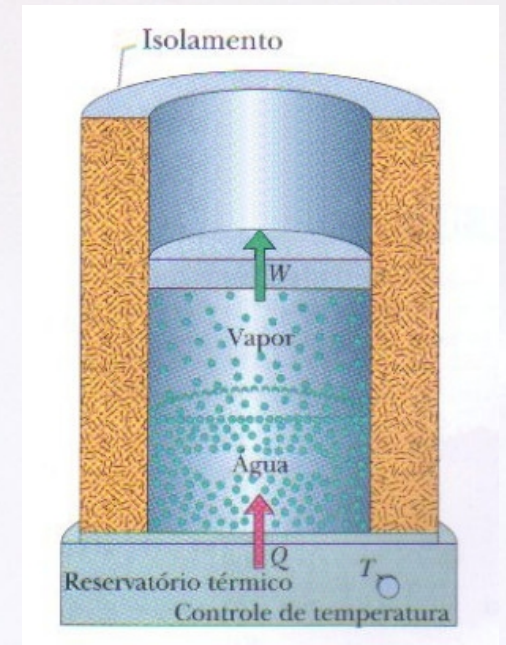
Lembrando que quando  $V = \text{cte}$ , temos que  $W = 0$ , logo:

$$\Delta U = Q_V$$

→

$$\Delta U = C_V \cdot \Delta T$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

1)  $V = \text{cte}$

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

⇒

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Logo:

$$Q_V = C_V \cdot \Delta T$$

e sabendo que:

$$\Delta U = Q + W$$

Lembrando que quando  $V = \text{cte}$ , temos que  $W = 0$ , logo:

$$\Delta U = Q_V$$

→

$$\Delta U = C_V \cdot \Delta T$$

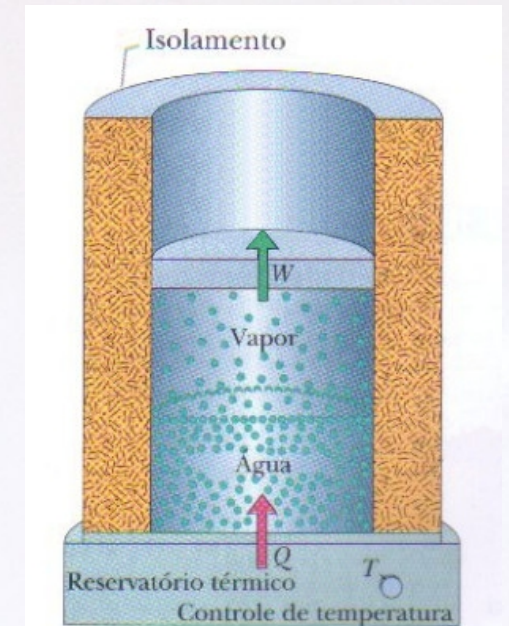
Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_V \cdot dT$$

ou

$$C_V = \frac{dU}{dT}$$

$$U = U(T)$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P\Delta V$ , logo:

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P\Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

• Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

Como:

$$PV = nRT \Rightarrow P dV + V dP = nR dT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

Como:

$$PV = nRT \Rightarrow P dV + V dP = nR dT$$

Para  $P = \text{cte}$ , temos:  $P dV = nR dT$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

• Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

Como:

$$PV = nRT \Rightarrow P dV + V dP = nR dT$$

$$C_P dT = C_V dT + nR dT$$

Para  $P = \text{cte}$ , temos:

$$P dV = nR dT$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

• Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

Como:

$$PV = nRT \Rightarrow P dV + V dP = nR dT$$

$$C_P dT = C_V dT + nR dT$$

$$C_P - C_V = nR$$

Para  $P = \text{cte}$ , temos:

$$P dV = nR dT$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

● Capacidades térmicas:

2)  $P = \text{cte}$

$$Q_P = C_P \cdot \Delta T$$

(vimos anteriormente os calores específicos, a pressão cte, para algumas substâncias, → estão relacionados com a cap térmica)

Lembrando que quando  $P = \text{cte}$ , temos que  $W = -P \Delta V$ , logo:

$$\Delta U = Q_P + W_P$$

→

$$\Delta U = C_P \Delta T - P \Delta V$$

Para  $\Delta T \rightarrow 0$ :

$$dU = C_P dT - P dV$$

$$dU = C_V \cdot dT$$

$$C_P dT = C_V dT + P dV$$

Como:

$$PV = nRT \Rightarrow P dV + V dP = nR dT$$

$$C_P dT = C_V dT + nR dT$$

Para  $P = \text{cte}$ , temos:

$$P dV = nR dT$$

$$C_P - C_V = nR$$

(cap. térmica)

$$c_P - c_V = R$$

(cap. térmica molar)



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

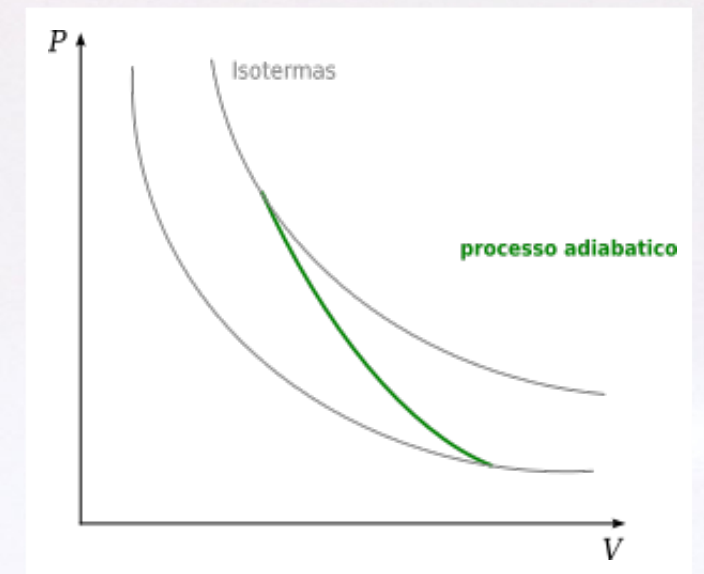
$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

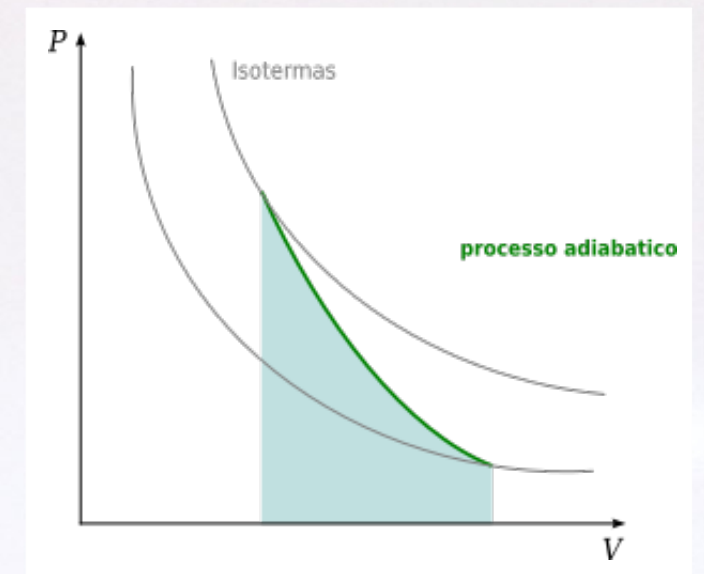
$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

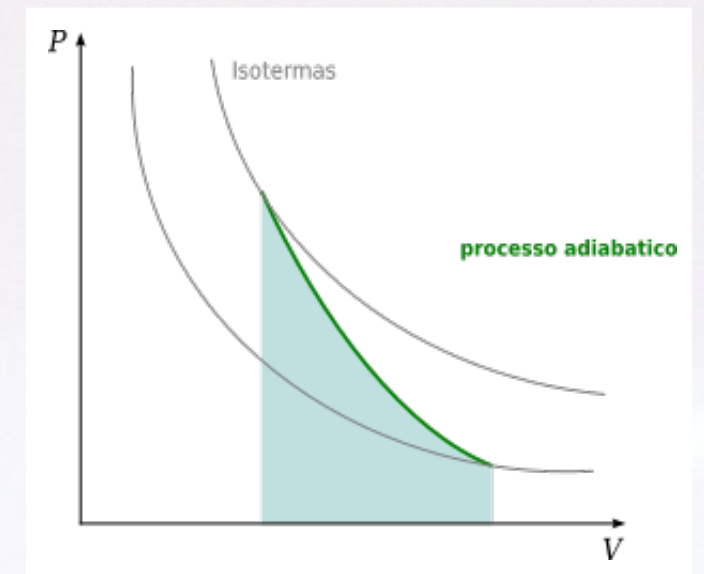
$$P = P(V, T)$$

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

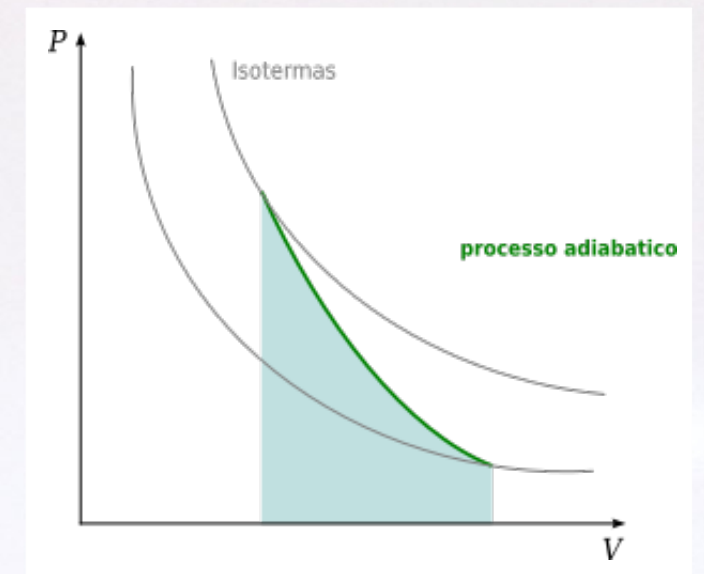
$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = dW$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

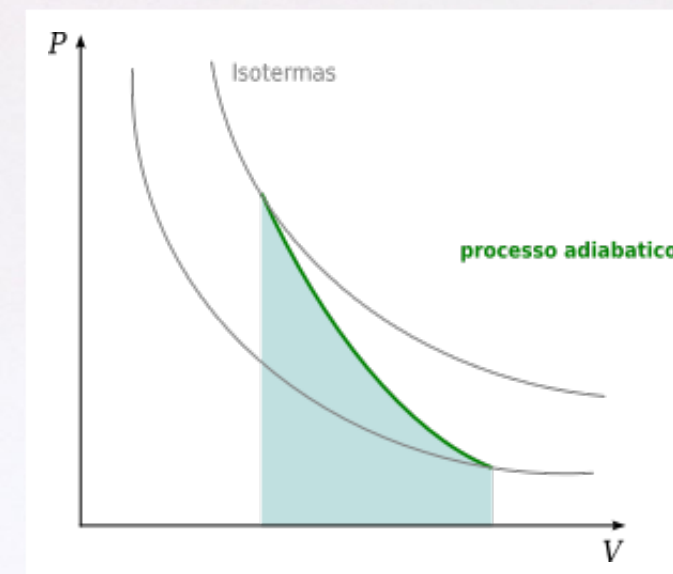
- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = dW$$

$$W = \int dW = \int C_V dT$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

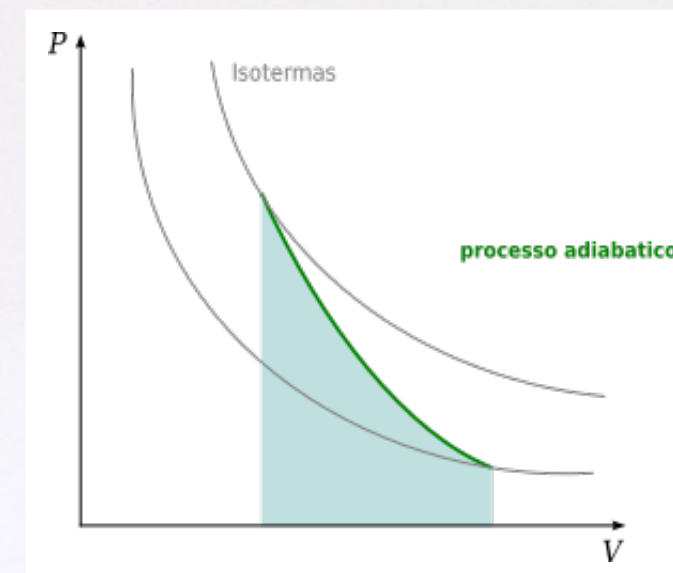
$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = dW$$

$$W = \int dW = \int C_V dT$$

$$W = C_V \Delta T$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

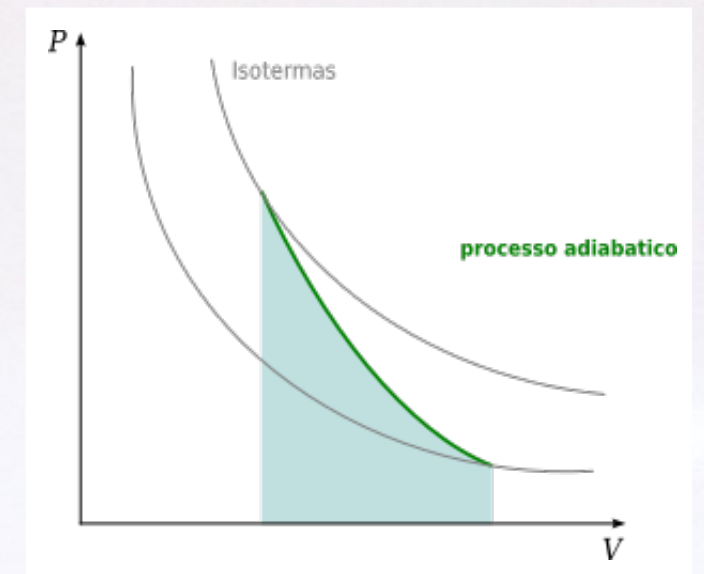
$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = dW$$

$$W = \int dW = \int C_V dT$$

$$W = C_V \Delta T$$



$$T = \frac{PV}{nR}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

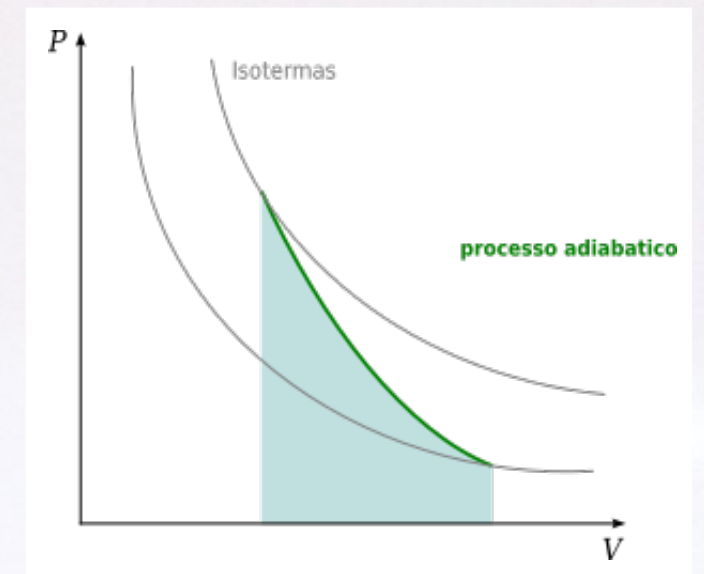
$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = dW$$

$$W = \int dW = \int C_V dT$$

$$W = C_V \Delta T$$

$$W = \frac{C_V}{nR} (P_f V_f - P_i V_i)$$



$$T = \frac{PV}{nR}$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

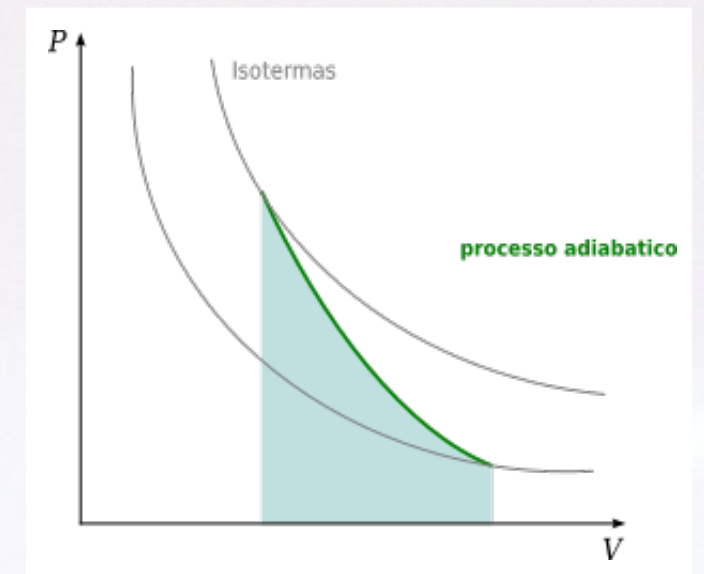
$$P = P(V, T)$$

$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

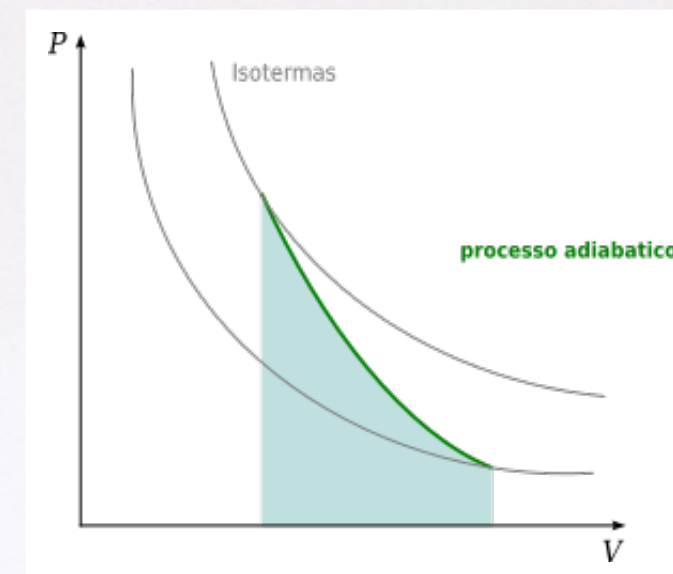
$$(n = \text{cte})$$

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

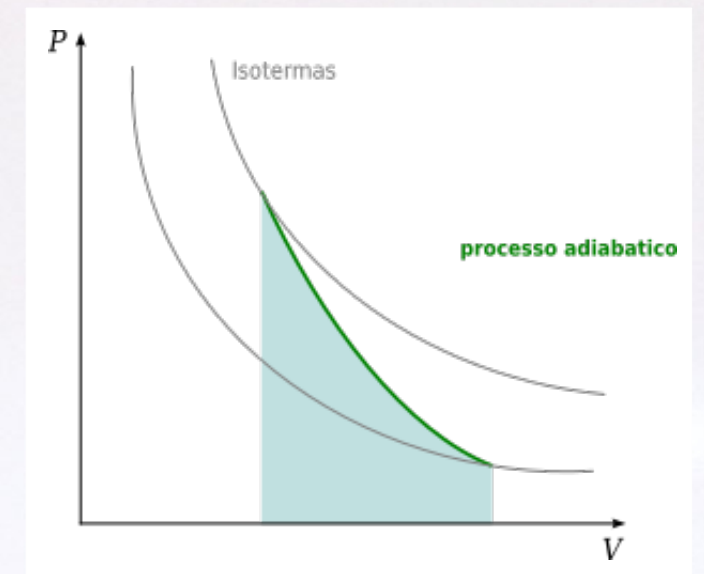
- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

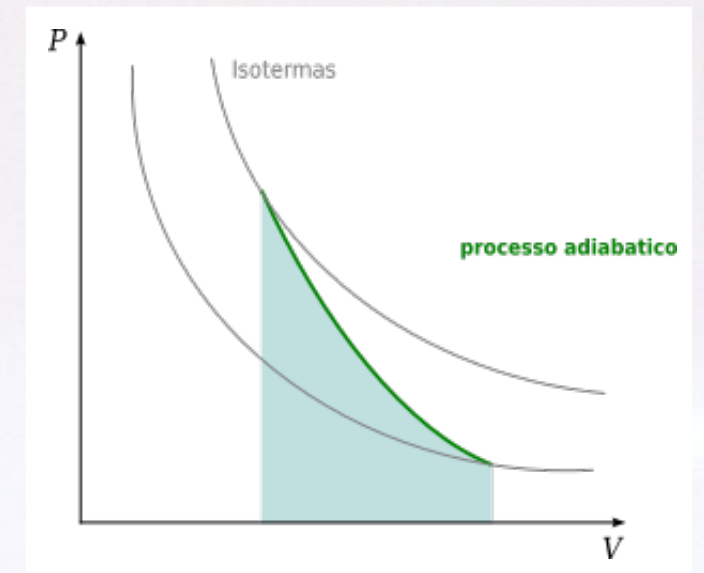
$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

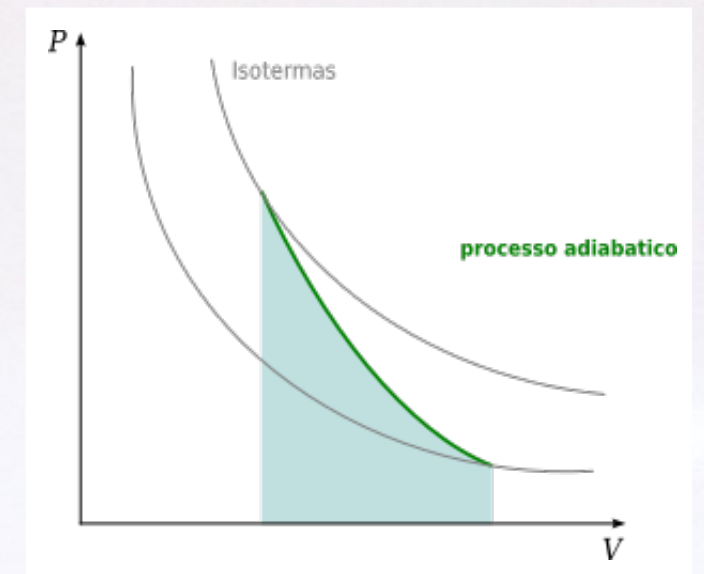
$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando:





# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

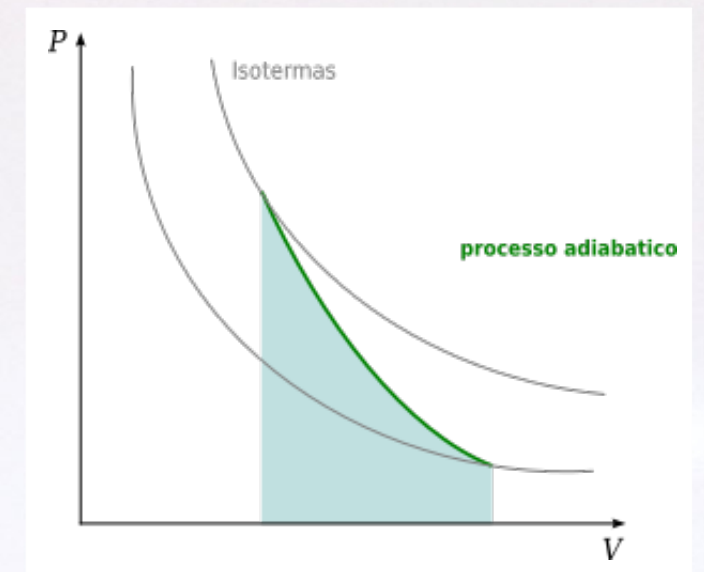
$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando:

$$\ln(T) + \frac{nR}{C_V} \ln(V) = \text{cte}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando:

$$\ln(T) + \frac{nR}{C_V} \ln(V) = \text{cte}$$

$$\ln(T) + \ln\left(V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

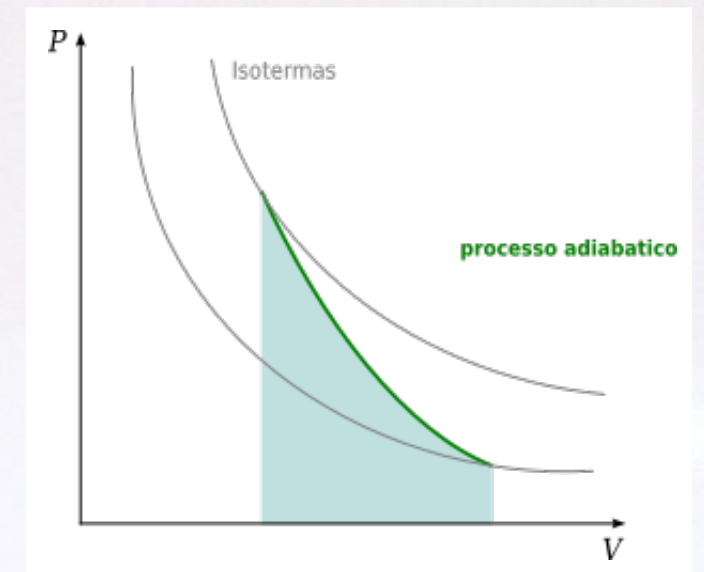
$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando:

$$\ln(T) + \frac{nR}{C_V} \ln(V) = \text{cte}$$

$$\ln(T) + \ln\left(V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$

$$\rightarrow \ln\left(T \cdot V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

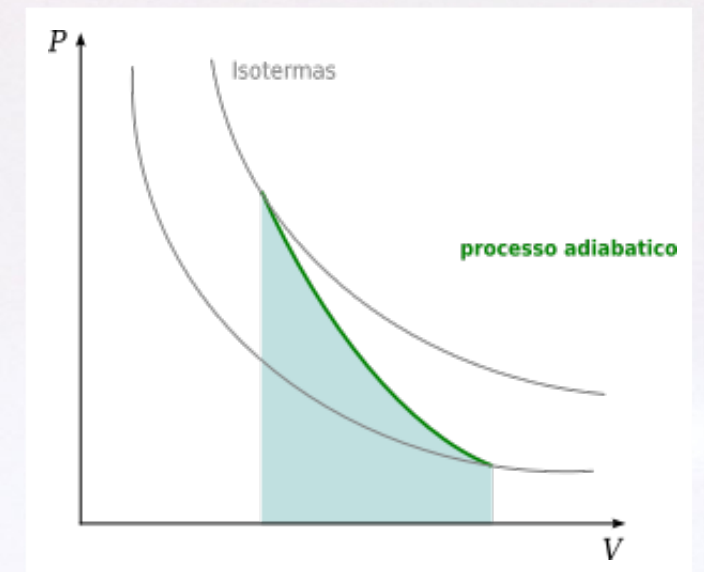
Integrando:

$$\ln(T) + \frac{nR}{C_V} \ln(V) = \text{cte}$$

$$\ln(T) + \ln\left(V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$

$$\rightarrow \ln\left(T \cdot V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$

$$T \cdot V^{\frac{nR}{C_V}} = \text{cte}$$





# Propriedades dos Gases

$$C_P - C_V = nR$$

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$dU = dQ + dW$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \frac{dT}{T} + \frac{nR}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

Integrando:

$$\ln(T) + \frac{nR}{C_V} \ln(V) = \text{cte}$$

$$\ln(T) + \ln\left(V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$

→

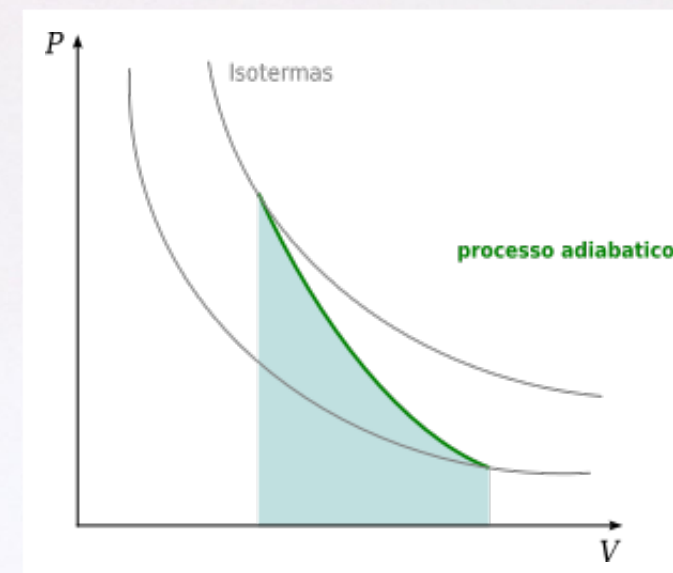
$$\ln\left(T \cdot V^{\frac{nR}{C_V}}\right) = \text{cte}$$

$$T \cdot V^{\frac{nR}{C_V}} = \text{cte}$$

→

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

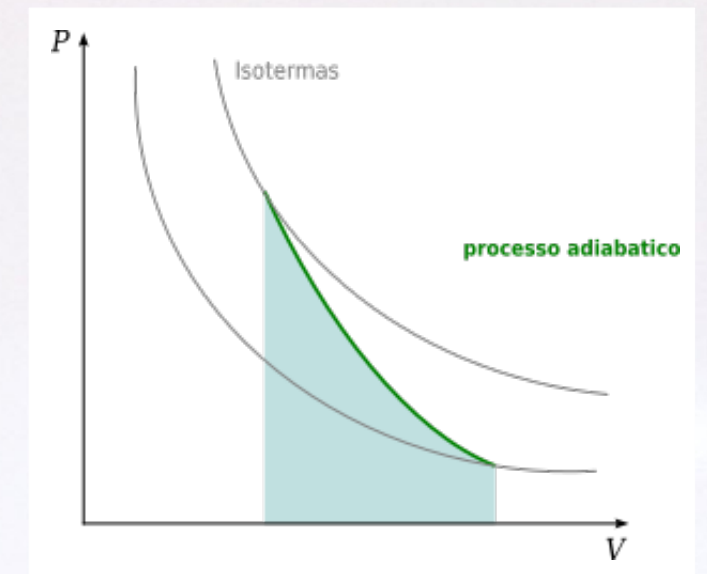
$$P = P(V, T)$$

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

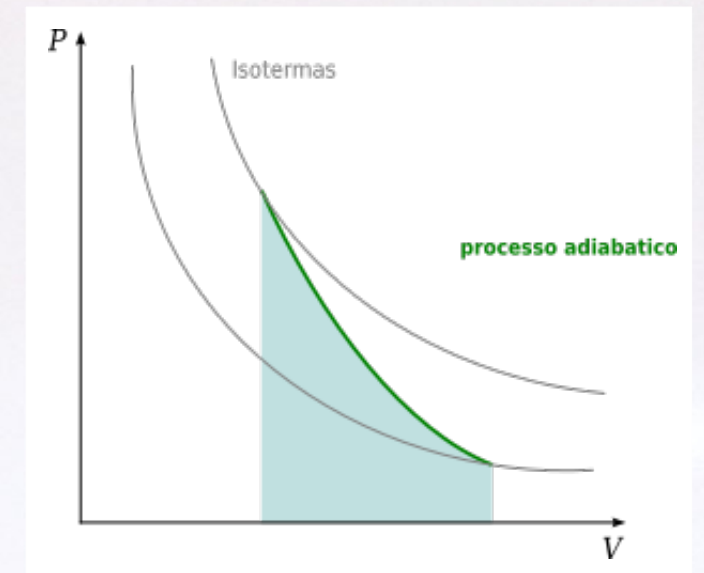
( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

Usando  $PV = nRT$ , obtemos:



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

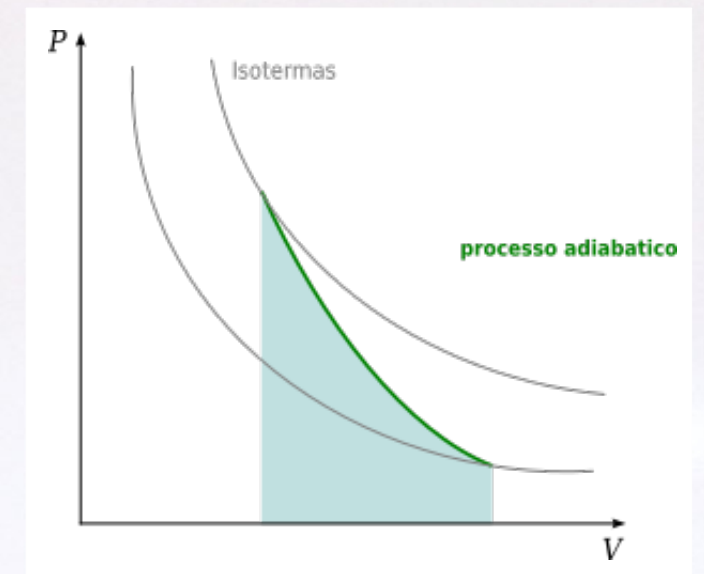
- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

Usando  $PV = nRT$ , obtemos:

$$\frac{PV}{nR} \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

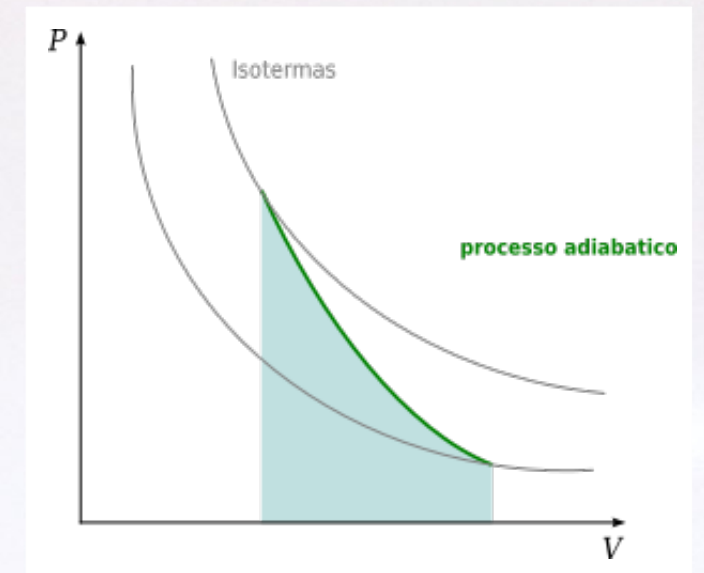
$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

Usando  $PV = nRT$ , obtemos:

$$\frac{PV}{nR} \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{cte}$$



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

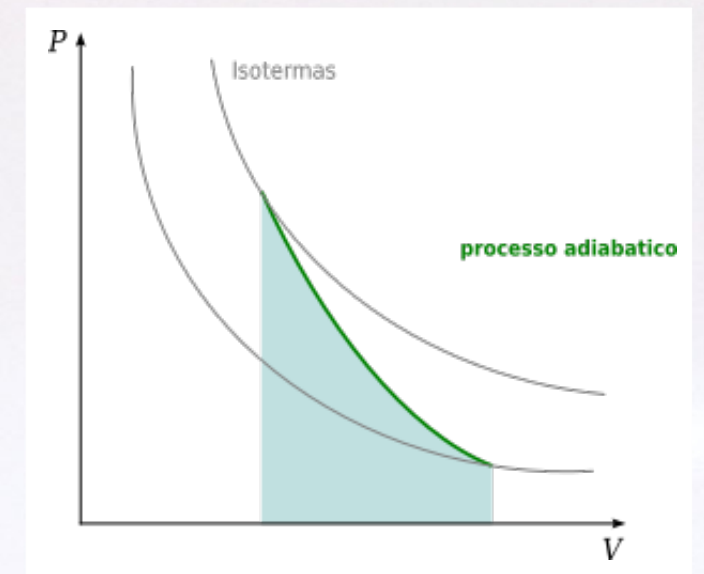
Usando  $PV = nRT$ , obtemos:

$$\frac{PV}{nR} \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{cte}$$

ou:

$$\frac{T^{\gamma}}{P^{\gamma-1}} = \text{cte}$$



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

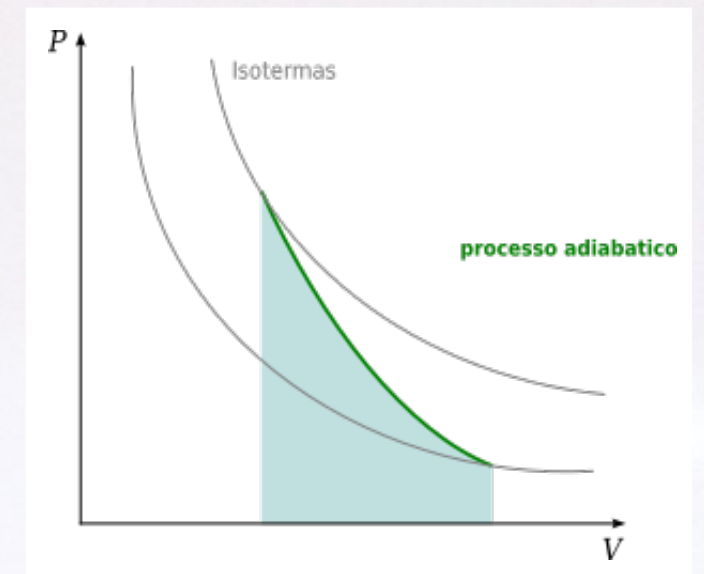
Usando  $PV = nRT$ , obtemos:

$$\frac{PV}{nR} \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{cte}$$

ou:

$$\frac{T^{\gamma}}{P^{\gamma-1}} = \text{cte}$$



E por fim, podemos escrever:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

# Propriedades dos Gases

→ Gás ideal

$$PV = nRT$$

⇒

$$P = \frac{nRT}{V}$$

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

( $n = \text{cte}$ )

- Processo adiabático (quase estático):

$$(Q = 0)$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

Usando  $PV = nRT$ , obtemos:

$$\frac{PV}{nR} \cdot V^{\gamma-1} = \text{cte}$$

$$P \cdot V^{\gamma} = \text{cte}$$

ou:

$$\frac{T^{\gamma}}{P^{\gamma-1}} = \text{cte}$$

E por fim, podemos escrever:

$$W = \frac{C_V}{nR} (P_f V_f - P_i V_i)$$

→

$$W = \frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma - 1}$$

$$; \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



# Máquinas & História

Vimos algumas propriedades do gás ideal, e o cálculo do trabalho em algumas situações.

# Máquinas & História

Máquinas Térmicas

Ciclos Termodinâmicos

2ª Lei da Termodinâmica

Teoria Cinética dos Gases



# Máquinas Térmicas

→ **Máquina térmica é um dispositivo capaz de realizar trabalho convertendo energia térmica em energia mecânica, operando através de ciclos termodinâmicos.**

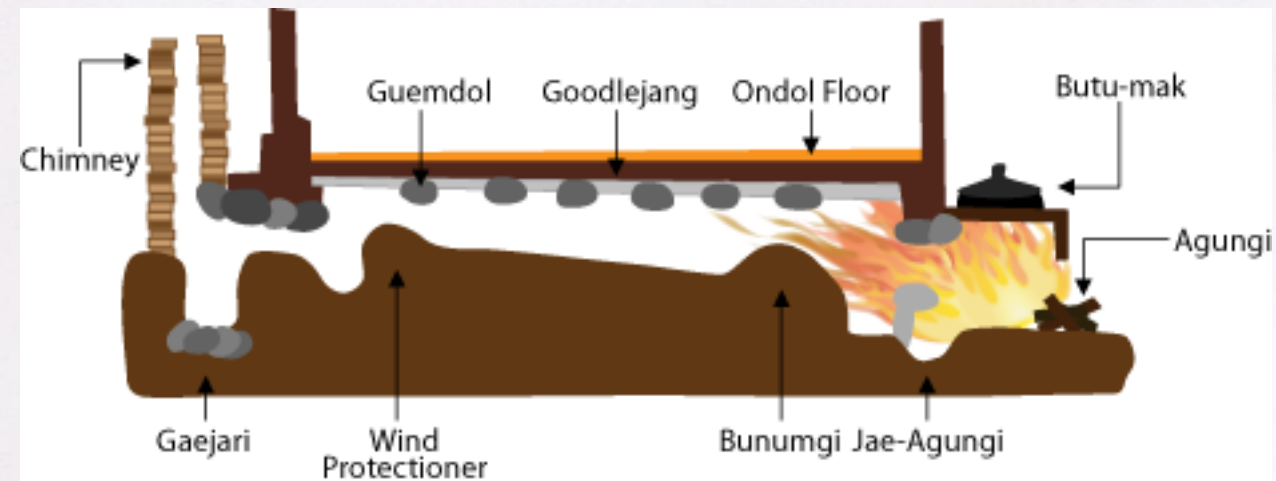
Podemos também utilizar estes processos fornecendo trabalho a fim de retirar energia de uma fonte fria e transferí-lo para uma fonte quente (aquecimento de um ambiente), ou o oposto, resfriando um ambiente.

# Máquinas Térmicas

→ Idade Antiga (a.C.):

## Aquecimento de ambientes

(Ondol coreano)



[Figura: [https://en.wikipedia.org/wiki/Central\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Central_heating)]



# Máquinas Térmicas

→ Idade Antiga (a.C.) até a Idade Média:

## Aquecimento de ambientes

Grécia e Roma

(Hipocausto romano)

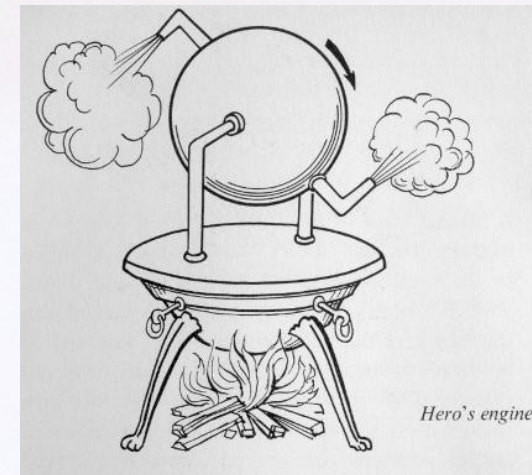




# Máquinas Térmicas

→ Idade Antiga (séc. I d.C.): Heron de Alexandria / Vitrúvio

(Eolípila)



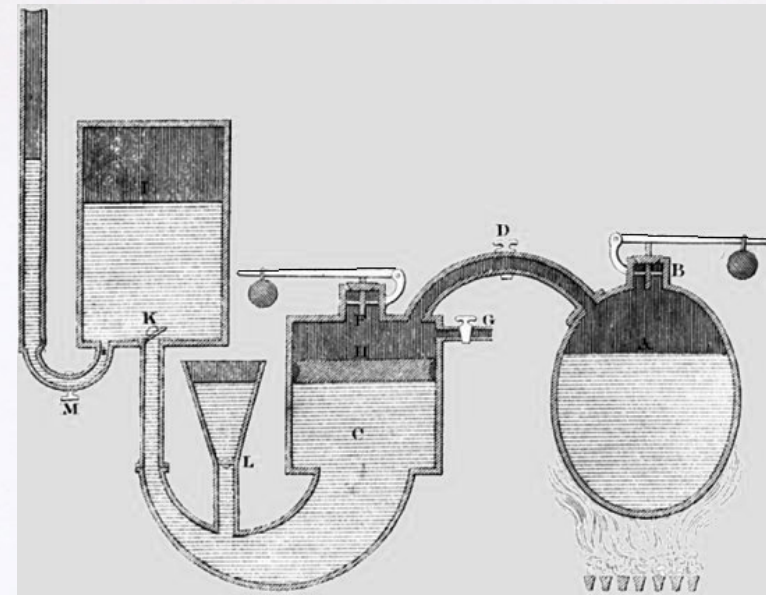
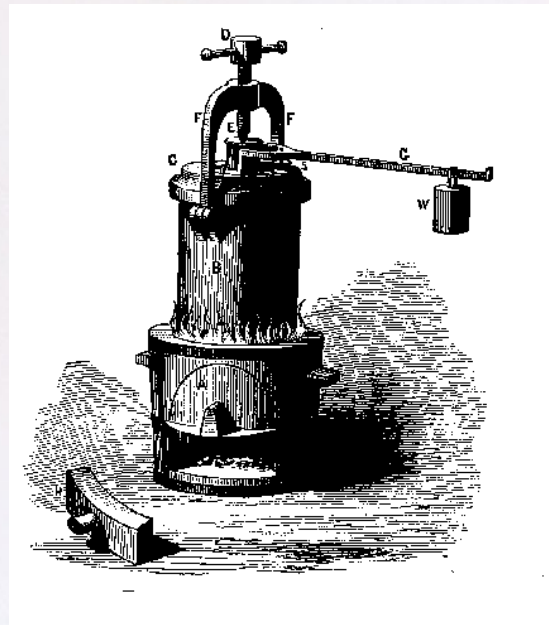


# Máquinas Térmicas

→ séc. XVII (1679): Denis Papin

(Marmitta de Papin, ou Digestor de Vapor)

Precursor do Autoclave e da panela de pressão e da máquina a vapor



[Figuras: [https://en.wikipedia.org/wiki/Denis\\_Papin](https://en.wikipedia.org/wiki/Denis_Papin)]

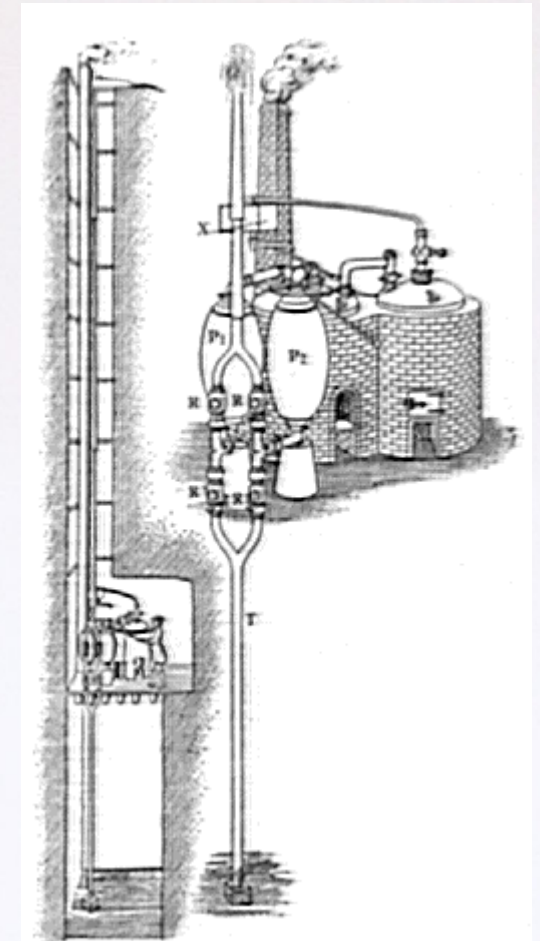
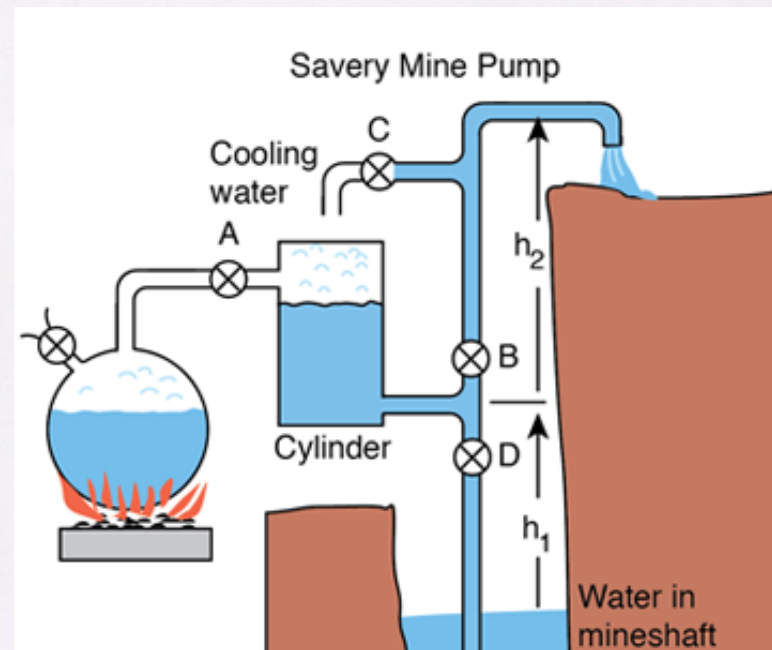
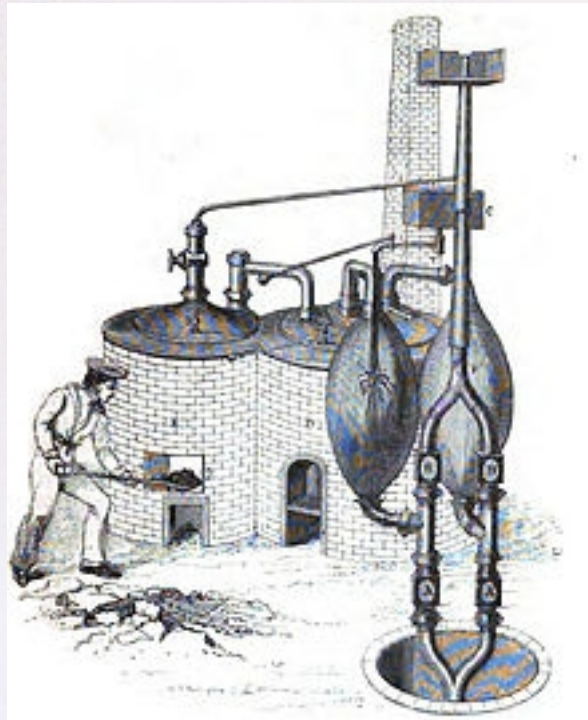


# Máquinas Térmicas

→ séc. XVII (1698): Capitão Thomas Savery

(Máquina de Savery)

Bombear água de minas de carvão, com vapor

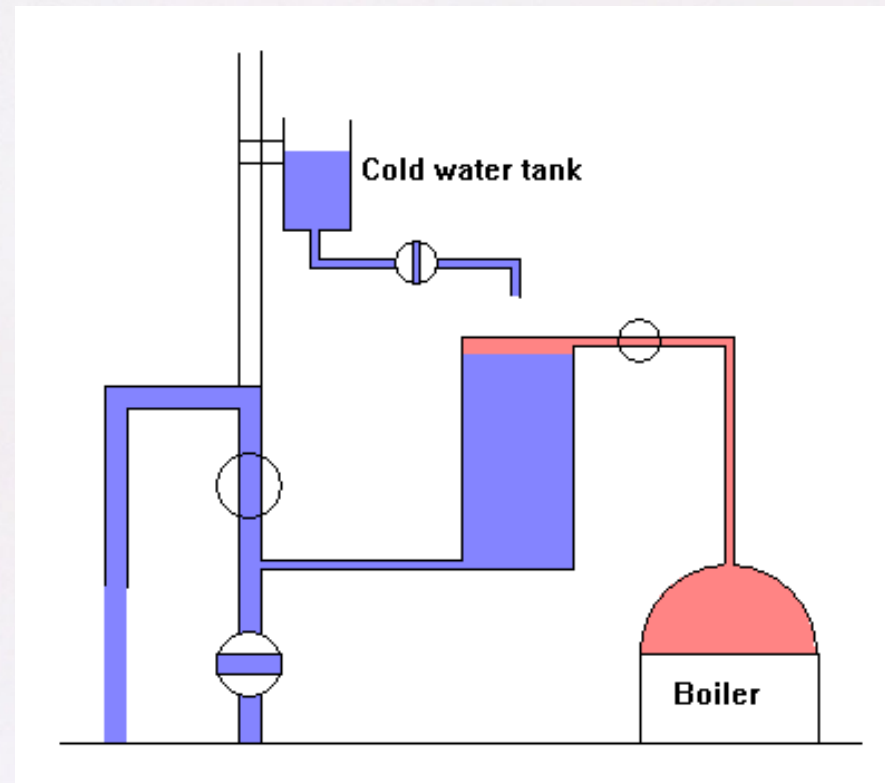




# Máquinas Térmicas

→ séc. XVII (1698): Capitão Thomas Savery

(Máquina de Savery)



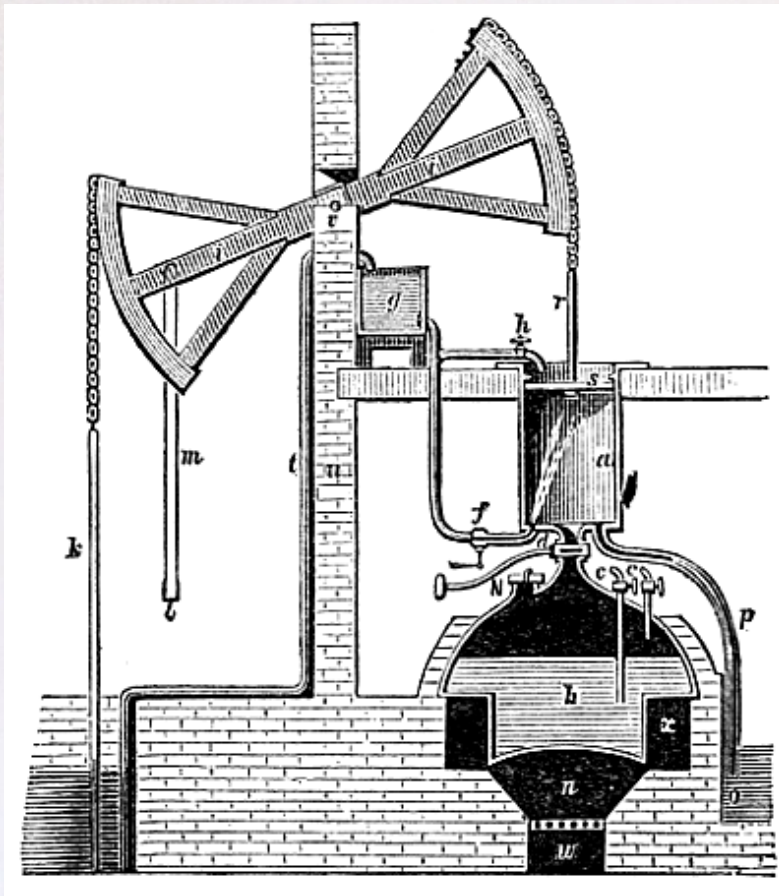
Pouco eficiente, mas, funciona!

[Figura: [http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/sci3/animation/savery\\_engine.htm](http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/sci3/animation/savery_engine.htm)]



# Máquinas Térmicas

→ séc. XVIII (1712): Thomas Newcomen



(Máquina de Newcomen)

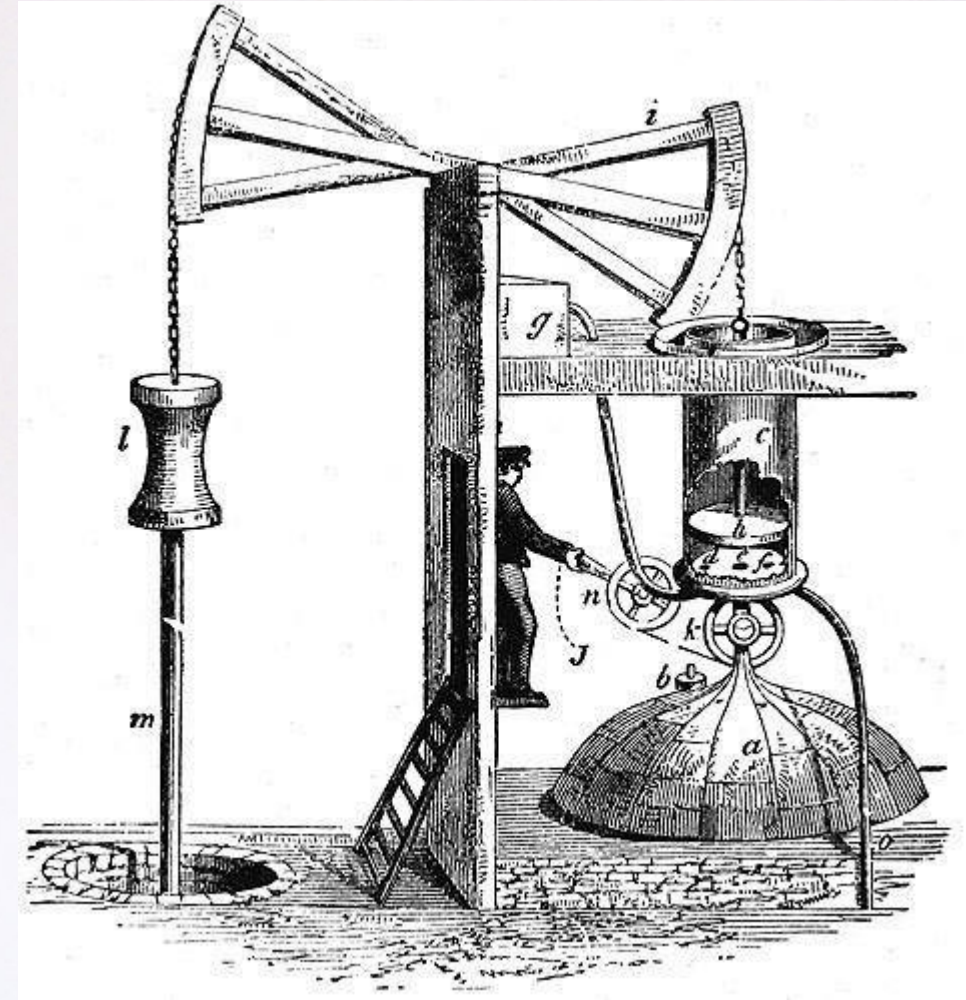
Aperfeiçoou a máq. de Savery

Um pouco mais eficiente!

Cilindro + êmbolo

→ Extrair água de minas

→ Bombear água potável!

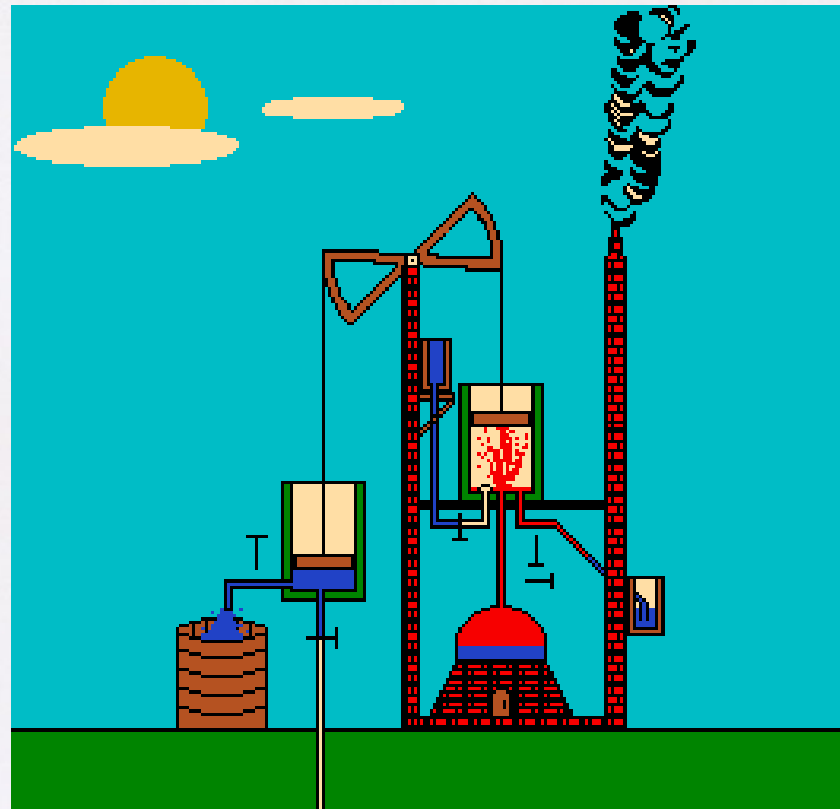




# Máquinas Térmicas

→ séc. XVIII (1712): Thomas Newcomen

(Máquina de Newcomen)



[Figura: [https://fjarabo.webs.ull.es/HCC/14\\_EModerna/14\\_Fotos/Savery\\_Vapor.htm](https://fjarabo.webs.ull.es/HCC/14_EModerna/14_Fotos/Savery_Vapor.htm)]



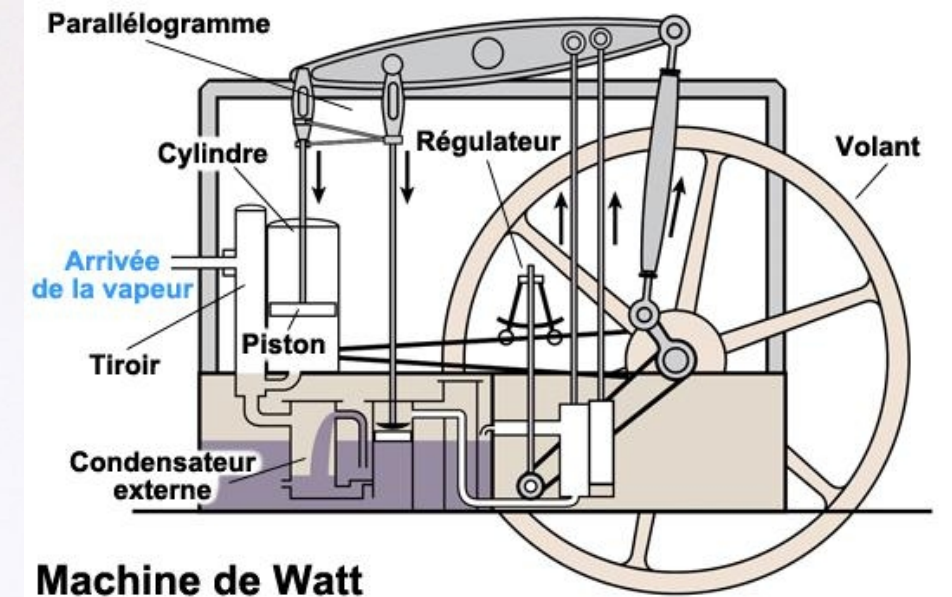
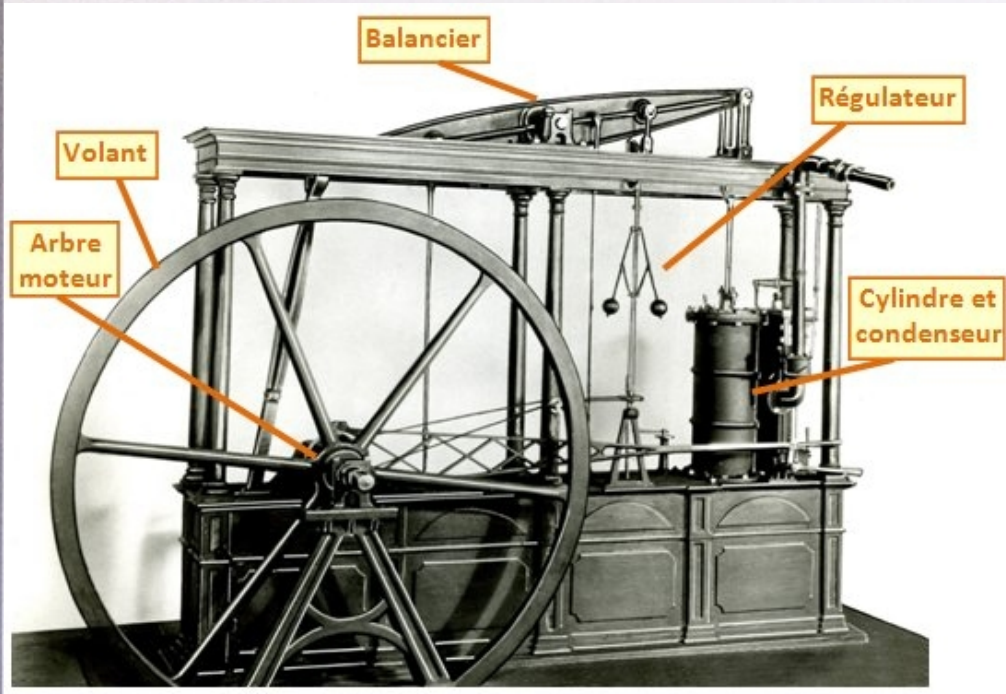
# Máquinas Térmicas

→ séc. XVIII (1765): James Watt

Aperfeiçoou a máq. de Newcomen

- Condensador (separado)
- Cilindro sempre aquecido
- Regulador de pressão

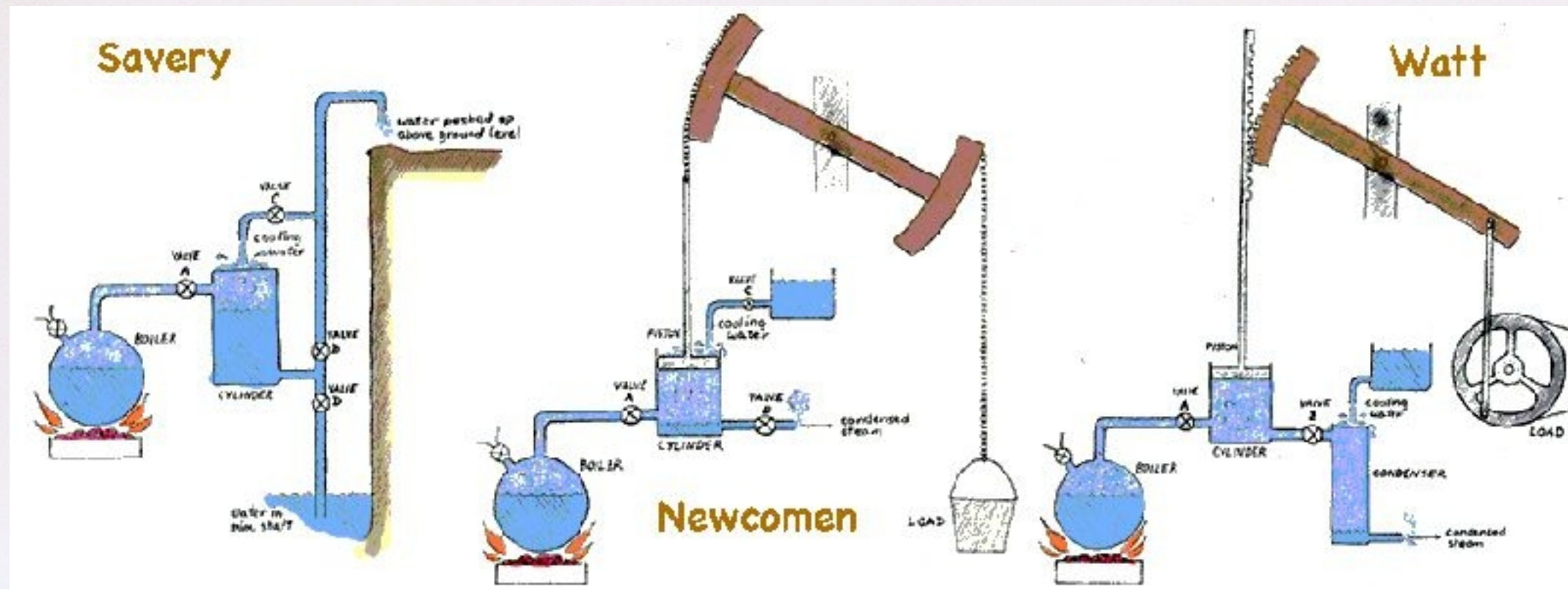
**Muito mais eficiente!**





# Máquinas Térmicas

→ comparação



[Figura: [http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Newcomen,%20Thomas.xml](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Newcomen,%20Thomas.xml)]



# Máquinas Térmicas

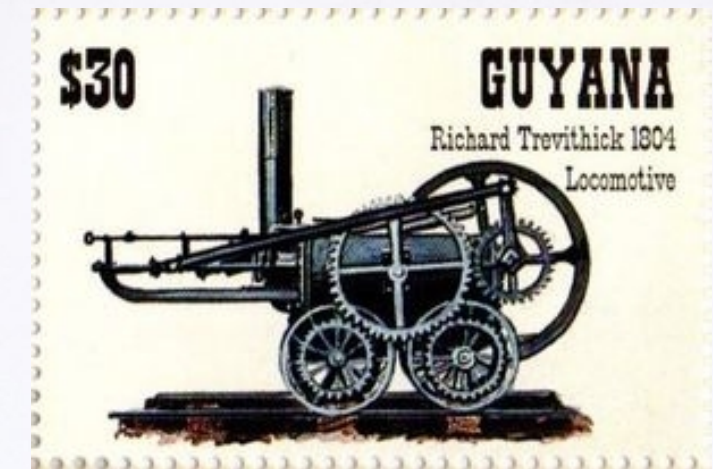
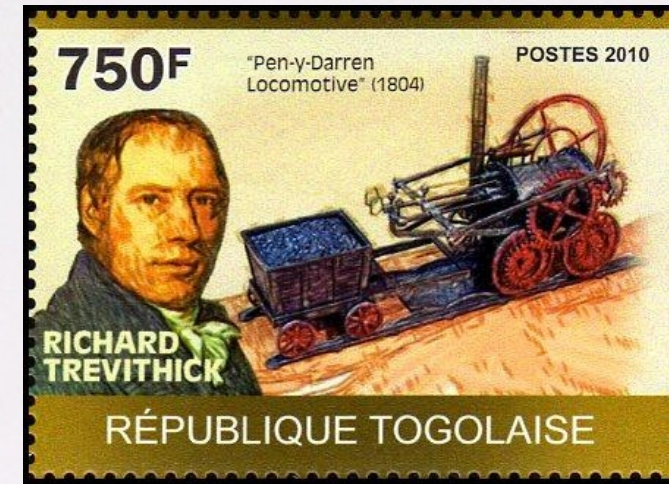
→ séc. XIX (1804): Richard Trevithick



**1ª locomotiva a vapor**

→ vapor em alta pressão

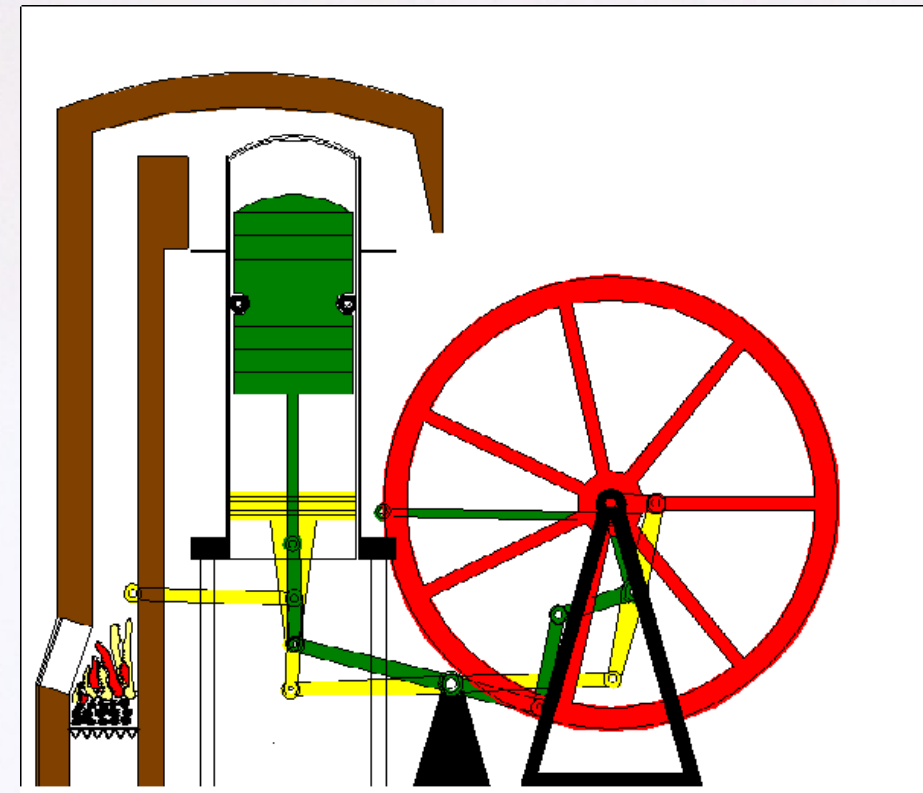
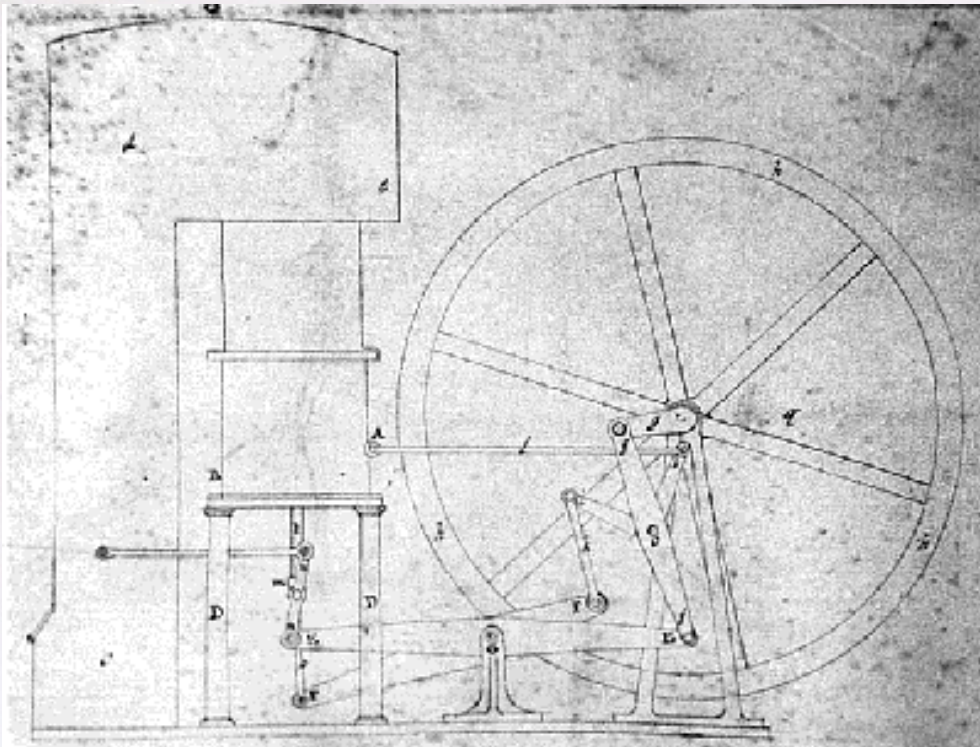
- John Blenkinsop (1812-13)
- George Stephenson (1814)





# Máquinas Térmicas

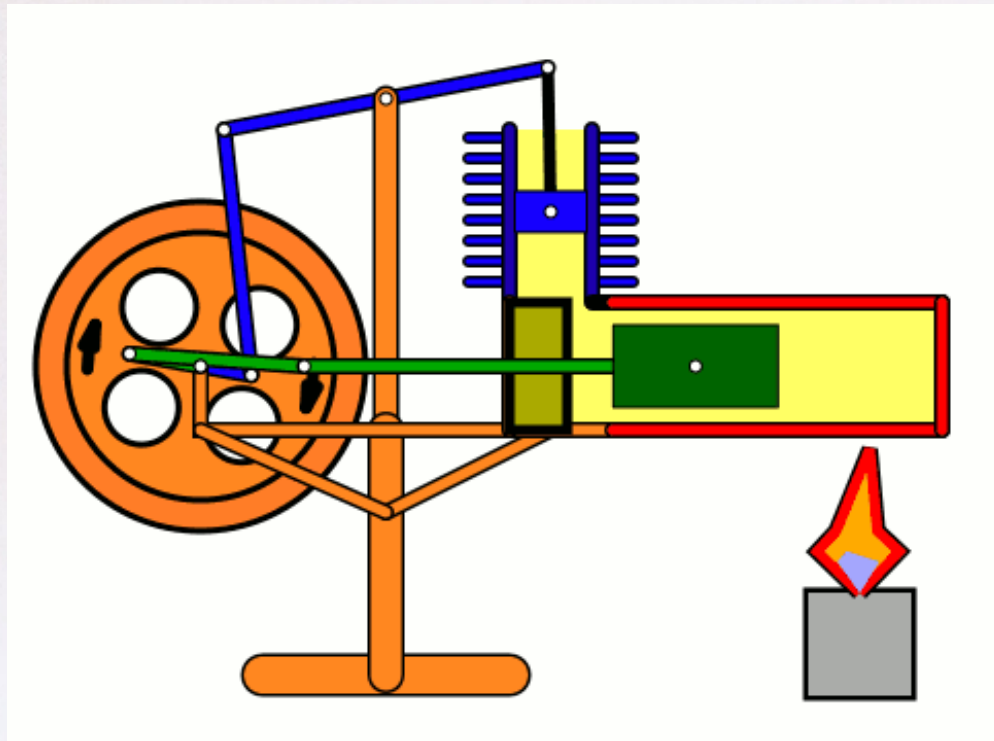
→ séc. XIX (1816): Robert Stirling



[Figuras: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine) ; <https://stirlingengineforum.com/>]

# Máquinas Térmicas

## Motor Stirling



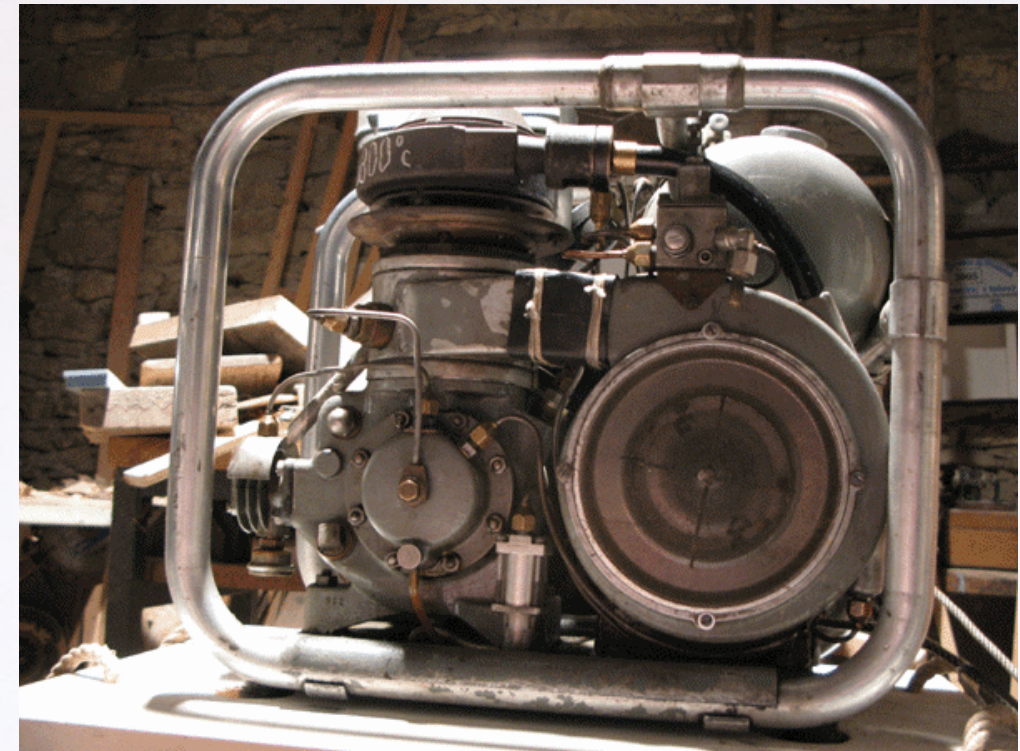
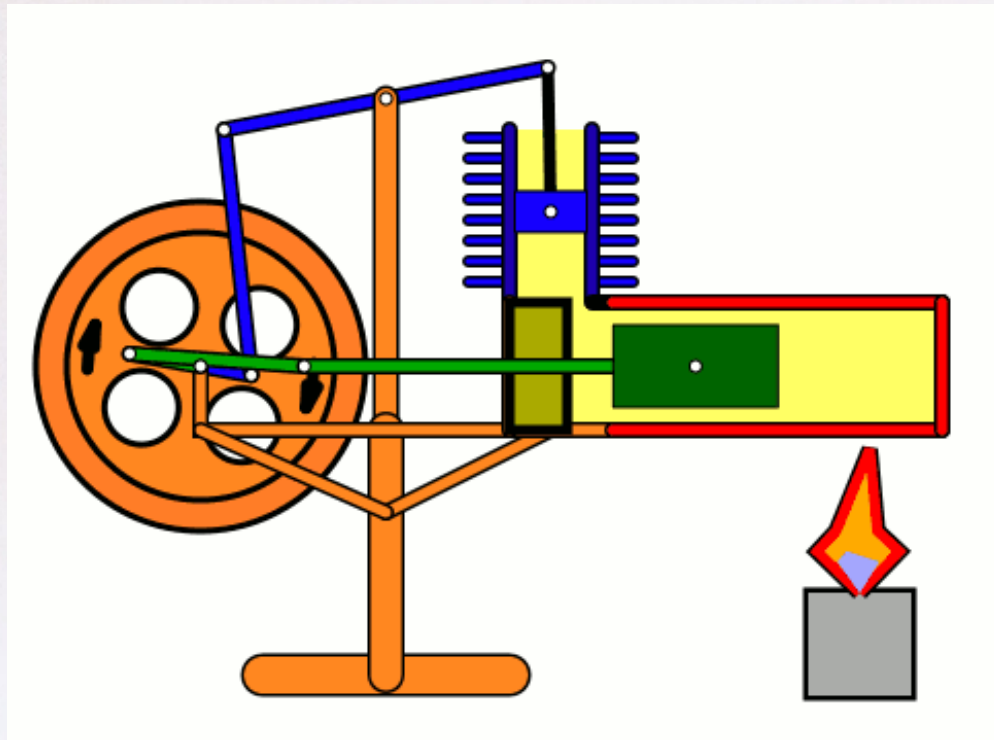
[Figuras: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Pump-Design-Stirling.gif> ; <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Philips.gif>]



# Máquinas Térmicas

## Motor Stirling

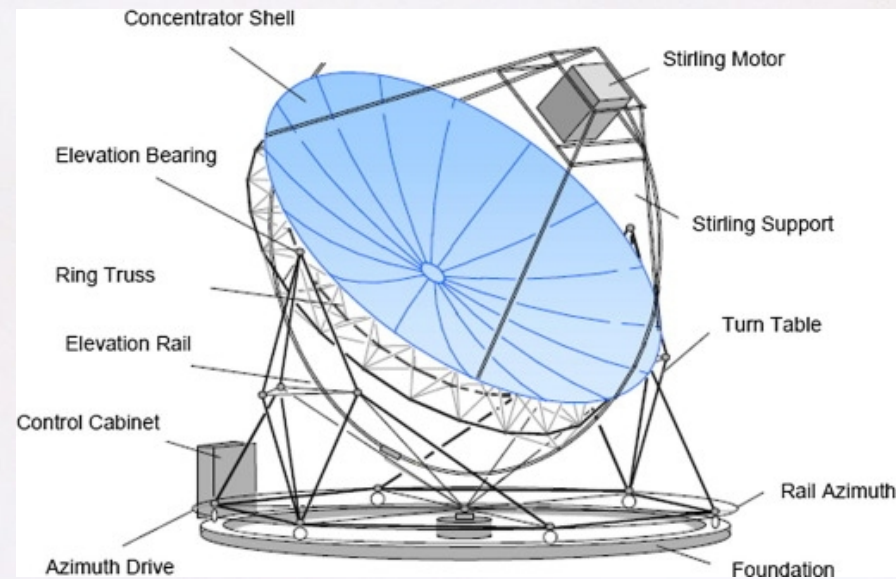
(Philips MP1002CA Stirling generator - 1951)





# Máquinas Térmicas

Motor Stirling + gerador de eletricidade

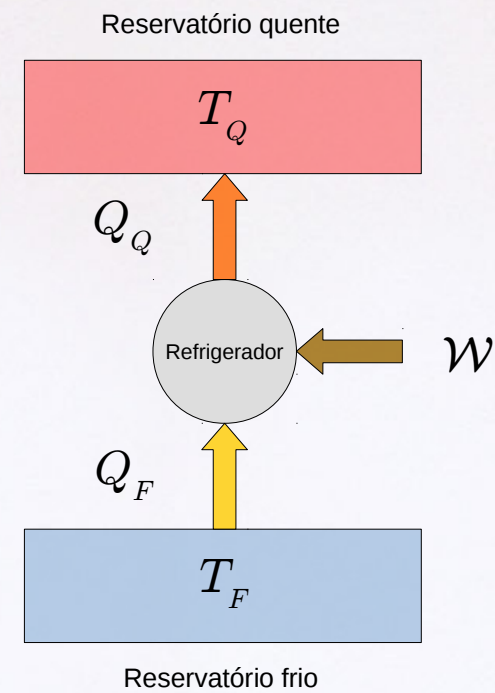
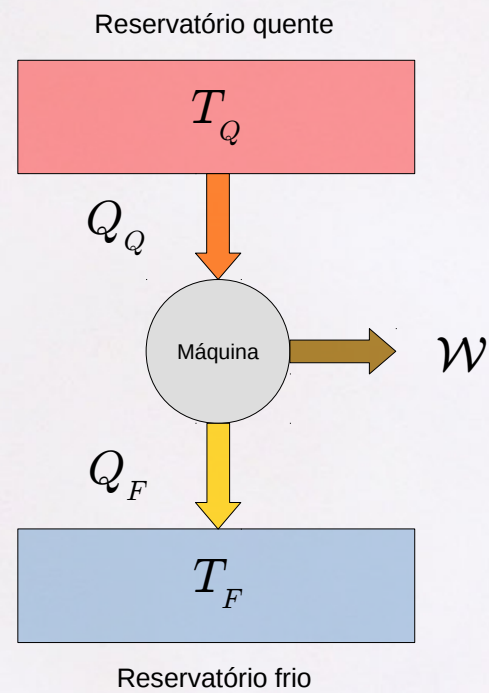




# Máquinas Térmicas

## Máquina térmica e Refrigerador

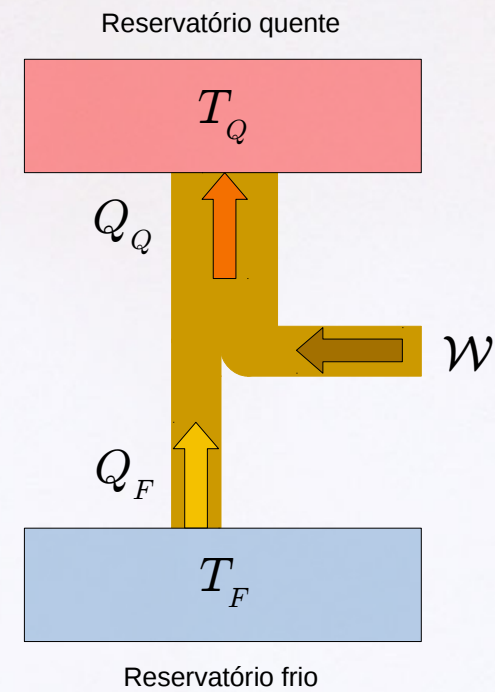
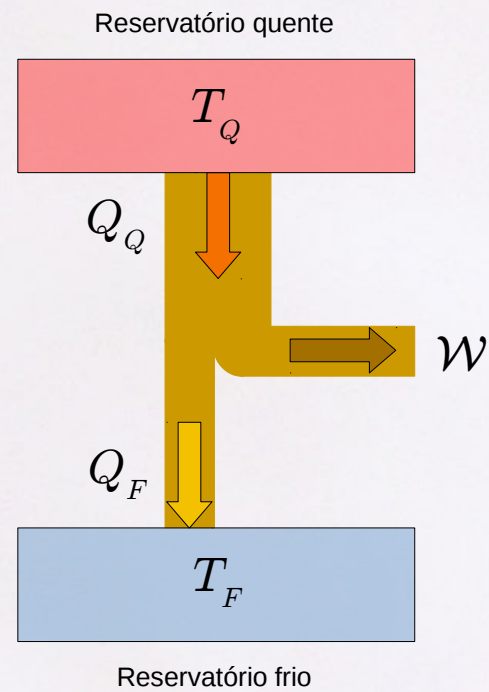
(máquina térmica invertida)



# Máquinas Térmicas

## Máquina térmica e Refrigerador

(máquina térmica invertida)

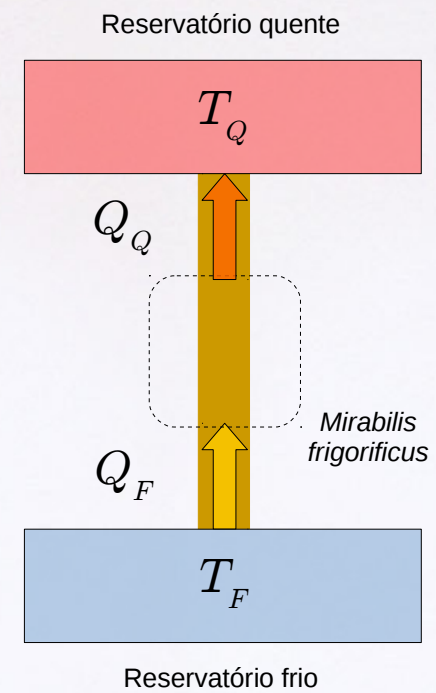
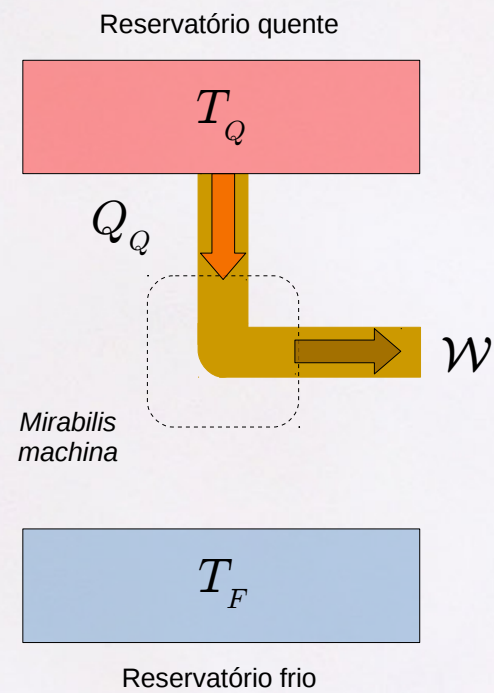




# Máquinas Térmicas

## Máquina térmica e Refrigerador

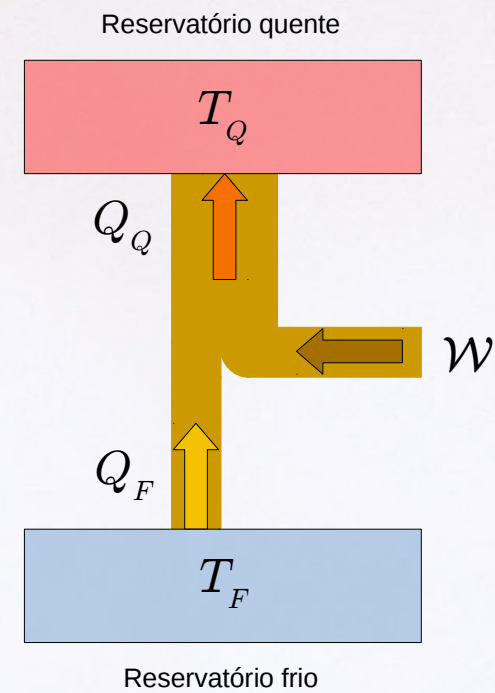
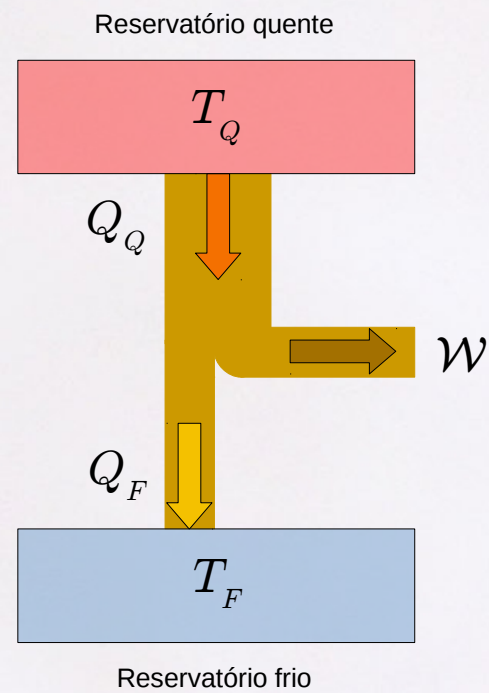
(máquina térmica invertida)



# Máquinas Térmicas

## Máquina térmica e Refrigerador

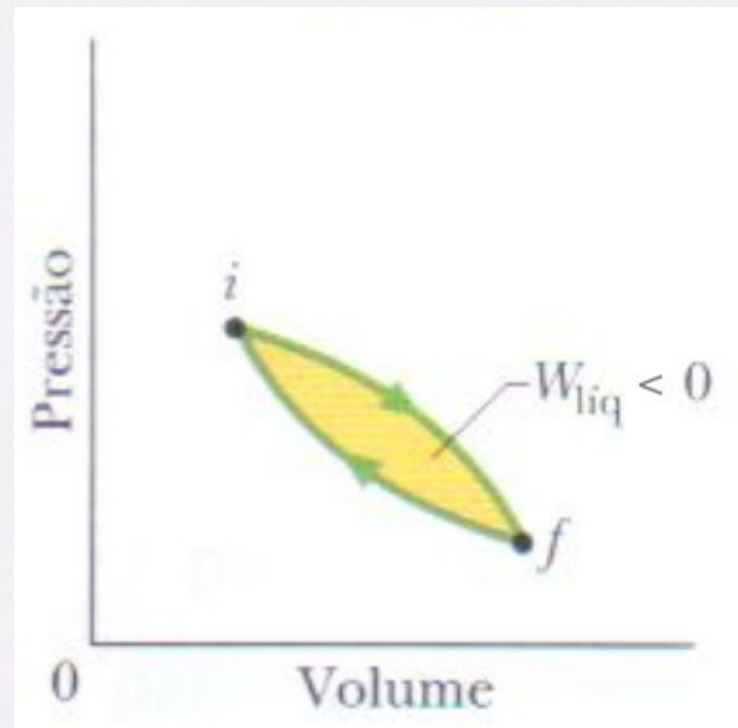
(máquina térmica invertida)





# Máquinas Térmicas

Processo cíclico



# Ciclos Termodinâmicos

- Ciclo de Carnot (ciclo ideal)
- Ciclo Stirling (combustão externa)
- Ciclo Rankine (turbina a vapor)
- Ciclo Brayton (turbina a gás)
- Ciclo Otto (motor a gasolina)
- Ciclo Diesel (motor a diesel)
- Ciclo Misto (Sabathé ou Seiliger)
- (...)

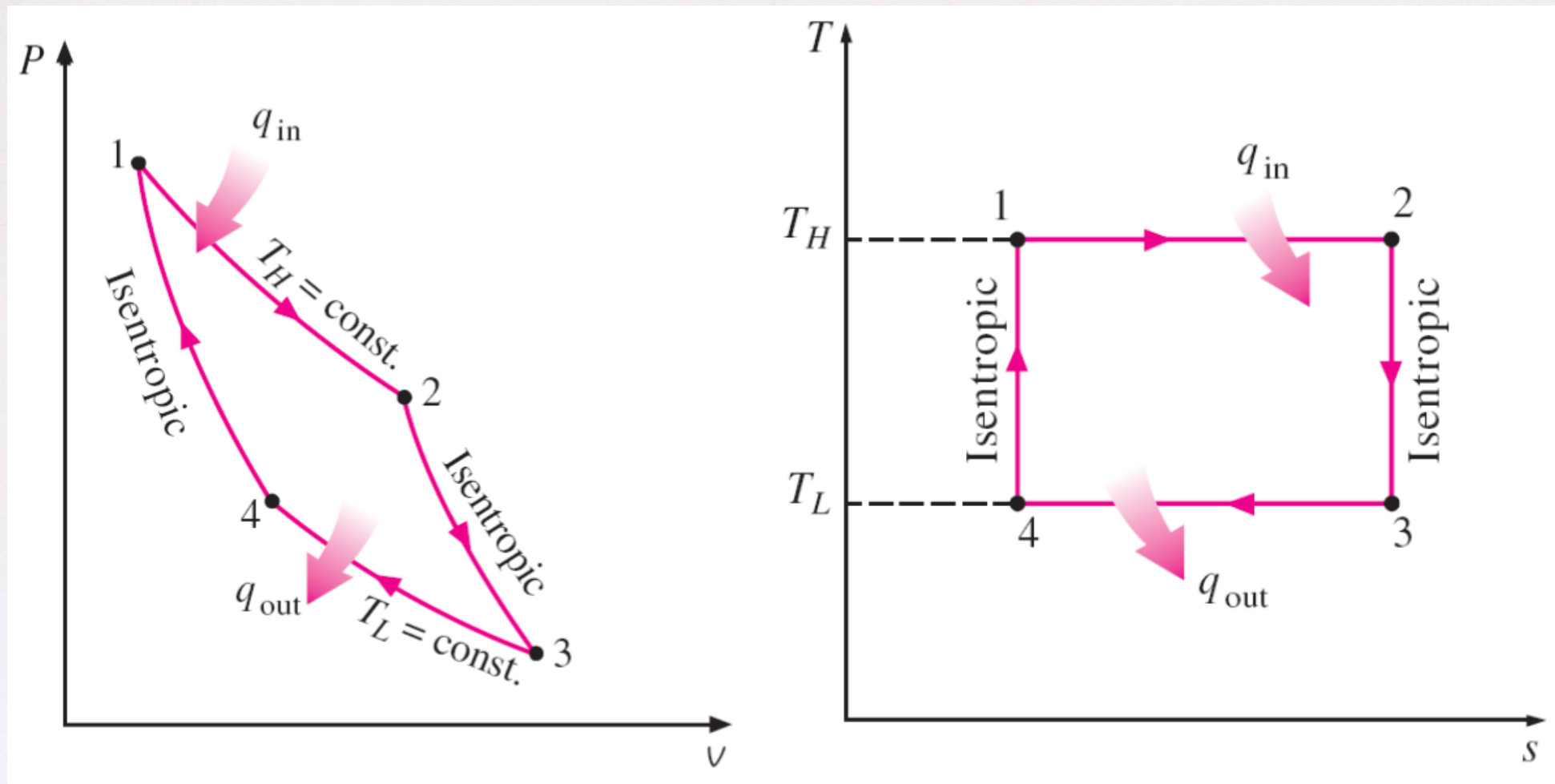


# Ciclos Termodinâmicos

- Ciclo de Carnot (ciclo ideal) - 1824
  - Ciclo Stirling (combustão externa) - motor 1816 / 1827 / 1840
  - Ciclo Rankine (turbina a vapor) - 1859
  - Ciclo Brayton (turbina a gás) - 1870
  - Ciclo Otto (motor a gasolina) - 1876
  - Ciclo Diesel (motor a diesel) - 1893 / 1897
  - Ciclo Misto (Sabathé ou Seiliger) - 1910
- (...)

# Ciclos Termodinâmicos

- Ciclo de Carnot

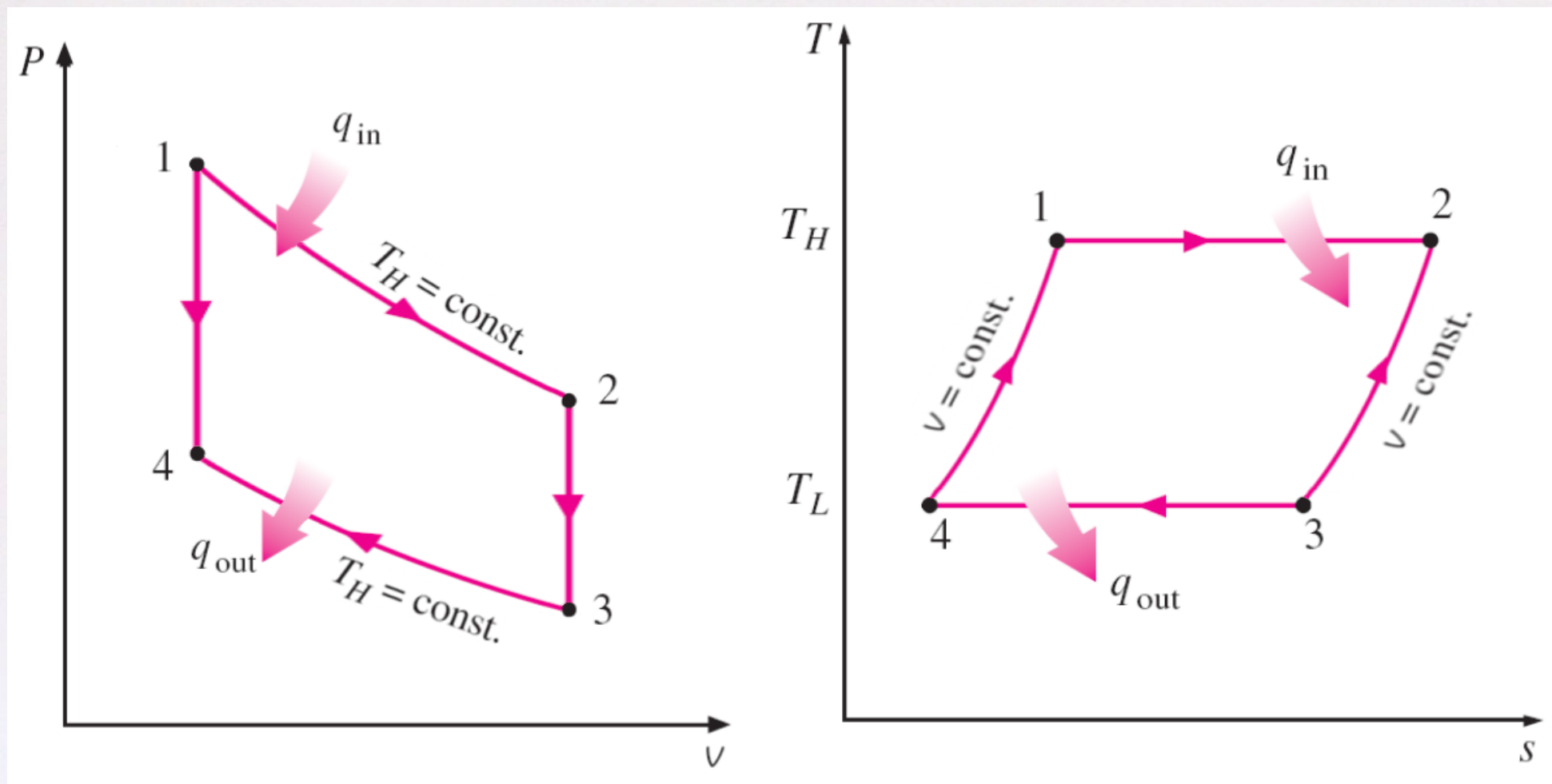


[Figuras adaptadas de: [http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5\\_1.pdf](http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5_1.pdf)]



# Ciclos Termodinâmicos

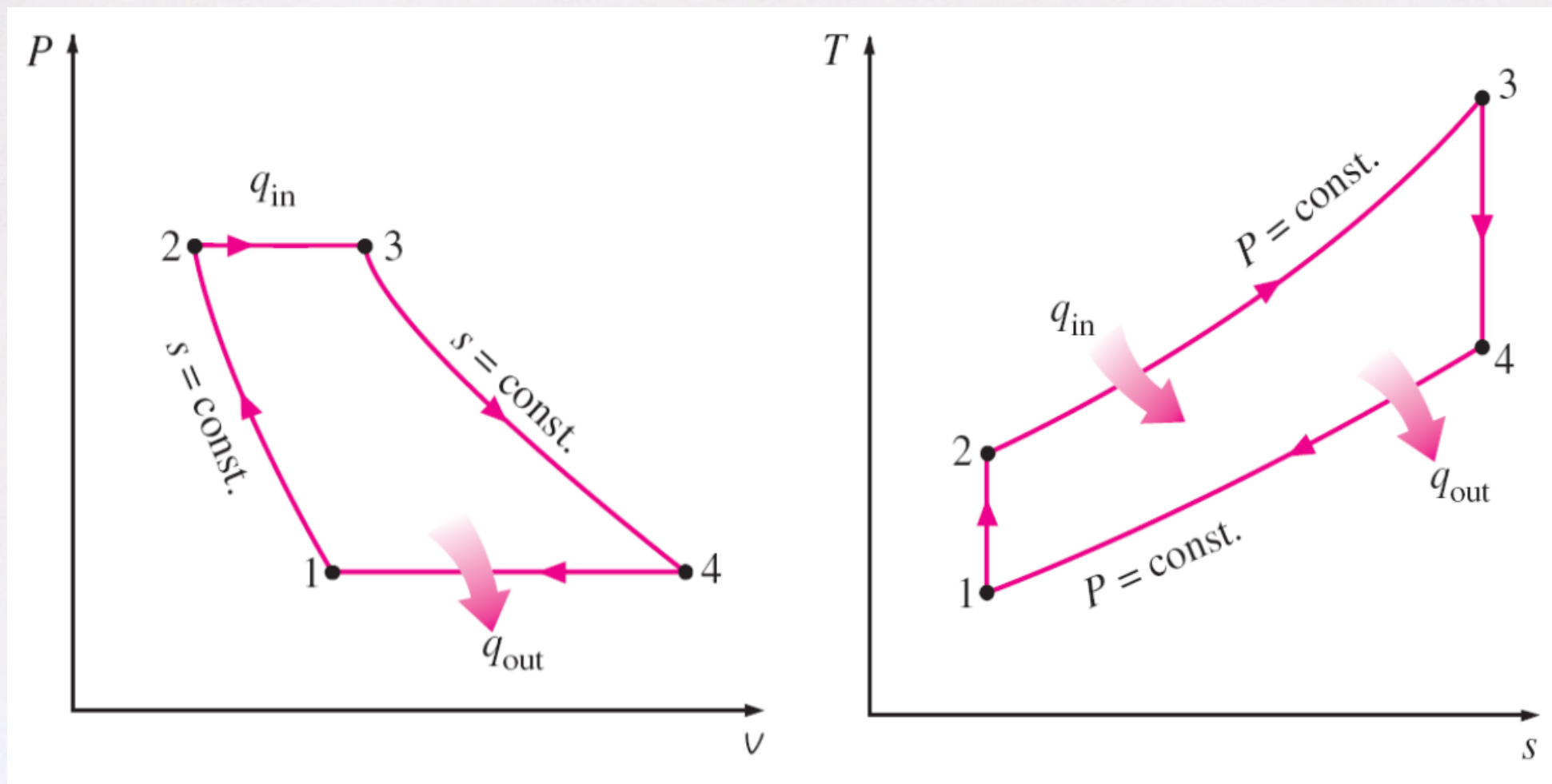
## - Ciclo Stirling



[Figuras adaptadas de: [http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5\\_1.pdf](http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5_1.pdf)]

# Ciclos Termodinâmicos

- Ciclo Brayton

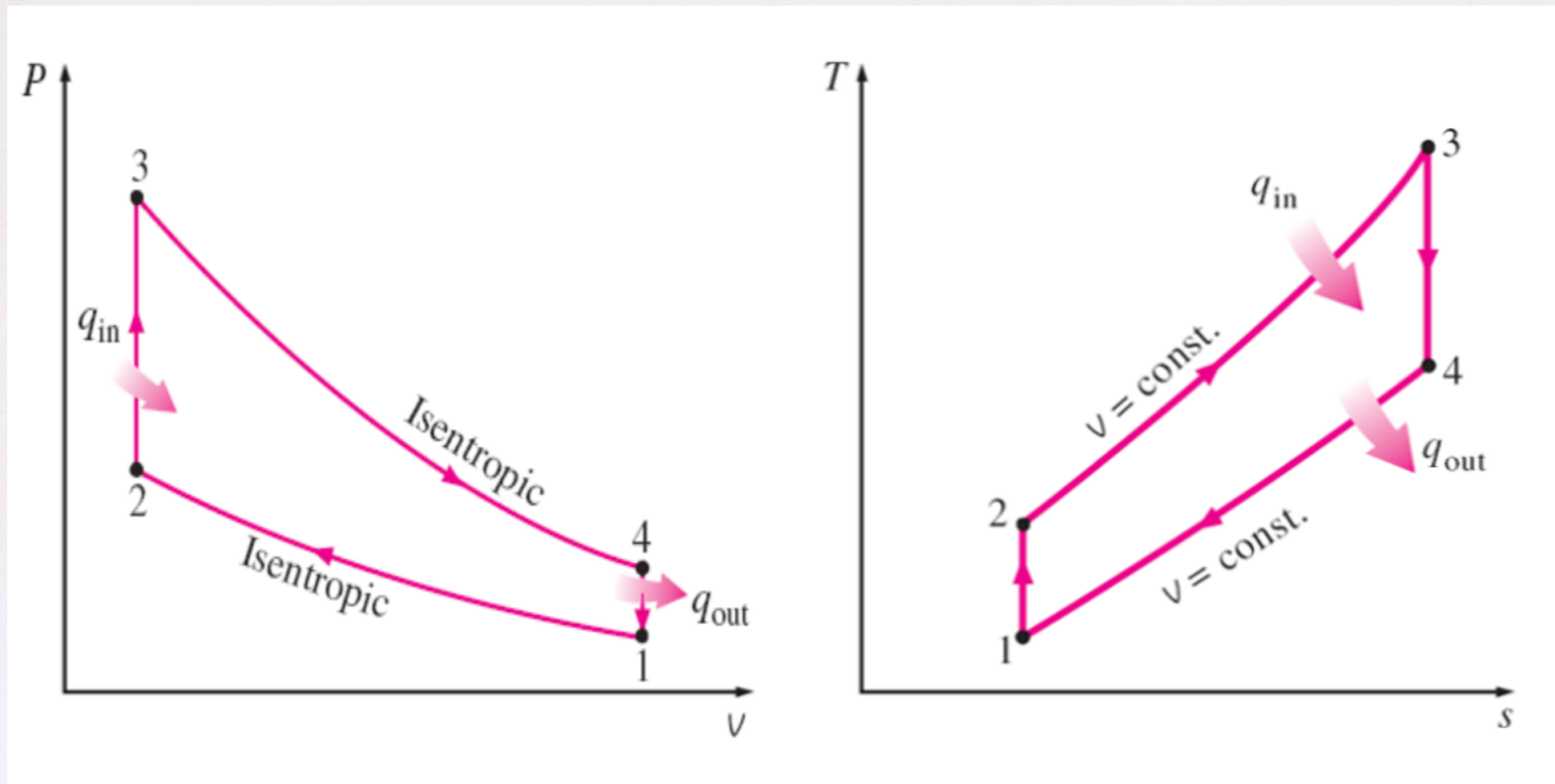


[Figuras adaptadas de: [http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5\\_1.pdf](http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5_1.pdf)]



# Ciclos Termodinâmicos

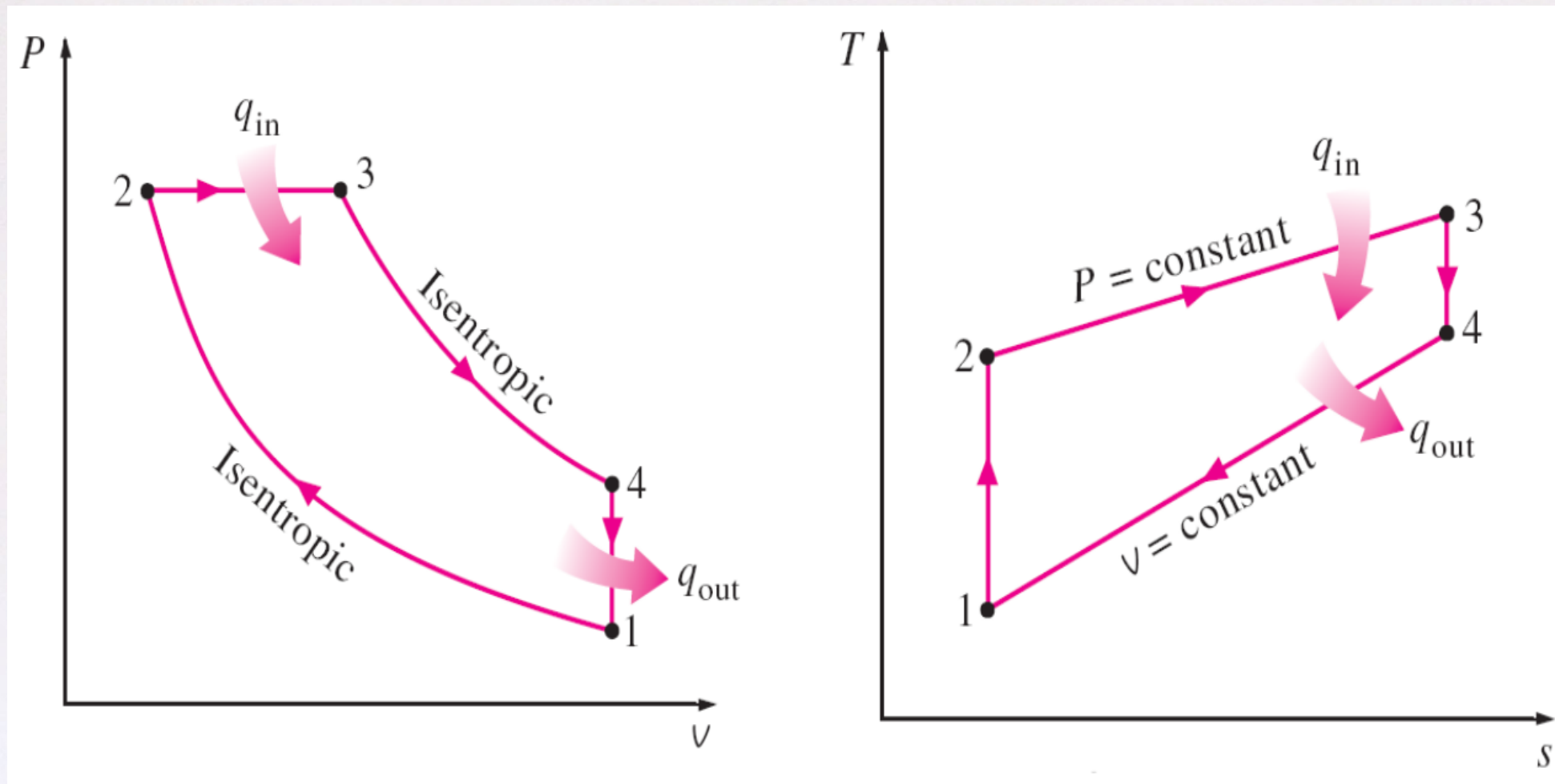
- Ciclo Otto



[Figuras adaptadas de: [http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5\\_1.pdf](http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5_1.pdf)]

# Ciclos Termodinâmicos

- Ciclo Diesel

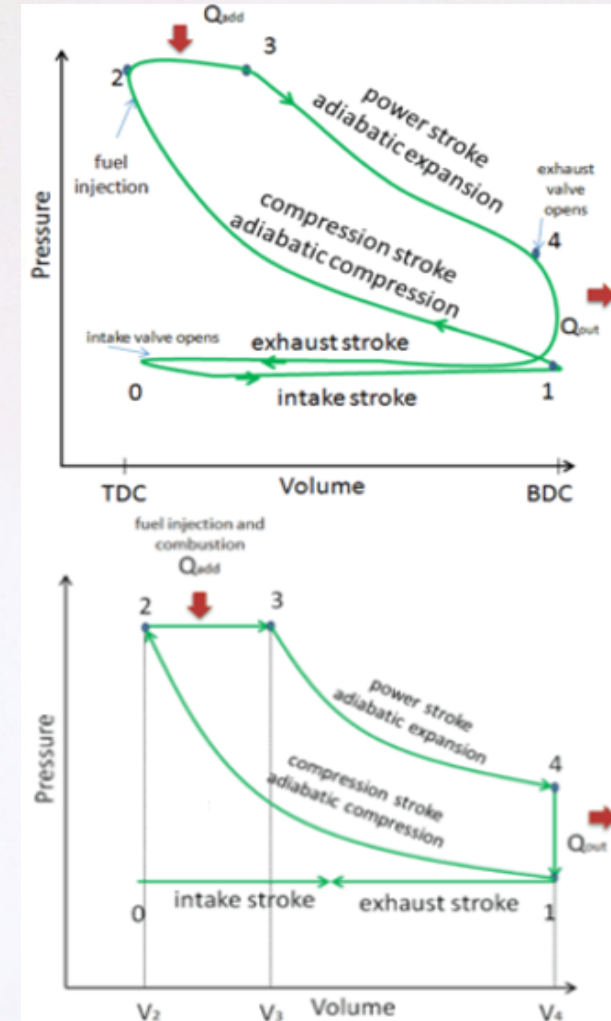
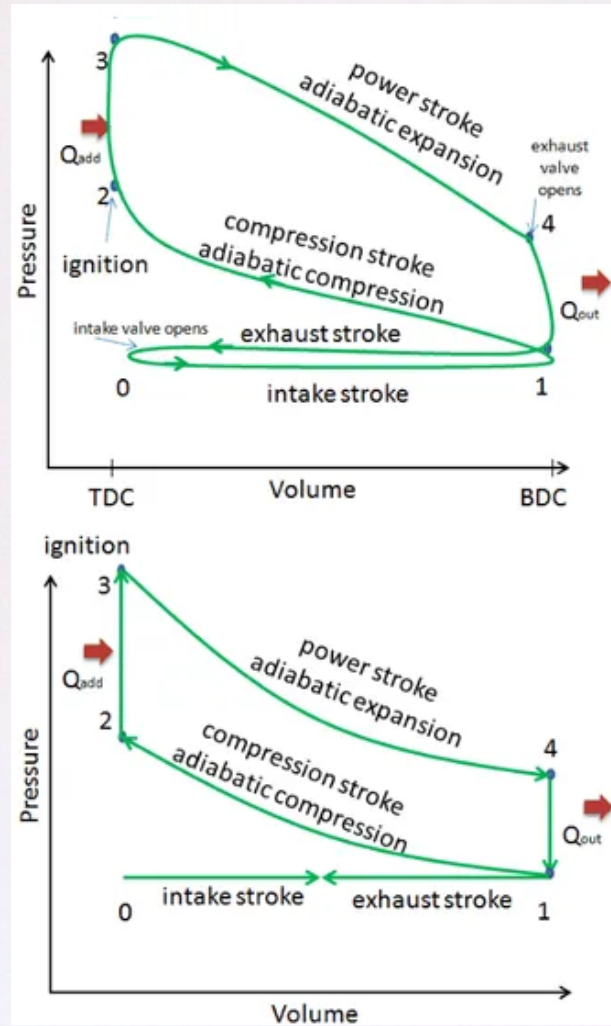


[Figuras adaptadas de: [http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5\\_1.pdf](http://www.polo.ufsc.br/fmanager/polo2016/materiais/arquivo5_1.pdf)]



# Ciclos Termodinâmicos

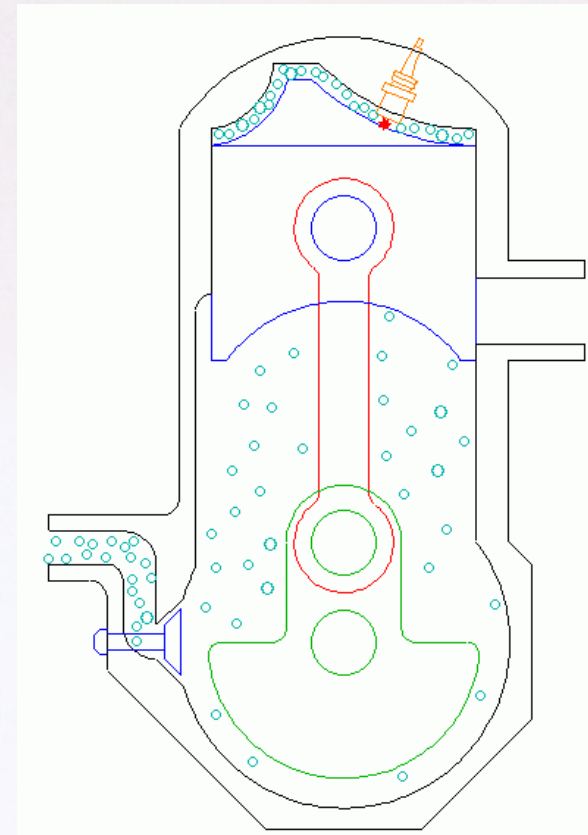
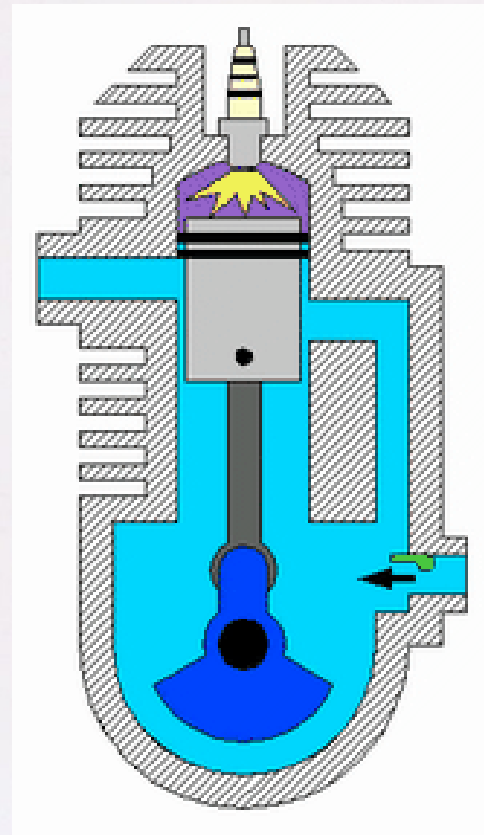
Ciclos Otto e Diesel reais



[Figuras adaptadas de: <https://www.thermal-engineering.org/>]

# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 2T (2 tempos):

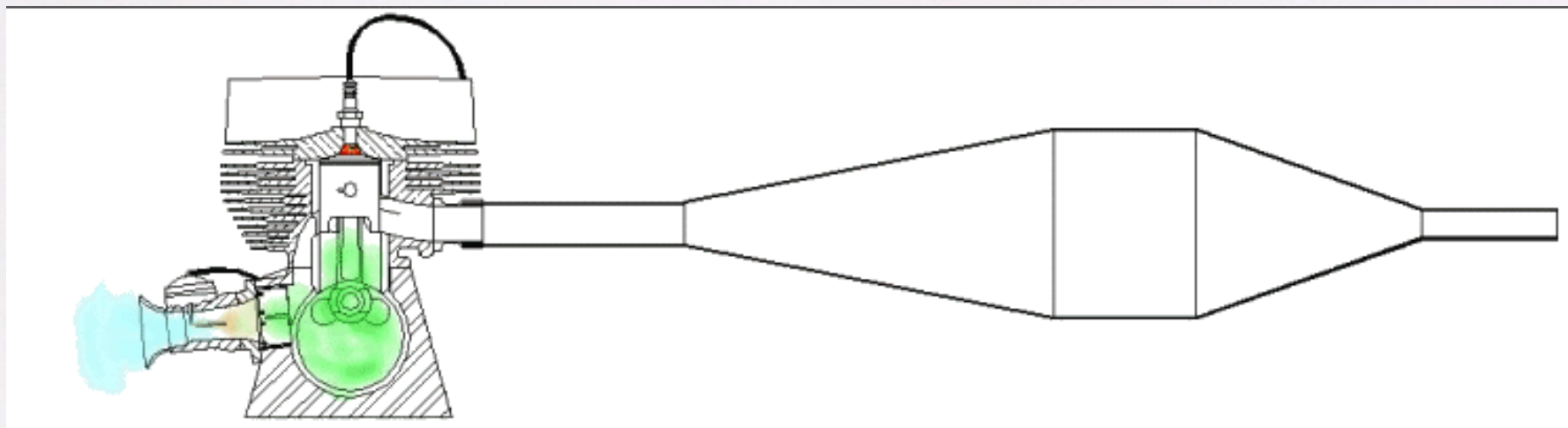


[Figuras: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Two-Stroke\\_Engine.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Two-Stroke_Engine.gif) ; <http://animatedengines.com/twostroke.html>]



# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 2T (2 tempos):

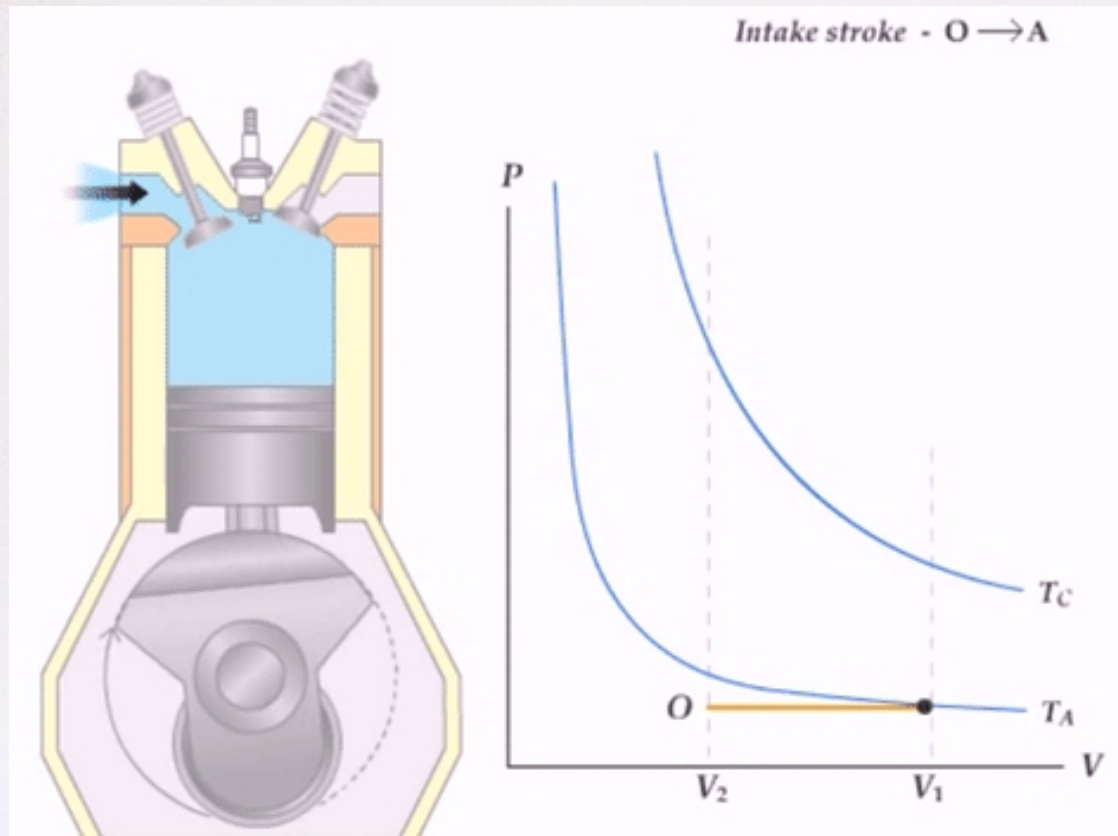


[Figura: <http://www.schwabenkart.de/KnowHow/2Takte.html>]

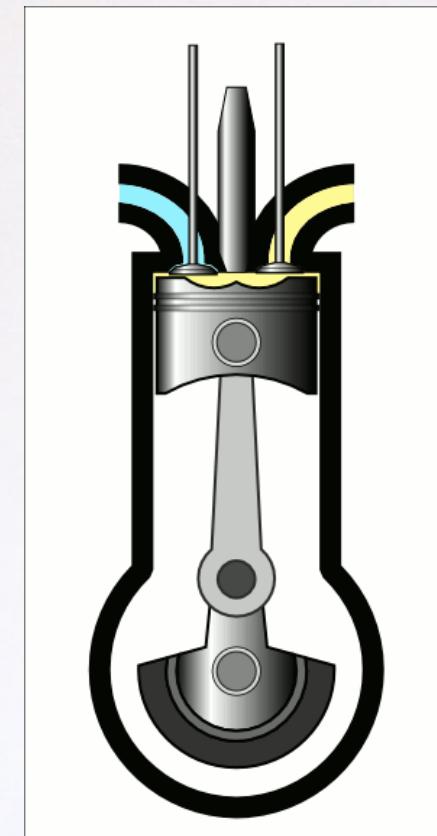
# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 4T (4 tempos):

(Gasolina)



(Diesel)





# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 2T: Yamaha RD 350 C (1976)



(Viúva Negra)

[Figuras: [https://www.motorcyclespecs.co.za/model/yamaha/yamaha\\_rd350%2076.htm](https://www.motorcyclespecs.co.za/model/yamaha/yamaha_rd350%2076.htm)

- Motor 4T: Honda CB 750 Four K6 (1976)



;  
[https://www.motorcyclespecs.co.za/model/Honda/honda\\_cb750k\\_76.html](https://www.motorcyclespecs.co.za/model/Honda/honda_cb750k_76.html)]



# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 2T: Yamaha RD 350 LC (1986)



- Motor 4T: Honda CBX 750F (1986)



(7-galo)

[Figuras: <http://rd350lc.net/page1YH-86.htm>

; <https://autoesporte.globo.com/carros/carros-usados/noticia/2016/10/achado-usado-que-tal-mais-rara-das-honda-sete-galo.ghtml>]

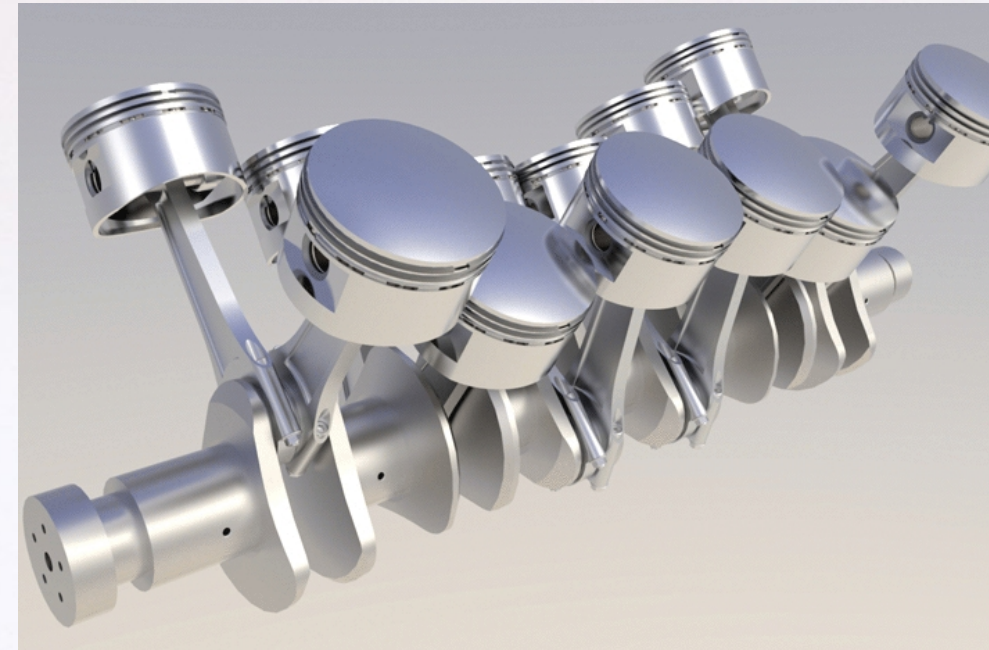


# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor 6 cilindros em linha

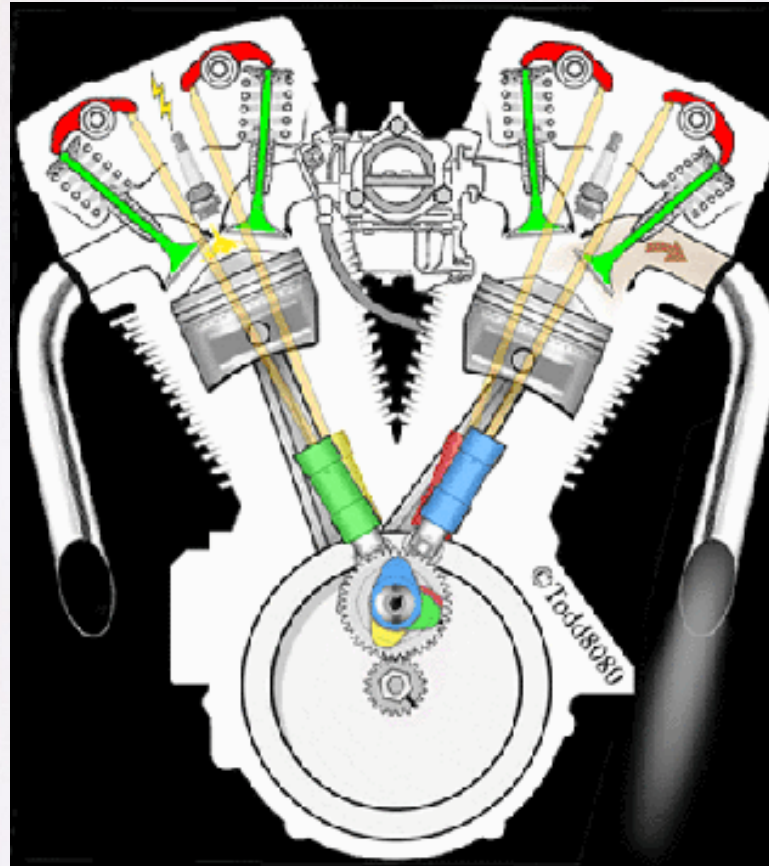


- Motor 12 cilindros em V





# Ciclos Termodinâmicos - Motores

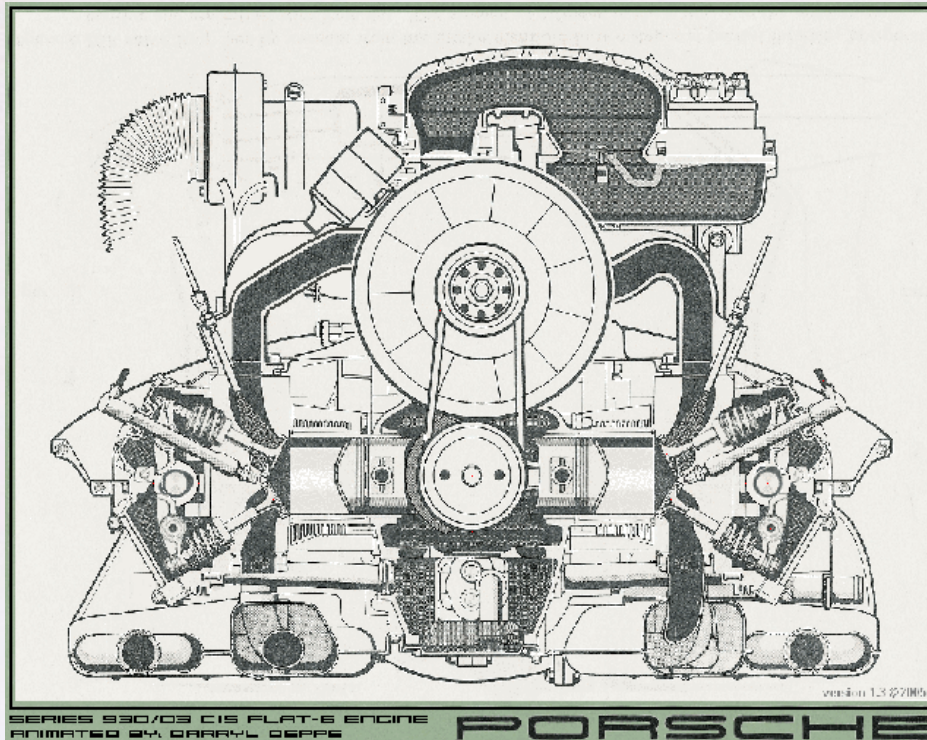


[Figura: <https://www.tecmundo.com.br/carro/39665-gifs-animados-explicam-como-o-seu-carro-funciona.htm>]

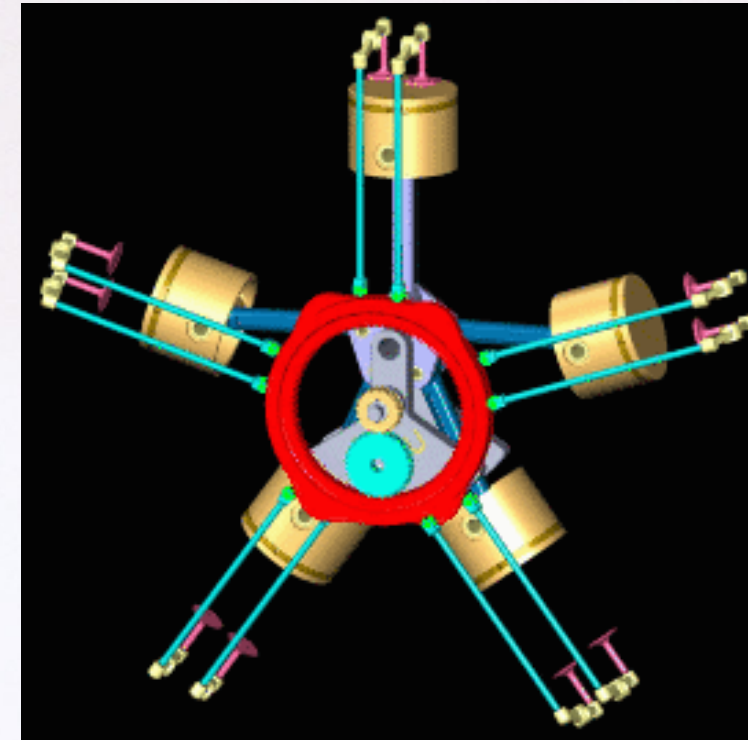


# Ciclos Termodinâmicos - Motores

- Motor plano



- Motor radial





# Ciclos Termodinâmicos - Motores

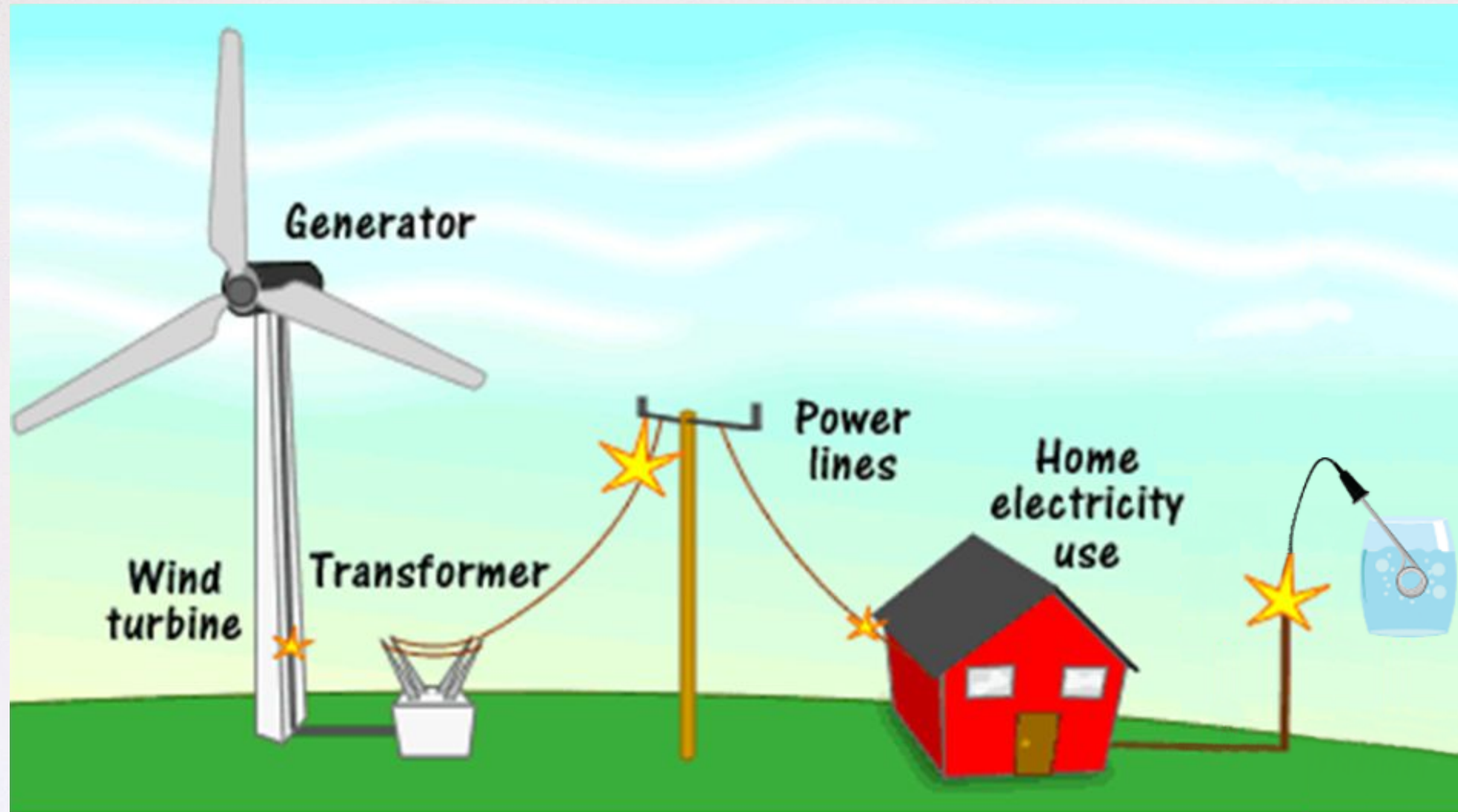


[Figura: <https://i.imgur.com/zT9oRte.gif>]



# 2ª Lei da Termodinâmica

# 2ª Lei da Termodinâmica



[Figura adaptada de: <https://topwindmill.blogspot.com/2020/10/windmills-make-electricity.html>]



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Alguns processos ocorrem em um sentido e não no sentido inverso.
- Fluxo de energia térmica ocorre do corpo com  $T$  mais alta para o corpo com  $T$  mais baixa.
- De acordo com a 1ª lei da Termodinâmica a energia é sempre conservada ( $\Delta U = Q + W$ ).

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Alguns processos ocorrem em um sentido e não no sentido inverso.
- Fluxo de energia térmica ocorre do corpo com  $T$  mais alta para o corpo com  $T$  mais baixa.
- De acordo com a 1ª lei da Termodinâmica a energia é sempre conservada ( $\Delta U = Q + W$ ).
- Contudo:
  - energia térmica flui do corpo com  $T$  baixa para o corpo com  $T$  alta não viola a 1ª lei.
  - nem toda a energia pode ser utilizada para realizar trabalho útil.
- Processos reversíveis e irreversíveis ←



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Alguns processos ocorrem em um sentido e não no sentido inverso.
- Fluxo de energia térmica ocorre do corpo com  $T$  mais alta para o corpo com  $T$  mais baixa.
- De acordo com a 1ª lei da Termodinâmica a energia é sempre conservada ( $\Delta U = Q + W$ ).
- Contudo:
  - energia térmica flui do corpo com  $T$  baixa para o corpo com  $T$  alta não viola a 1ª lei.
  - nem toda a energia pode ser utilizada para realizar trabalho útil.
- Processos reversíveis e irreversíveis ←

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Todos os processos termodinâmicos que ocorrem na natureza são irreversíveis
- Processos reversíveis são idealizados e são processos de equilíbrio  
(sistema em equilíbrio termodinâmico)

→ Processo **quase-estático**:

processo reversível efetuado por uma série de transformações infinitesimais muito próximas do equilíbrio  
(**quase-equilíbrio**)

Uma transformação que não está em equilíbrio em nenhuma etapa é um processo de **não-equilíbrio**

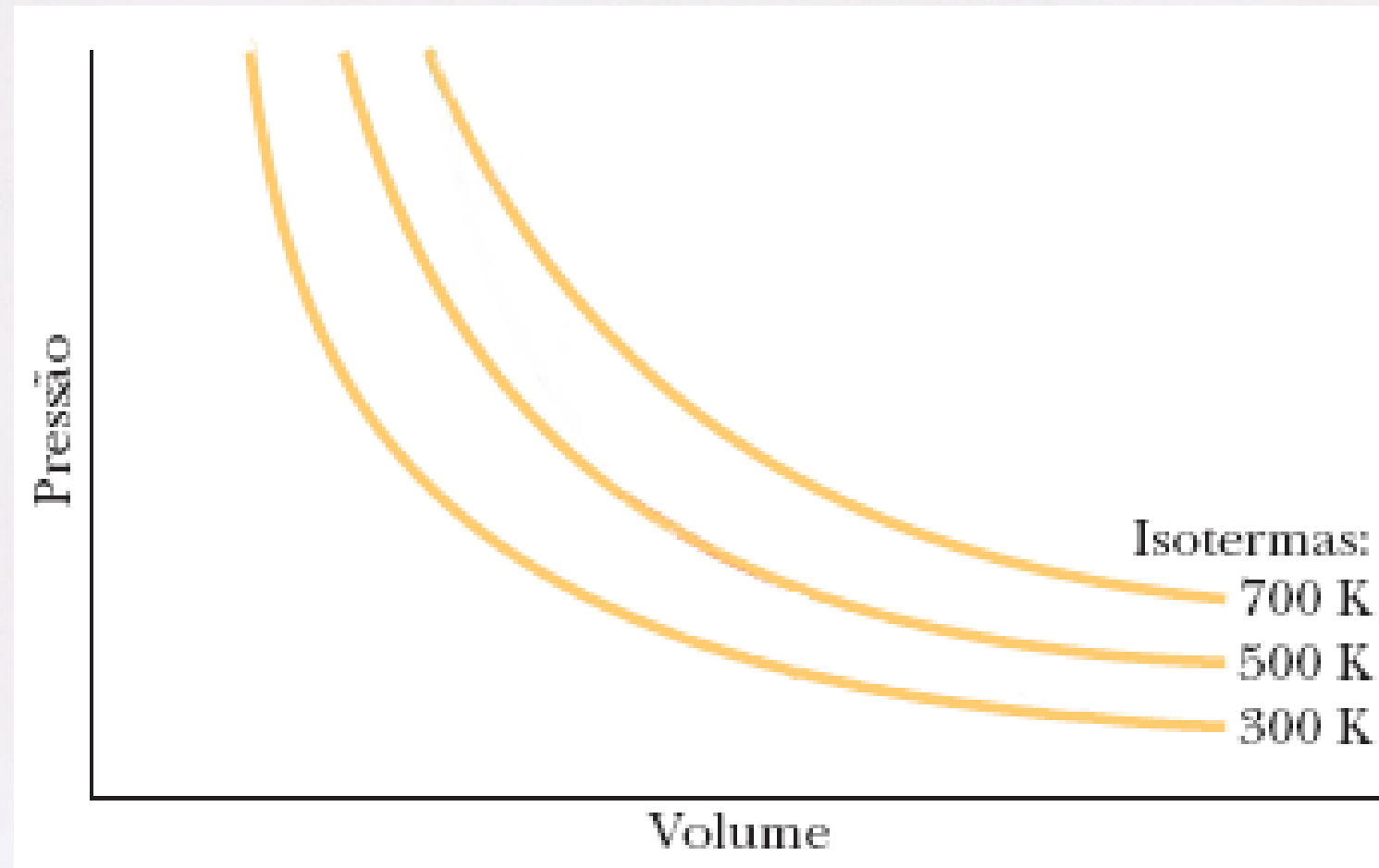


# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

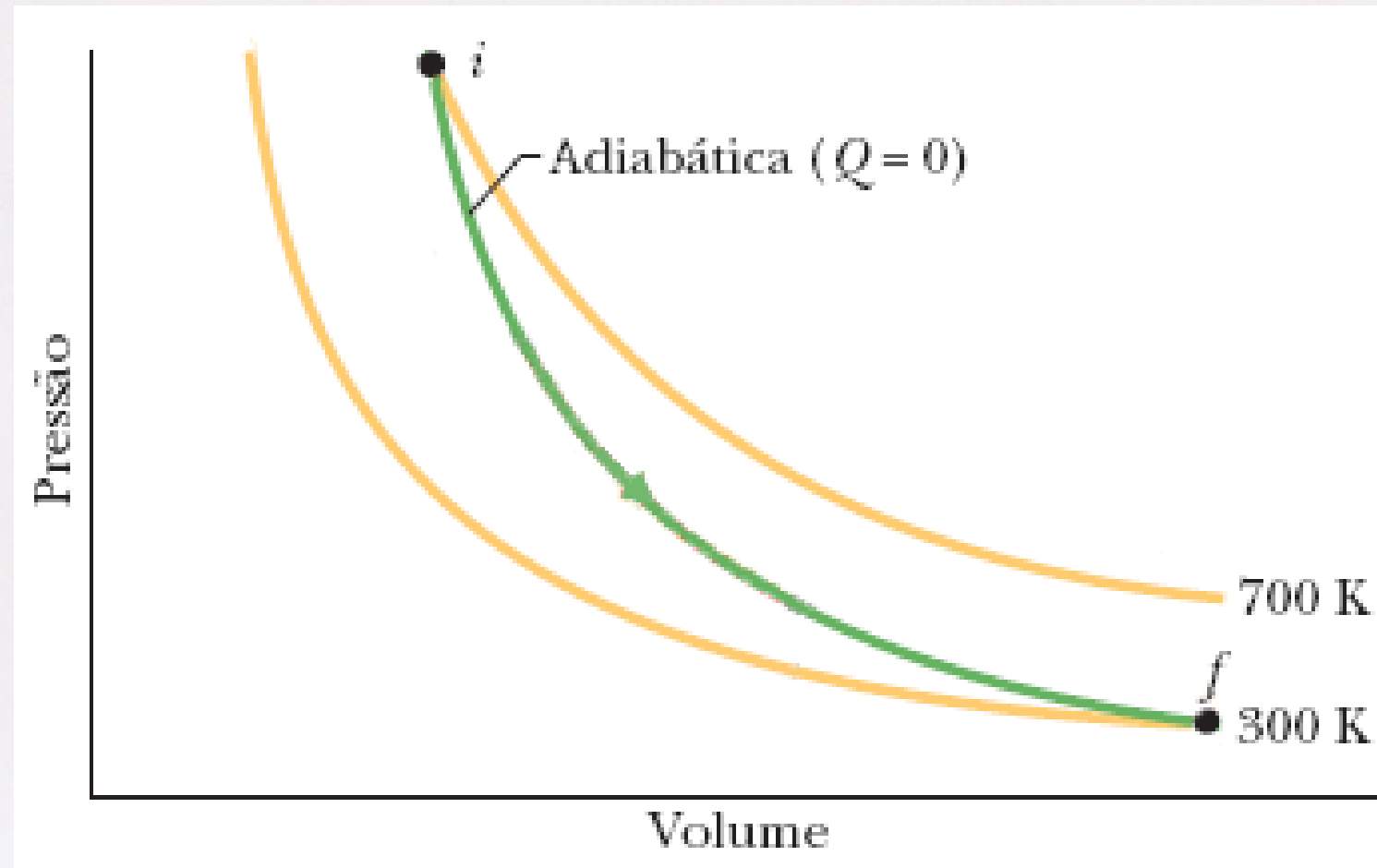


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

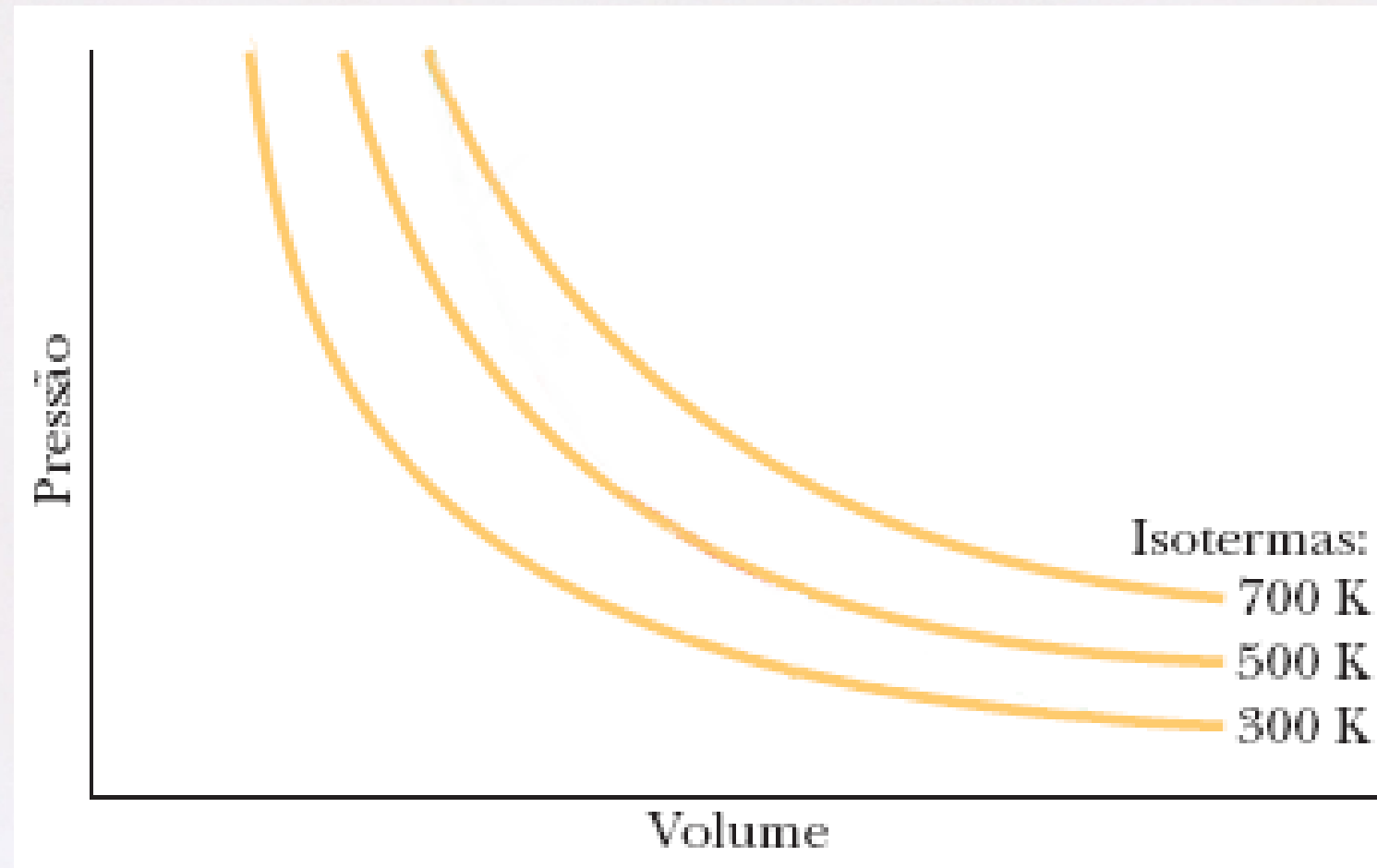
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

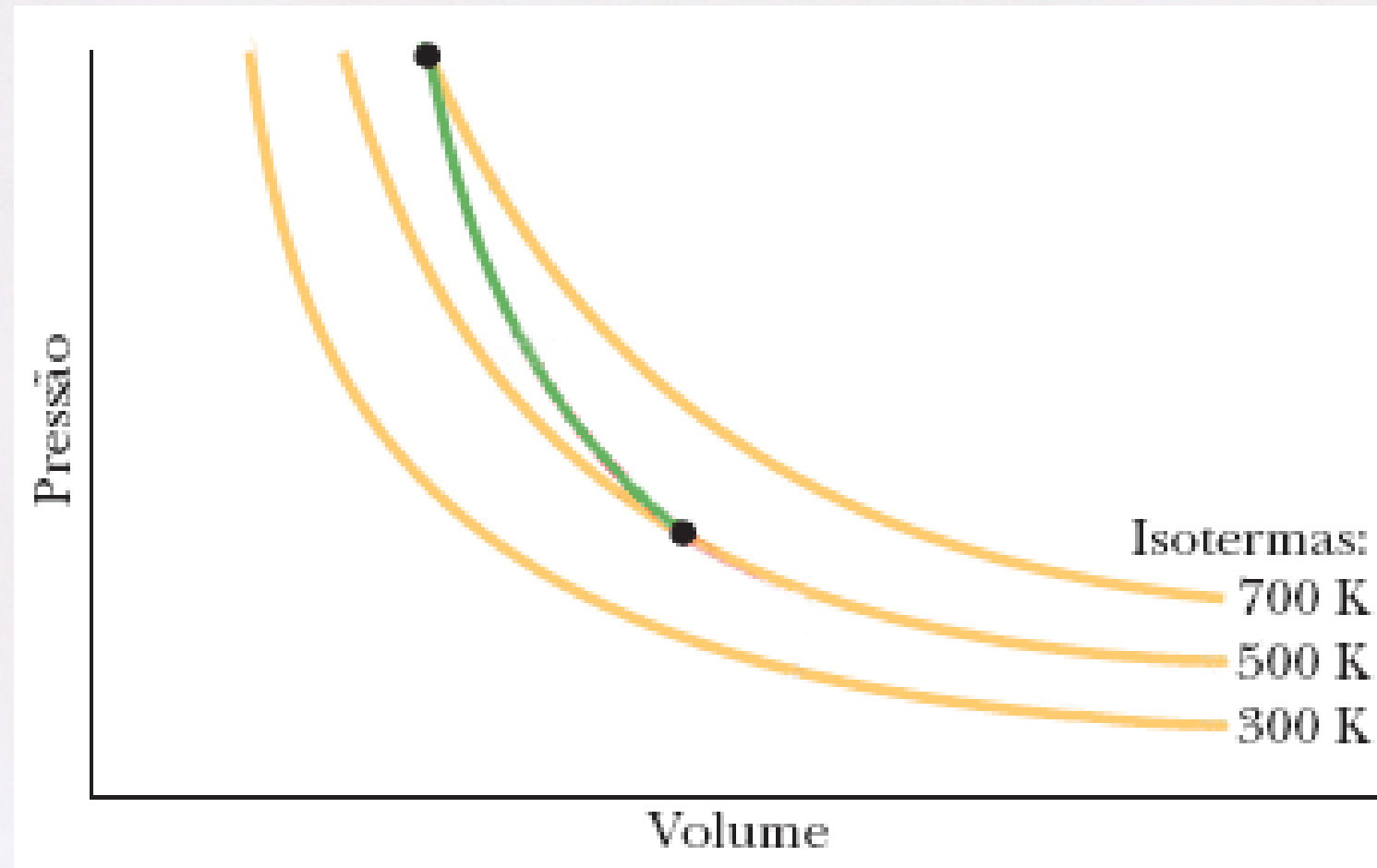


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

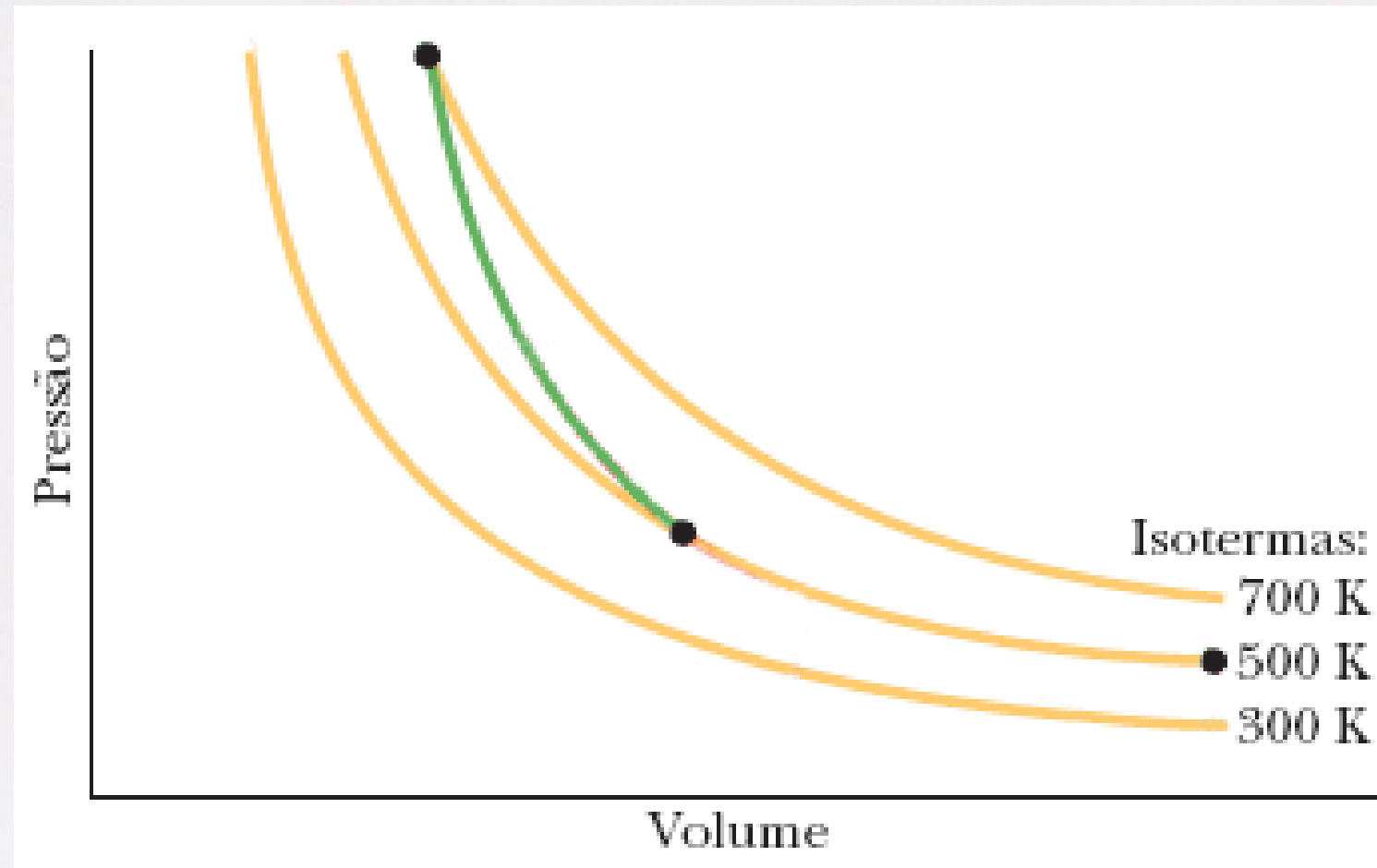
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

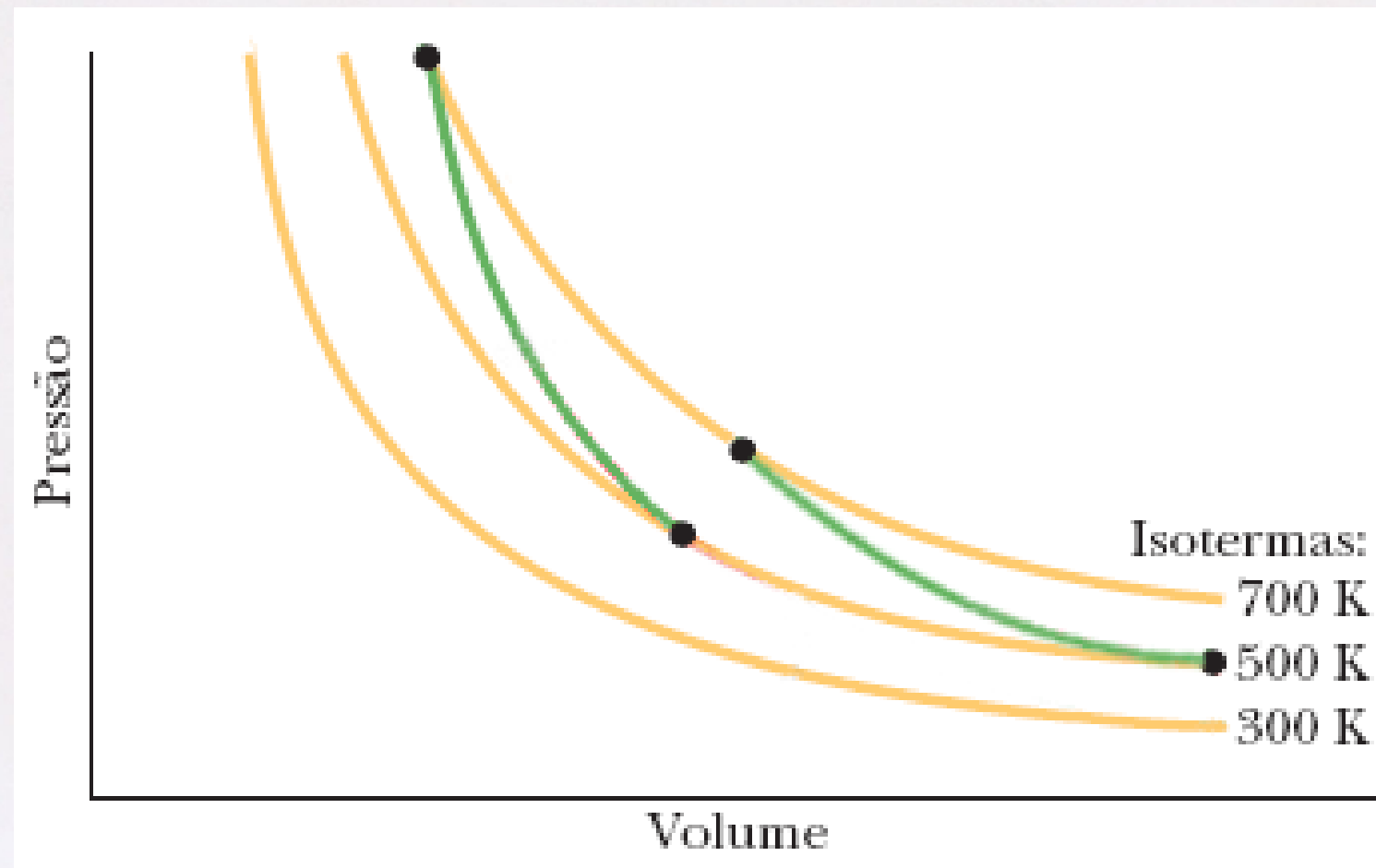


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

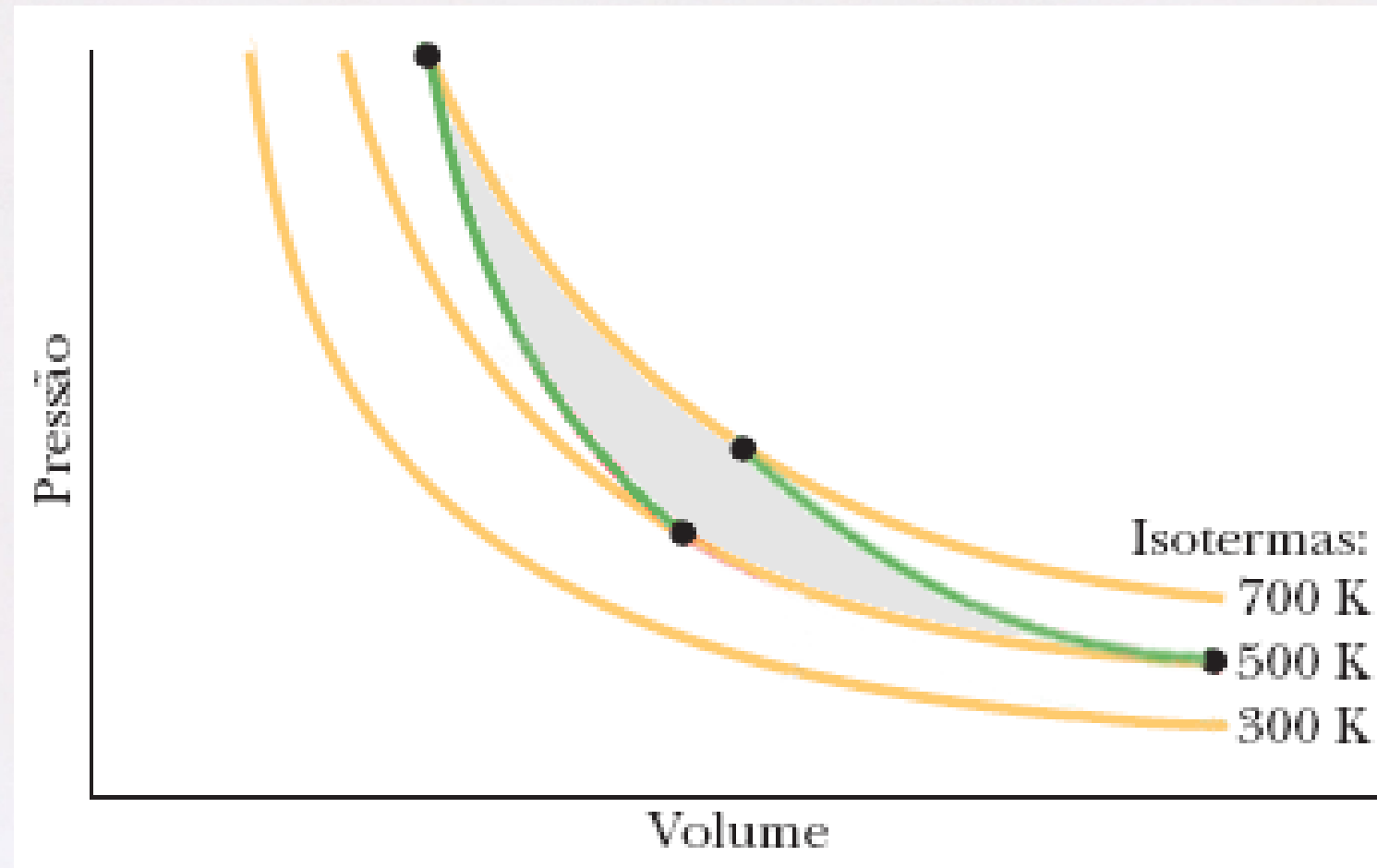
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

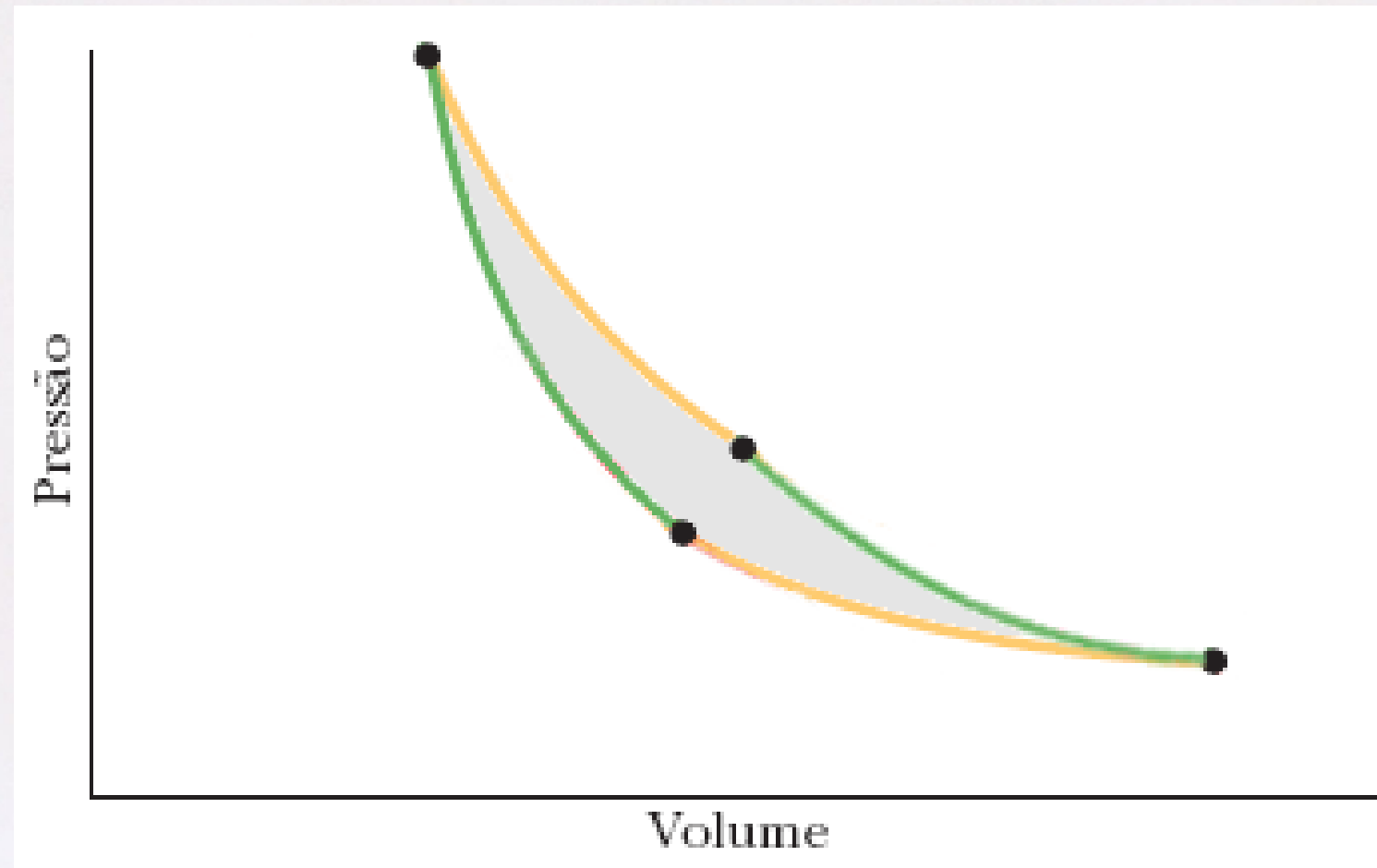


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

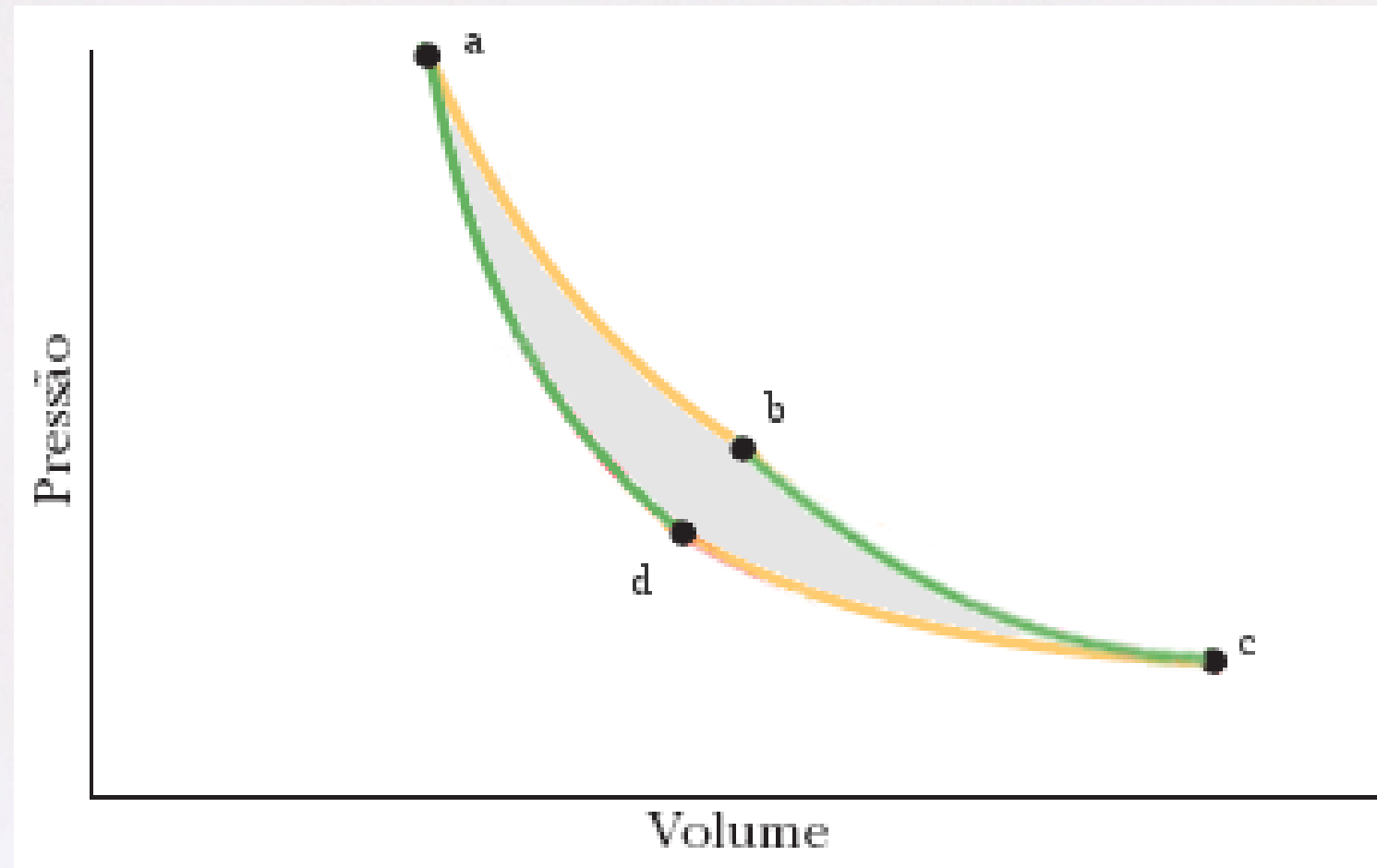
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

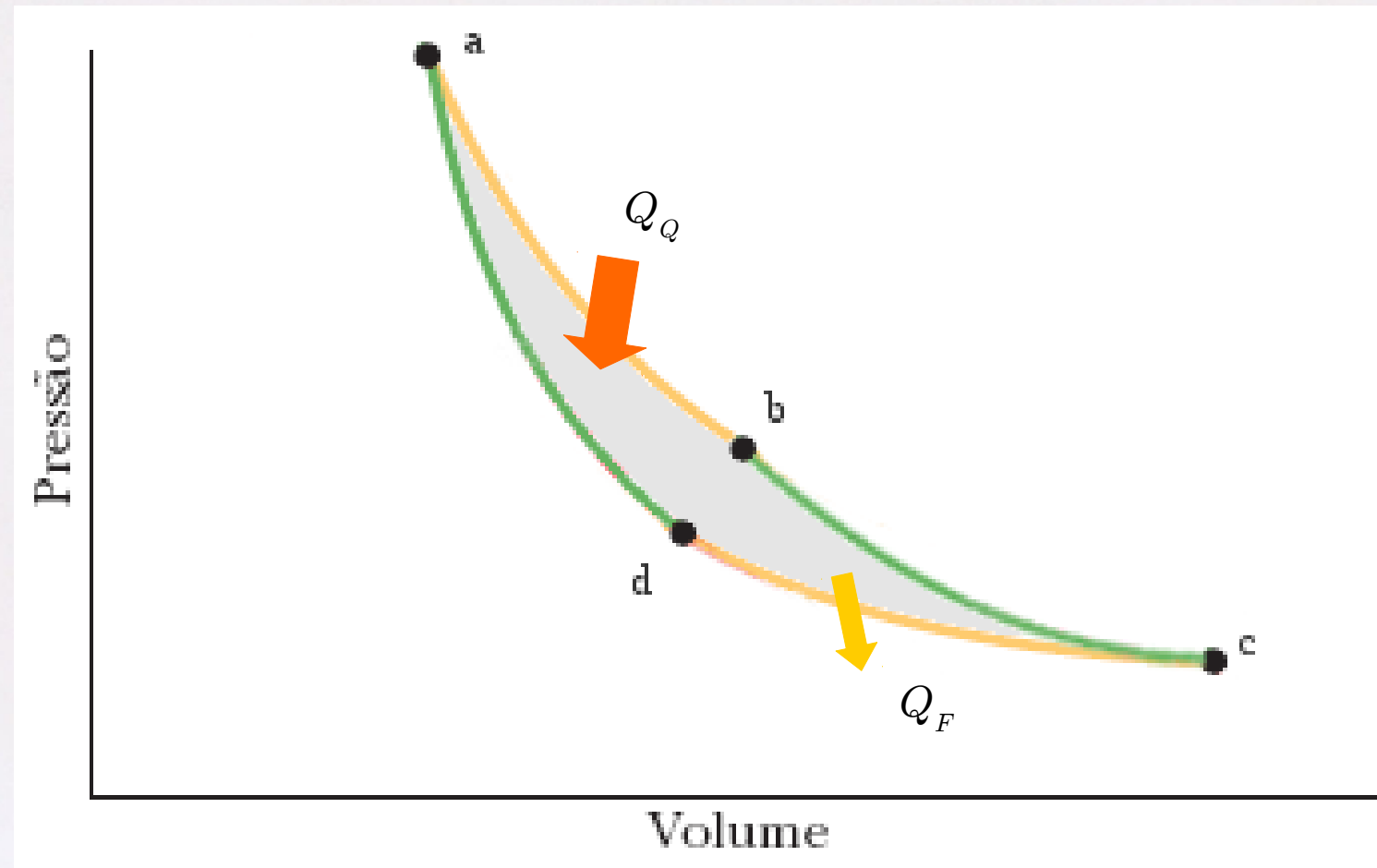


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

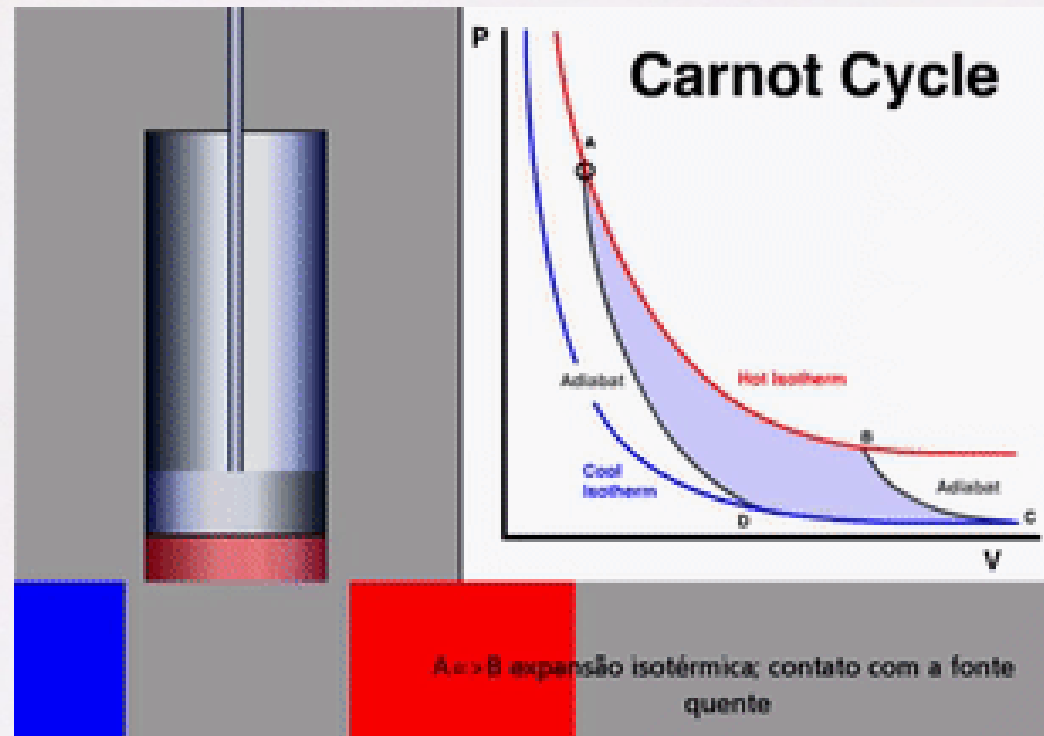
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

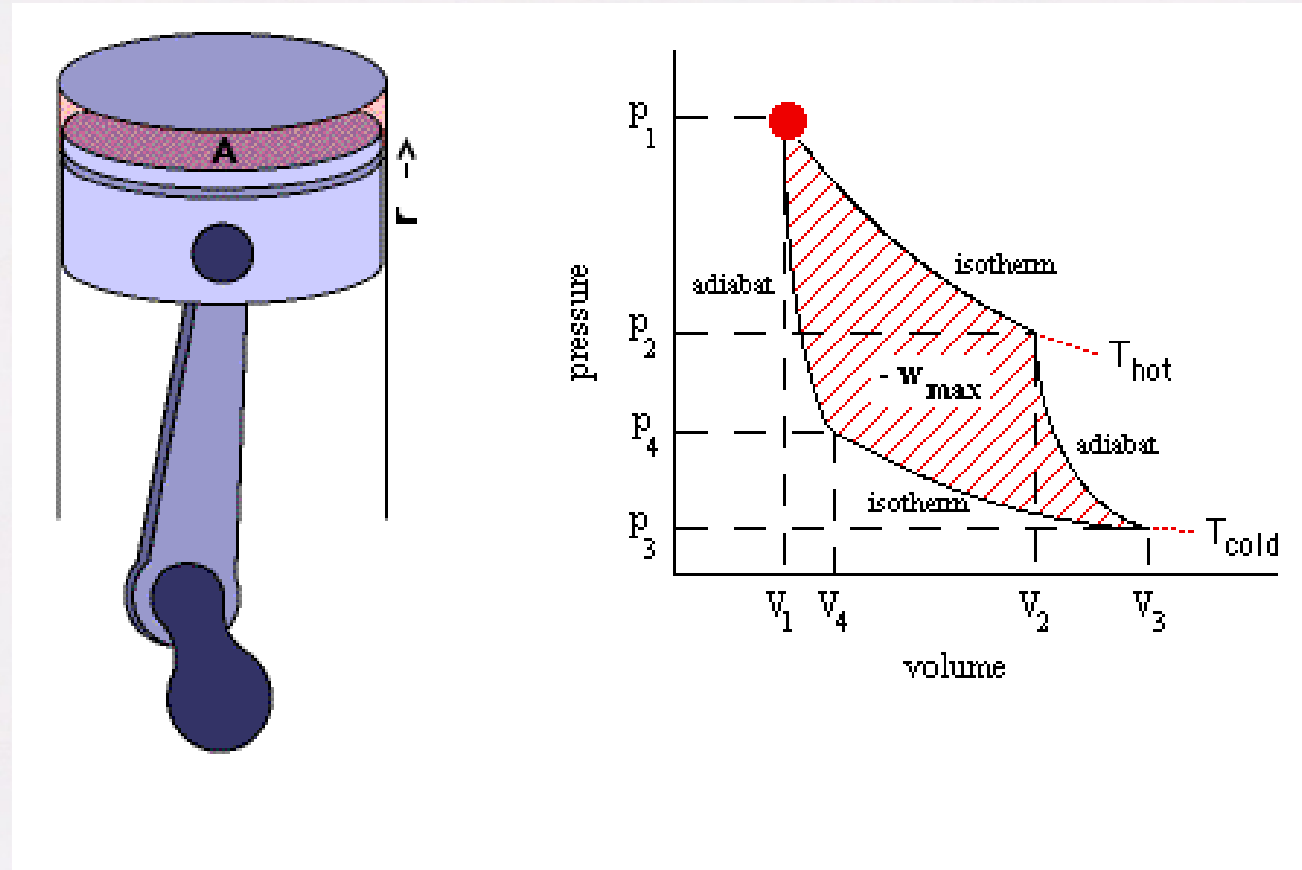


[Figura adaptada de: <https://makeagif.com/gif/-IWHq-2>]



# 2ª Lei da Termodinâmica

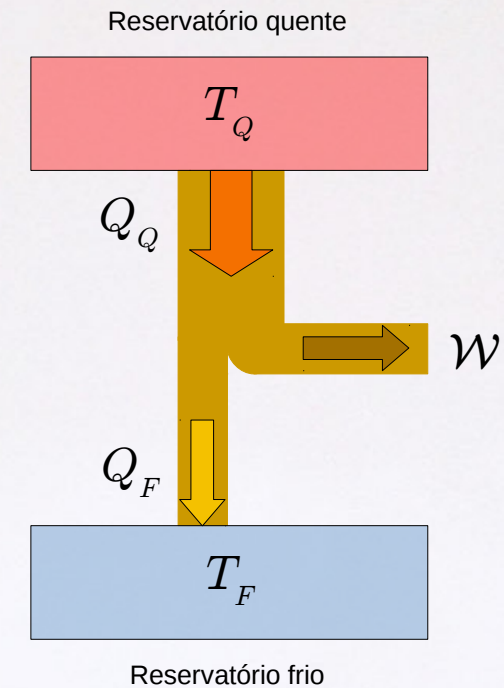
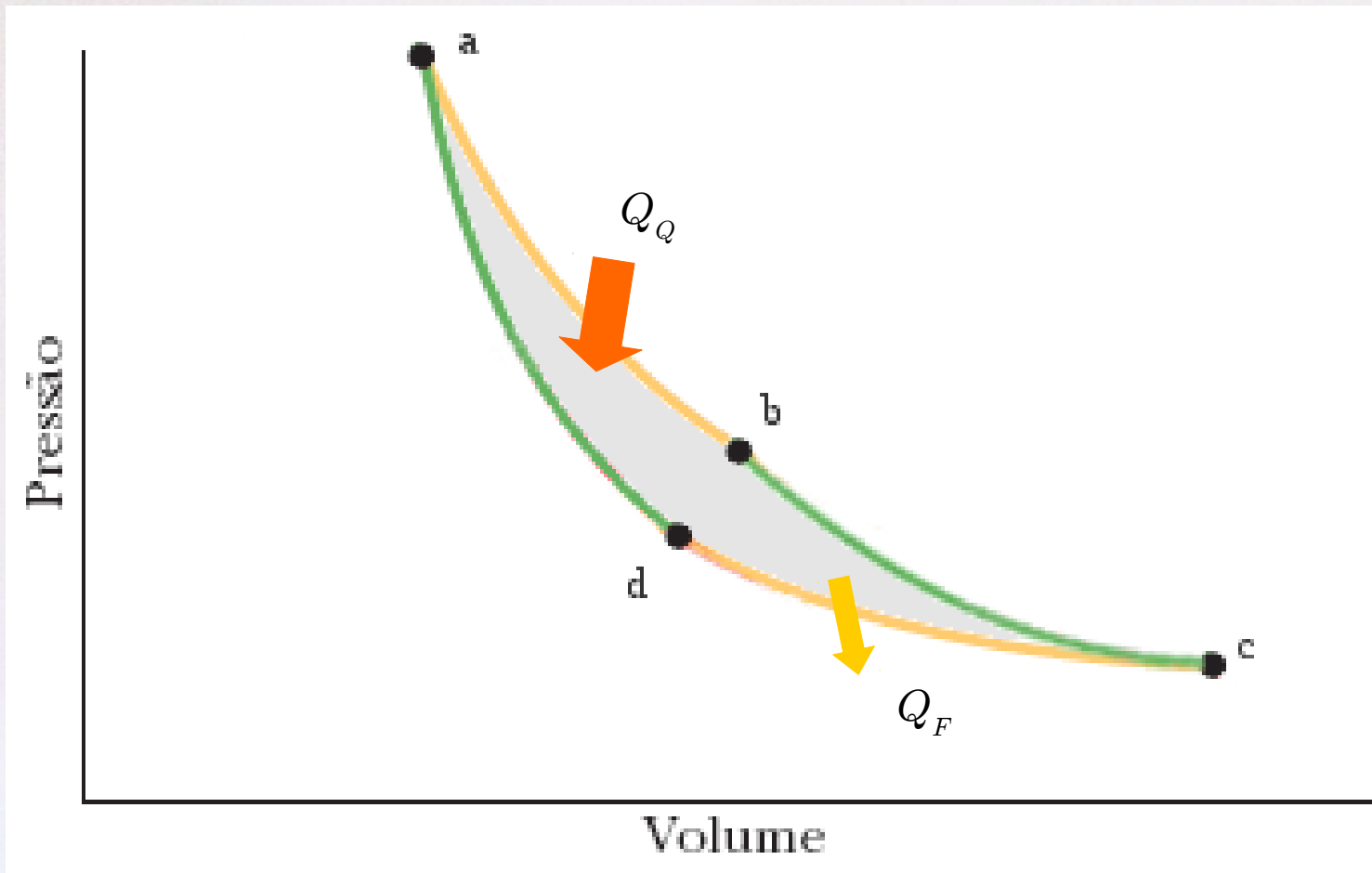
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



[Figura adaptada de: <https://sway.com/s/qXsSSE7ch5Mww4Nm/embed?accessible=true>]

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

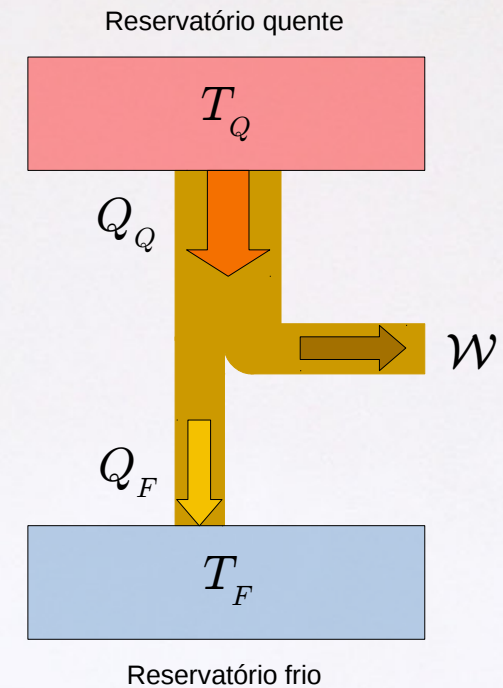
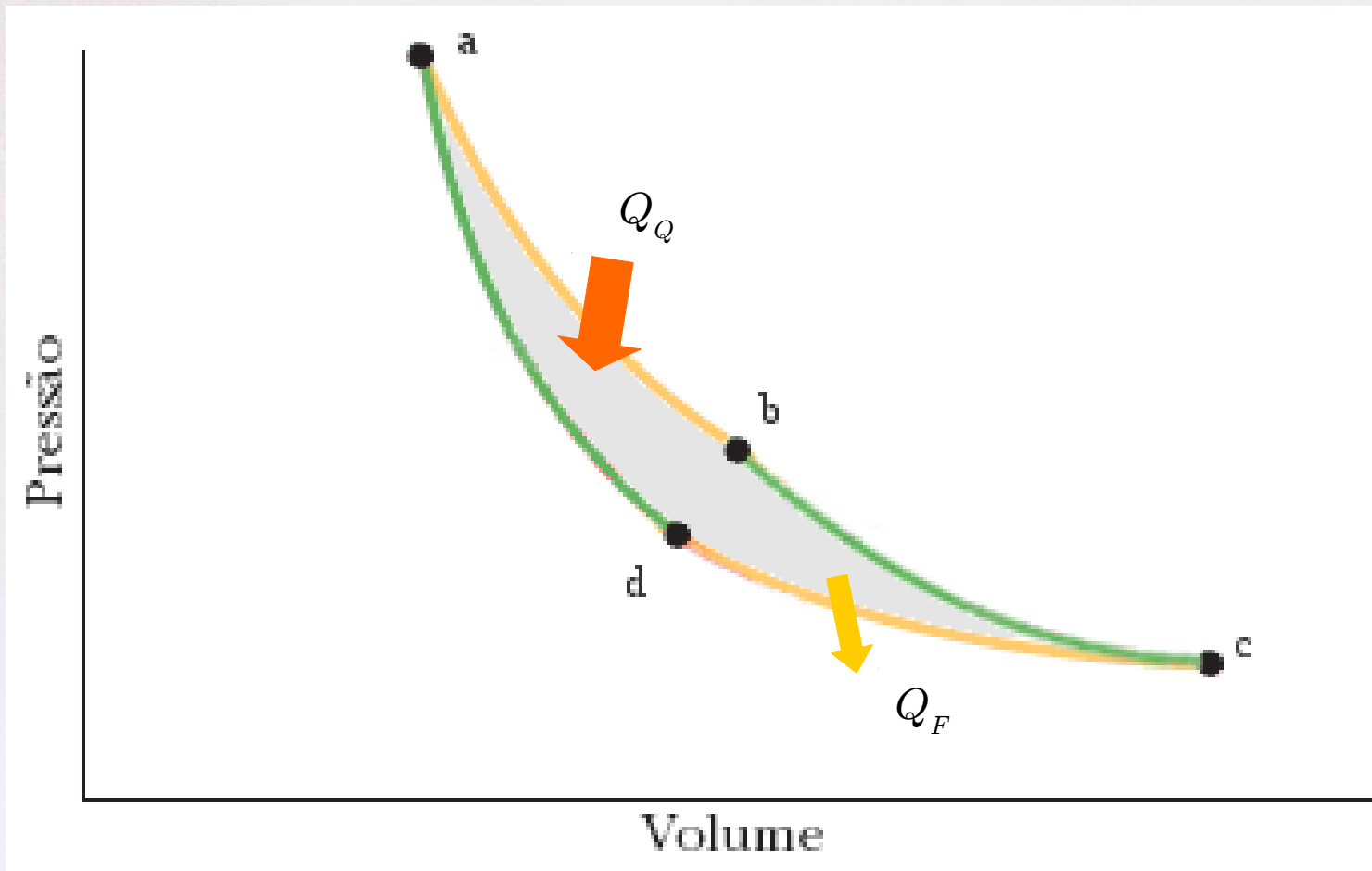


[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

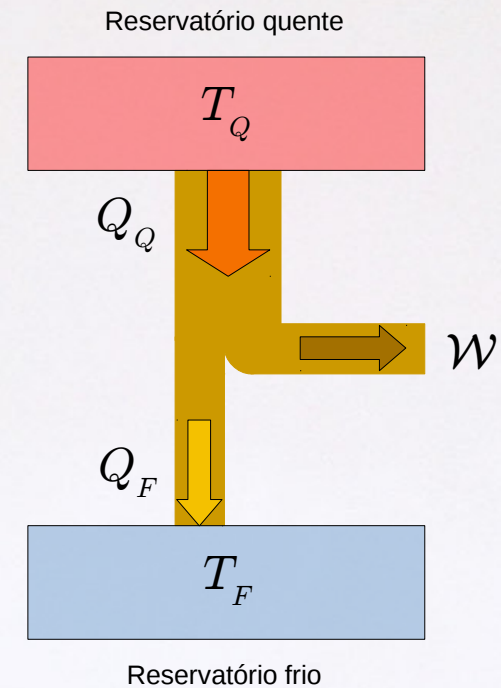
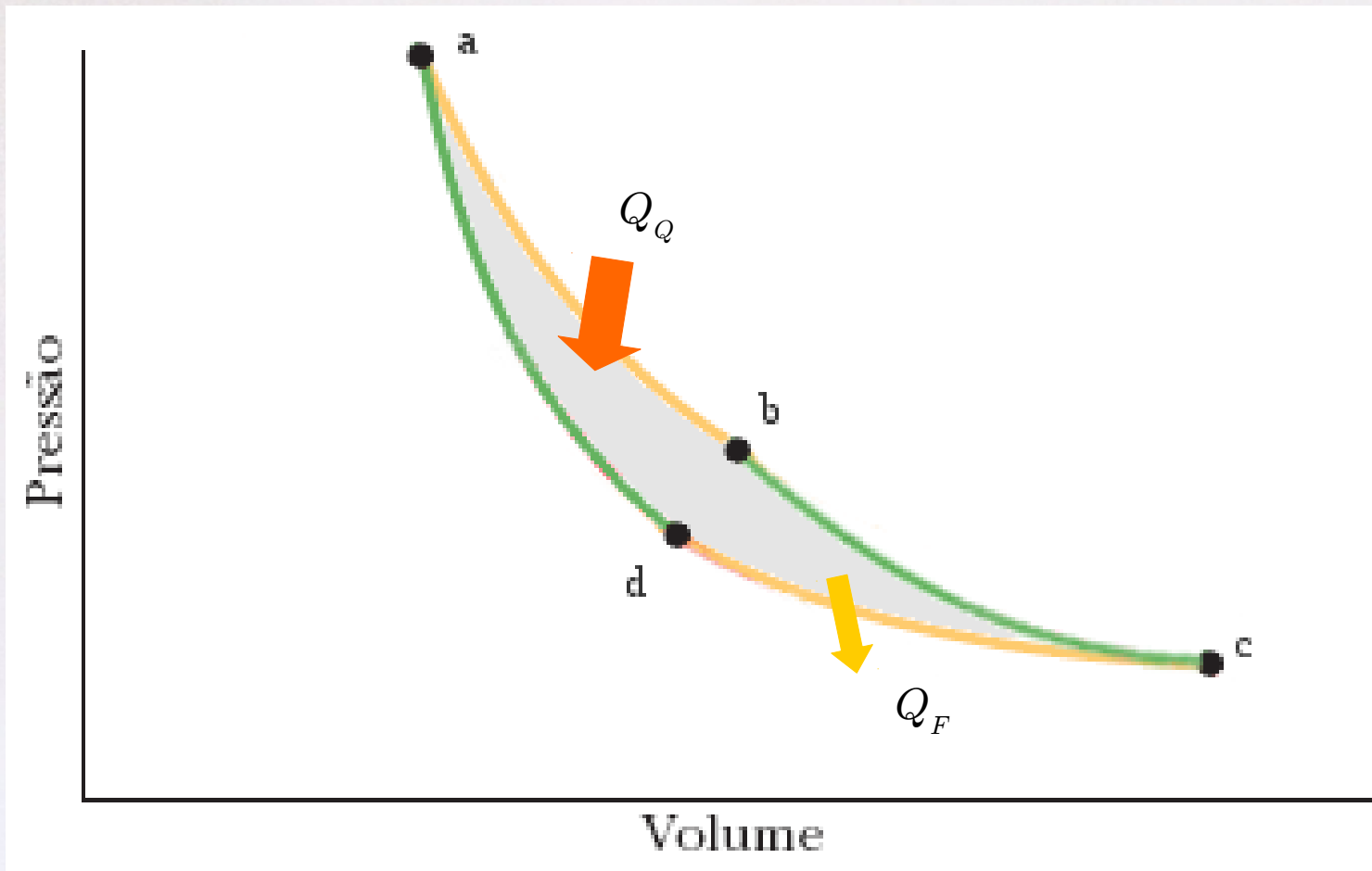
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

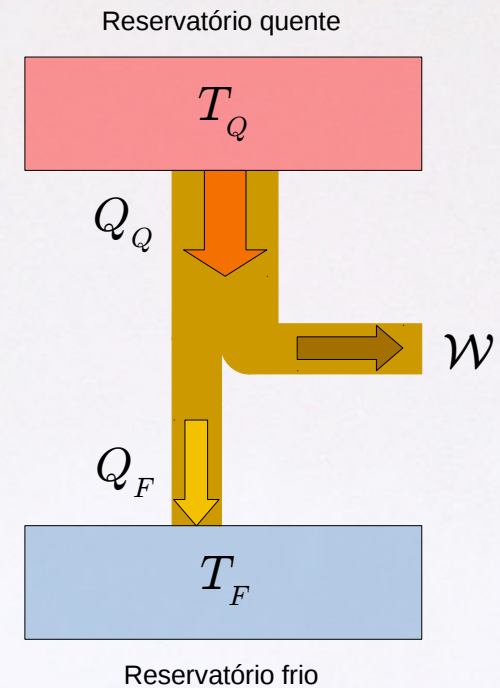
$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Eficiência ou **rendimento** de uma máquina:



$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

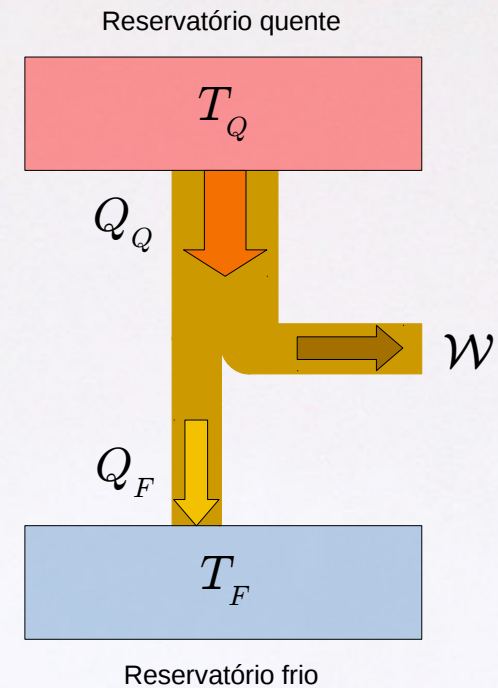
$$|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Eficiência ou **rendimento** de uma máquina:

$$\varepsilon = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$



$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

$$|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|$$



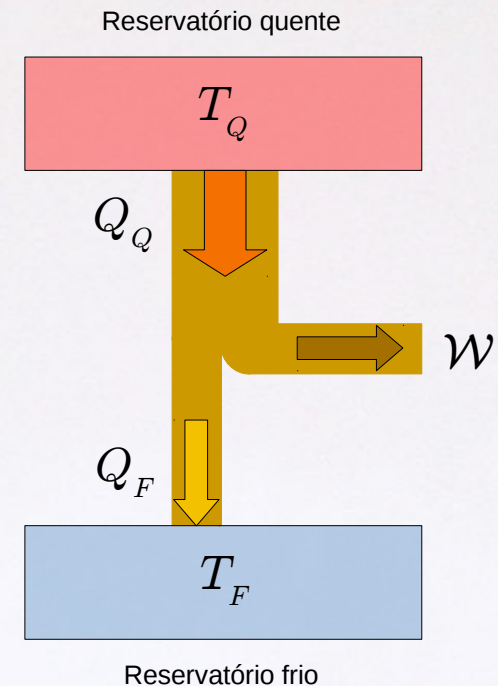
# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Eficiência ou **rendimento** de uma máquina:

$$\varepsilon = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$\varepsilon = \frac{|\mathcal{W}|}{|Q_Q|}$$



$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

$$|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

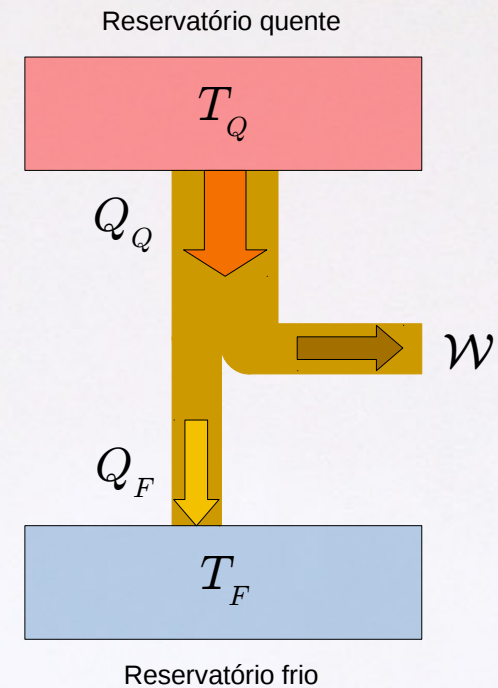
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Eficiência ou **rendimento** de uma máquina:

$$\varepsilon = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$\varepsilon = \frac{|\mathcal{W}|}{|Q_Q|}$$

$$\varepsilon = \frac{|\mathcal{W}|}{|Q_Q|} = \frac{|Q_Q| - |Q_F|}{|Q_Q|}$$



$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

$$|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

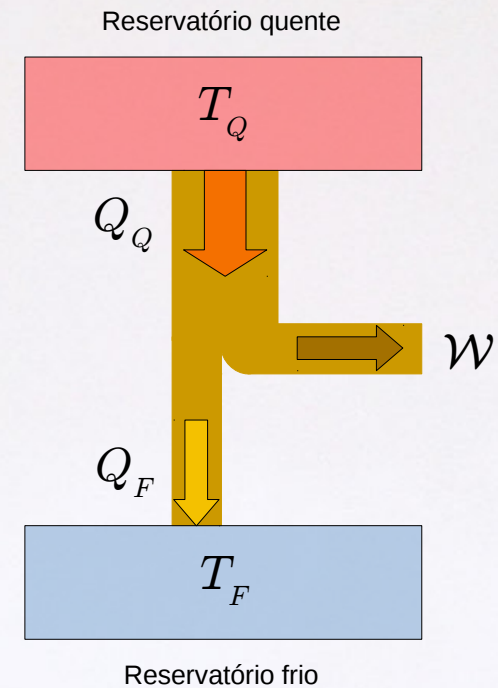
Eficiência ou **rendimento** de uma máquina:

$$\varepsilon = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$\varepsilon = \frac{|\mathcal{W}|}{|Q_Q|}$$

$$\varepsilon = \frac{|\mathcal{W}|}{|Q_Q|} = \frac{|Q_Q| - |Q_F|}{|Q_Q|}$$

$$\boxed{\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}}$$

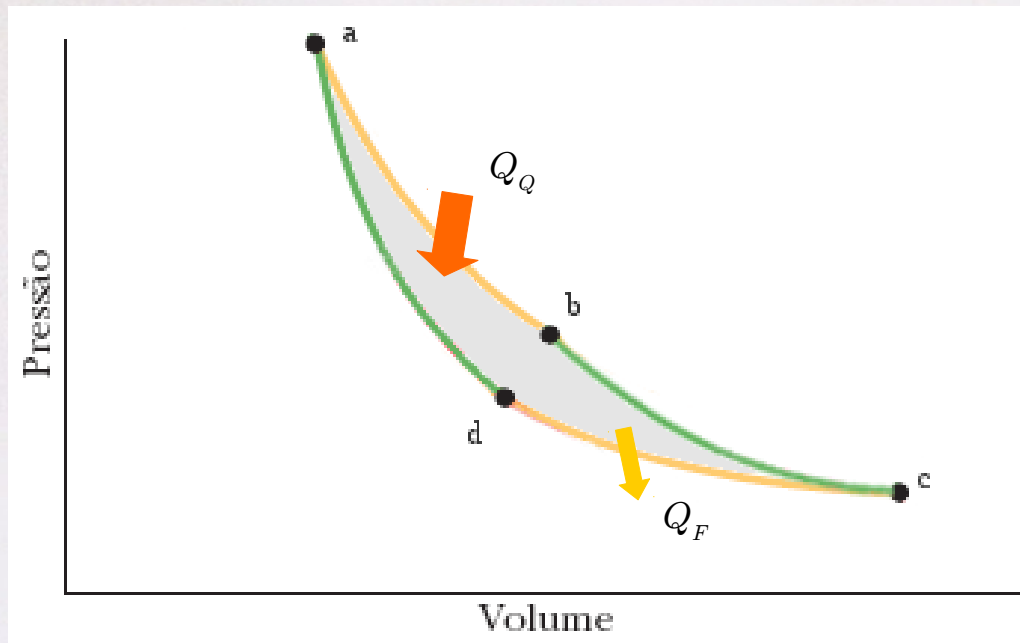


$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

$$\boxed{|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

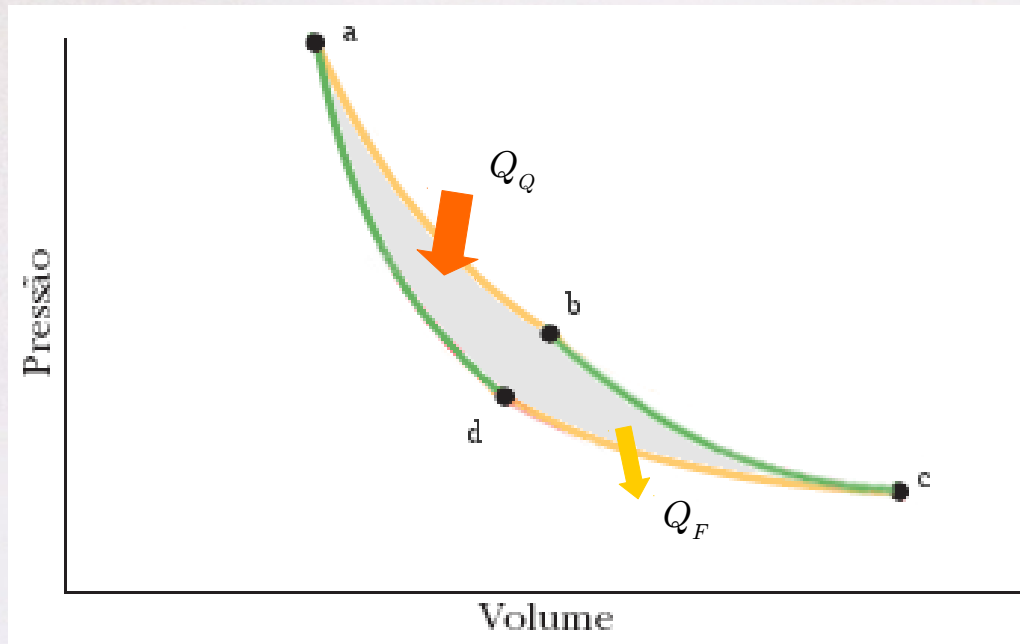
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot





# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

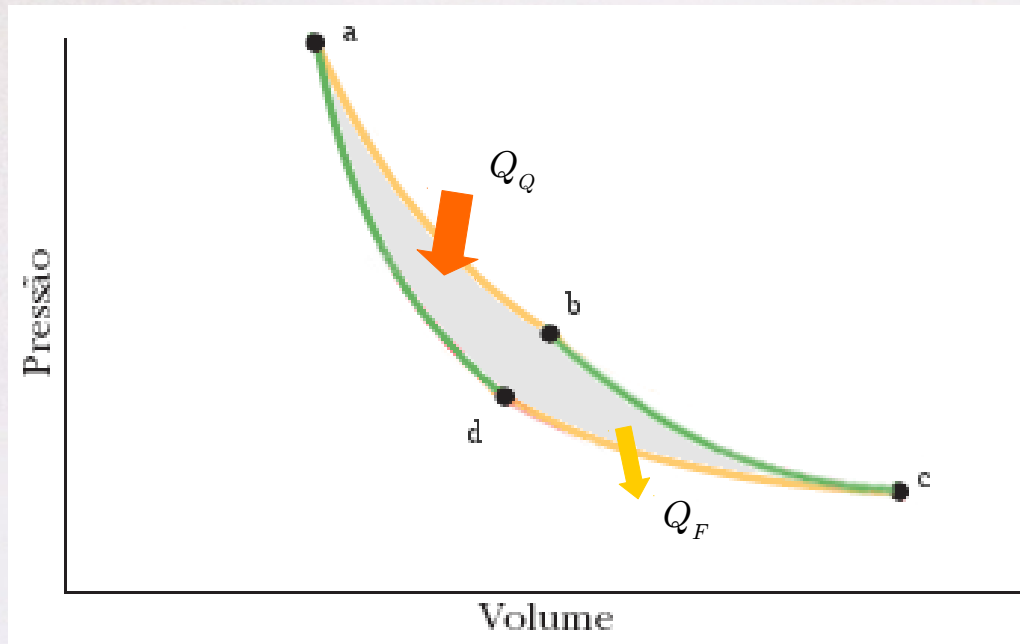


Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



► a → b (expansão isotérmica):

$$\Delta U = 0$$

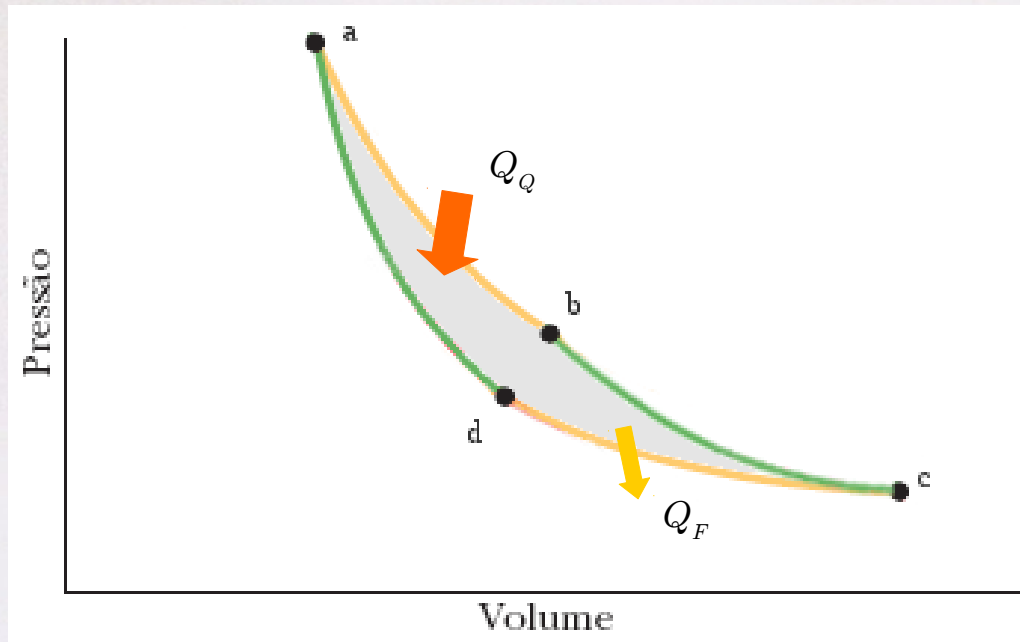
Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

► a → b (expansão isotérmica):

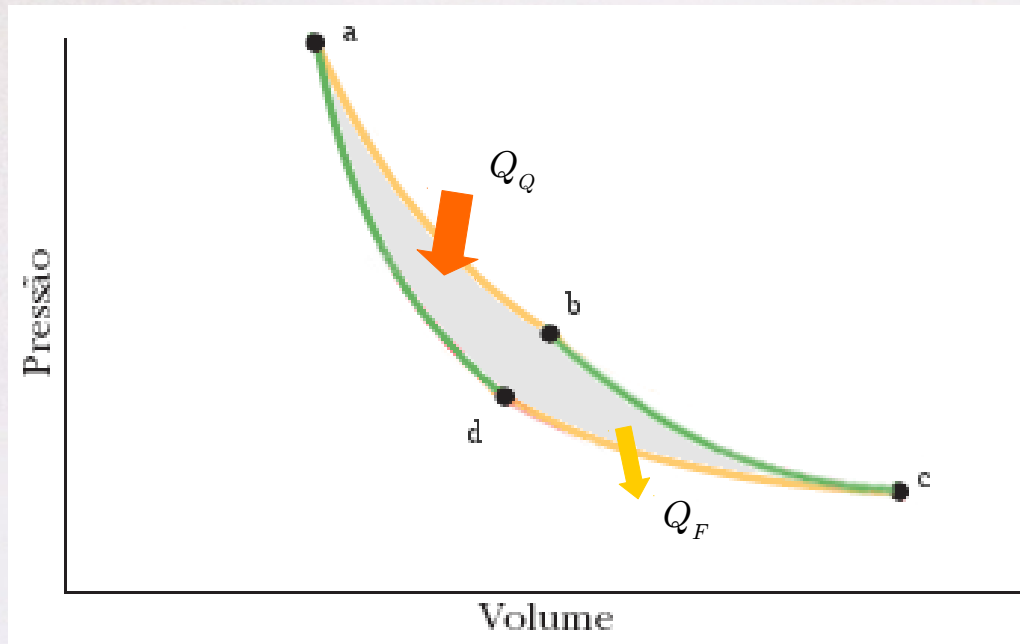
$$\Delta U = 0$$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q_Q = -W_{ab}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

► a → b (expansão isotérmica):  $\Delta U = 0$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q_Q = -W_{ab}$$

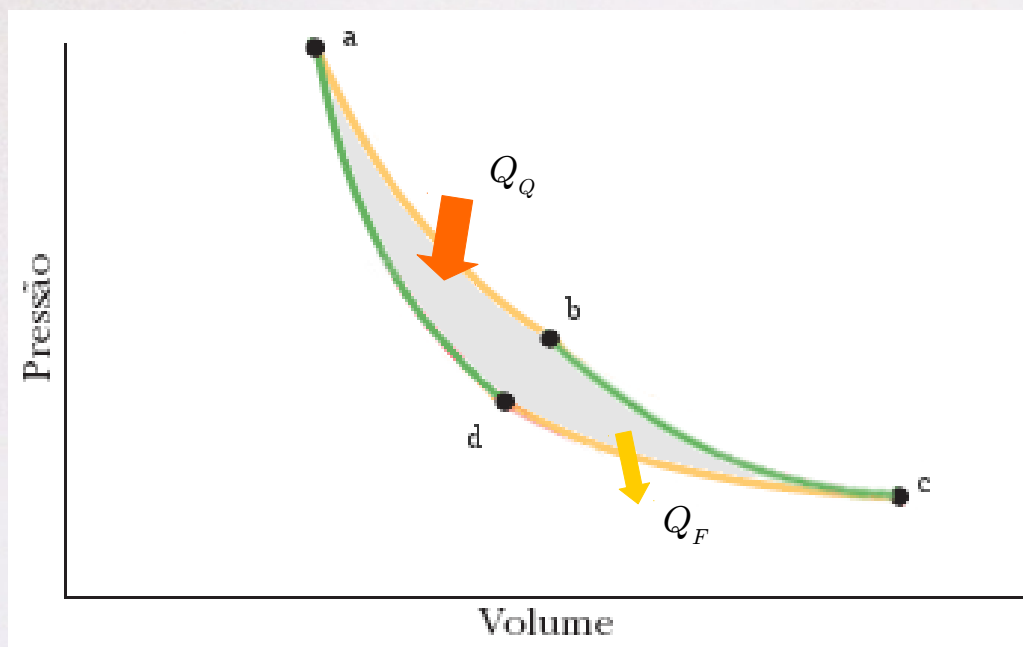
Vimos anteriormente que:

$$W_{ab} = -nRT_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

►  $a \rightarrow b$  (expansão isotérmica):  $\Delta U = 0$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q_Q = -W_{ab}$$

Vimos anteriormente que:

$$W_{ab} = -nRT_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)$$

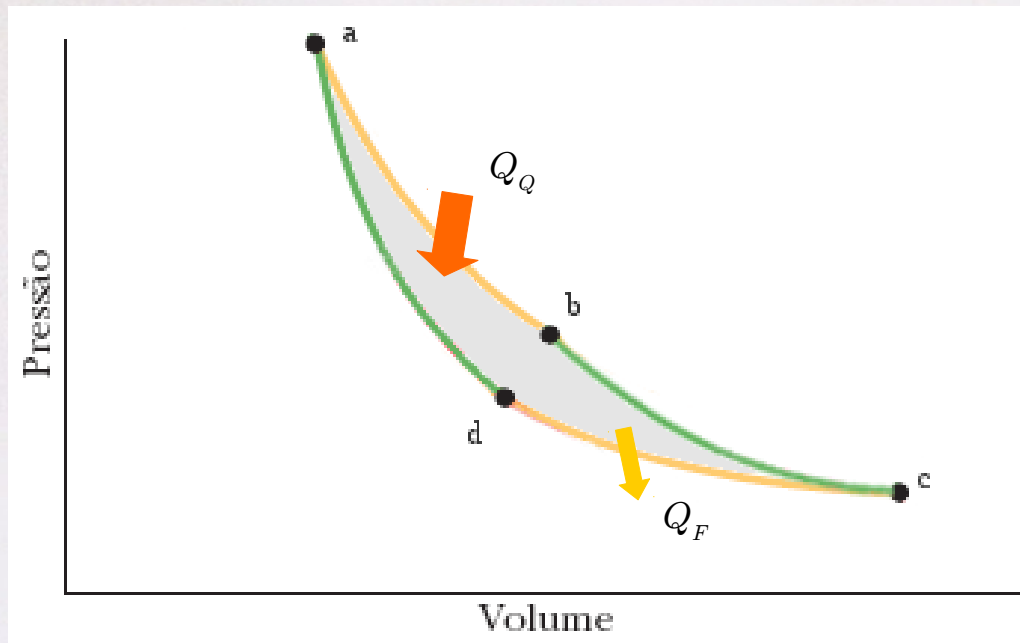
Portanto:

$$Q_Q = nRT_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)$$

$$V_b > V_a$$
$$Q_Q > 0$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

►  $c \rightarrow d$  (compressão isotérmica):  $\Delta U = 0$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q_F = -W_{cd}$$

Vimos anteriormente que:

$$W_{cd} = -nRT_F \ln \left( \frac{V_d}{V_c} \right)$$

Portanto:

$$Q_F = nRT_F \ln \left( \frac{V_d}{V_c} \right)$$

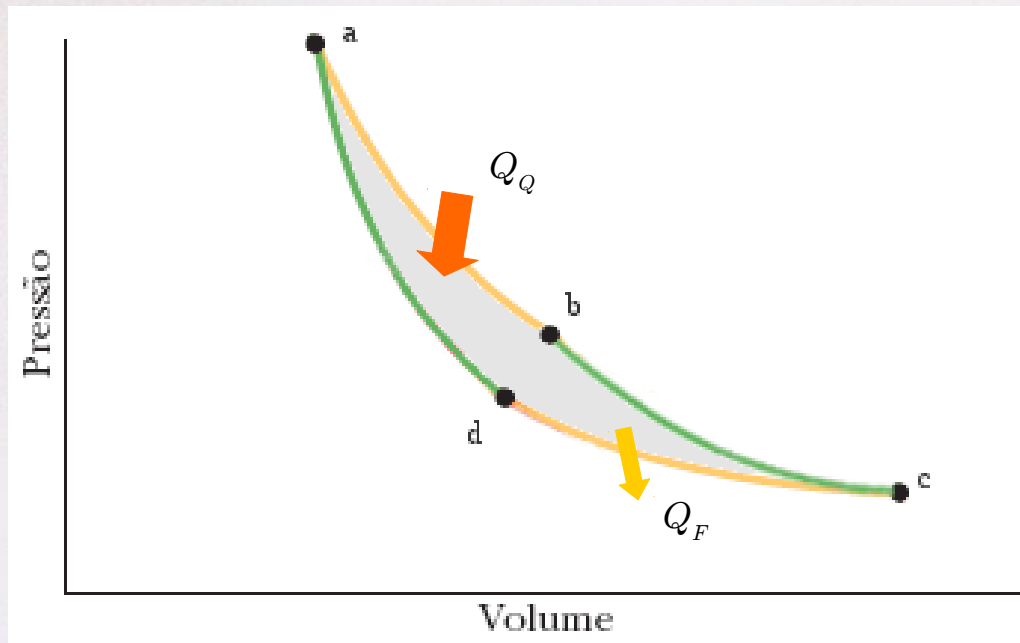
$$V_d < V_c$$

$$Q_F < 0$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot



Ciclo de Carnot

Fluido de trabalho: **gás ideal**

►  $c \rightarrow d$  (compressão isotérmica):  $\Delta U = 0$

$$\Delta U = Q + W$$

$$Q_F = -W_{cd}$$

Vimos anteriormente que:

$$W_{cd} = -nRT_F \ln \left( \frac{V_d}{V_c} \right)$$

Portanto:

$$Q_F = -nRT_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)$$

$$V_d < V_c$$
$$Q_F < 0$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento de uma máquina térmica é:

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento de uma máquina térmica é:

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

Assim:

$$\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{n R T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{n R T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)} = \frac{T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento de uma máquina térmica é:

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

Assim:

$$\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{n R T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{n R T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)} = \frac{T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)}$$

Então:

$$\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

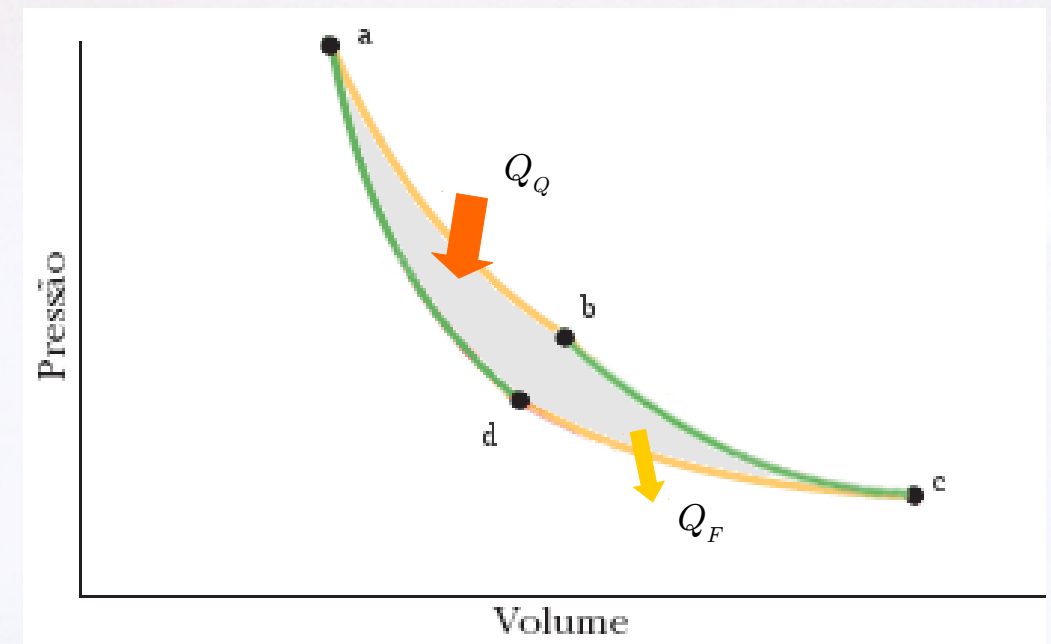
- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

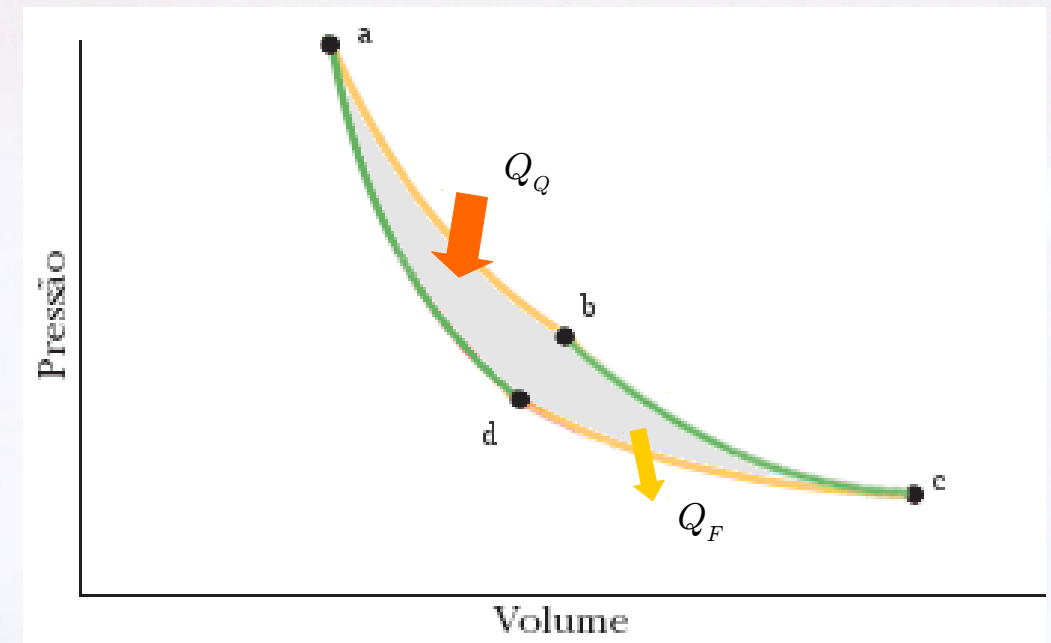
$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$

Então:

$$T_Q V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1} \quad T_Q V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

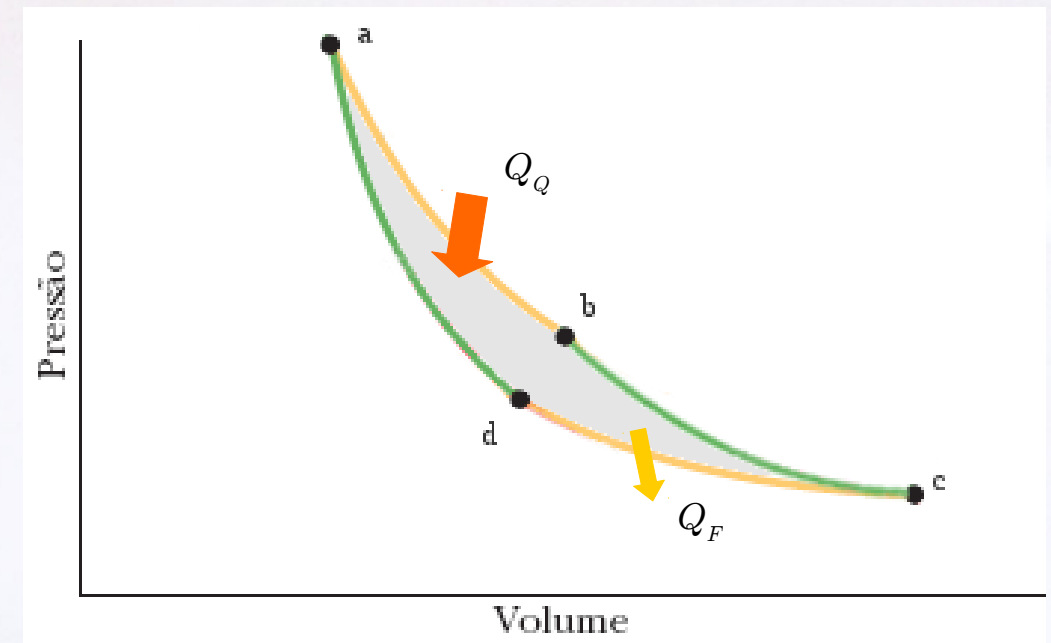
$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$

Então:

$$T_Q V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1}$$

$$T_Q V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_Q V_b^{\gamma-1}}{T_Q V_a^{\gamma-1}} = \frac{T_F V_c^{\gamma-1}}{T_F V_d^{\gamma-1}}$$





# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$

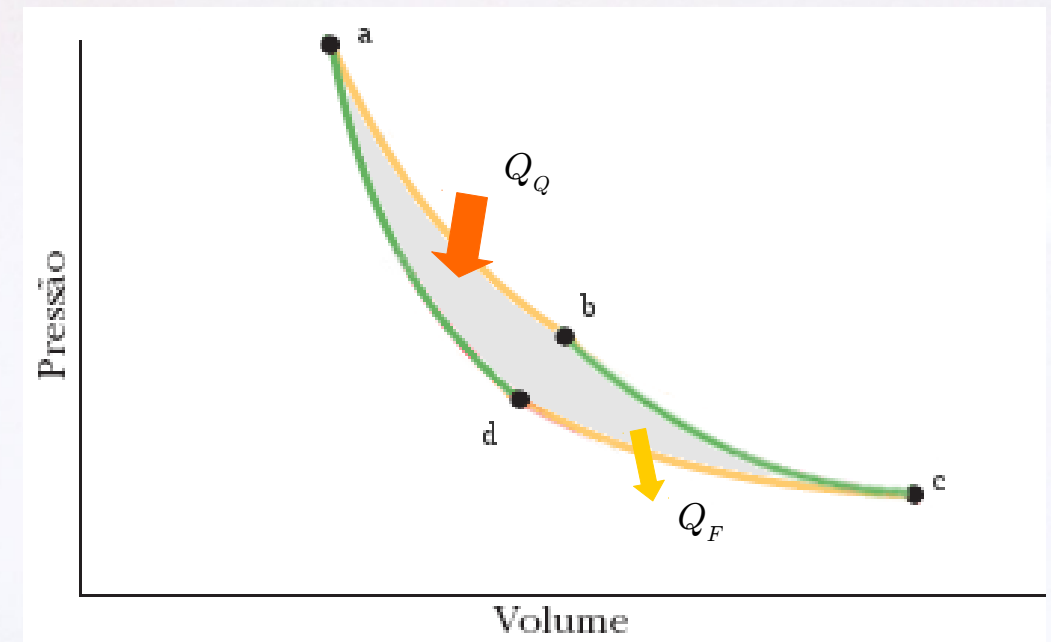
Então:

$$T_Q V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1}$$

$$T_Q V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_Q V_b^{\gamma-1}}{T_Q V_a^{\gamma-1}} = \frac{T_F V_c^{\gamma-1}}{T_F V_d^{\gamma-1}}$$

$$\rightarrow \frac{V_b^{\gamma-1}}{V_a^{\gamma-1}} = \frac{V_c^{\gamma-1}}{V_d^{\gamma-1}}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

Para um processo adiabático envolvendo o gás ideal, temos que:

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{cte}^*$$

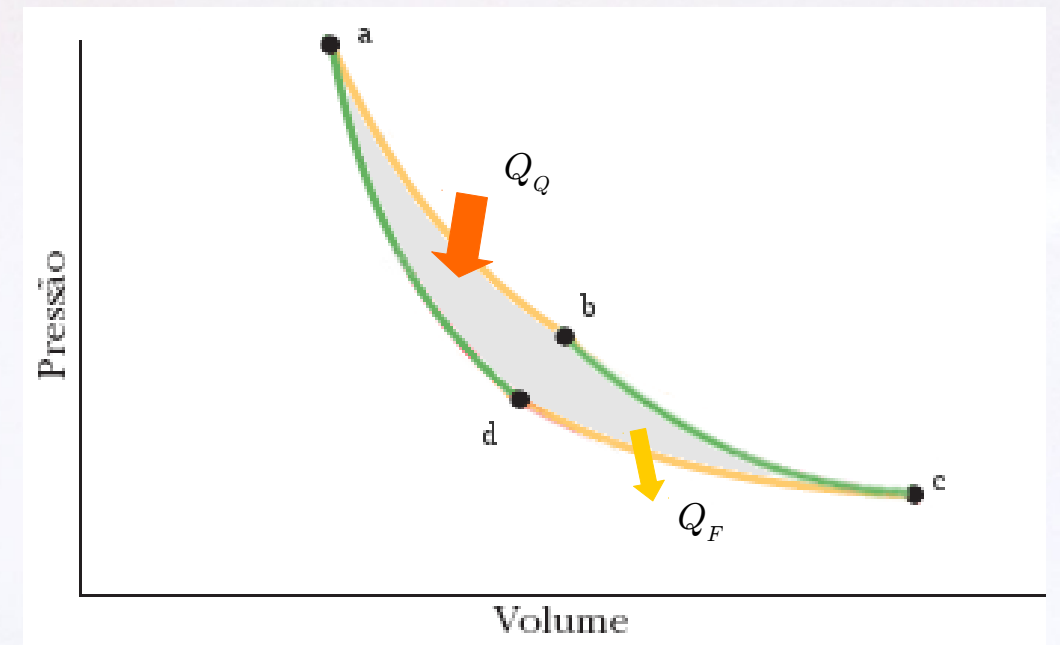
$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad \text{ar: 1,4}$$

Então:

$$T_Q V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1} \quad T_Q V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_Q V_b^{\gamma-1}}{T_Q V_a^{\gamma-1}} = \frac{T_F V_c^{\gamma-1}}{T_F V_d^{\gamma-1}} \quad \rightarrow \quad \frac{V_b^{\gamma-1}}{V_a^{\gamma-1}} = \frac{V_c^{\gamma-1}}{V_d^{\gamma-1}}$$

$$\boxed{\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}}$$



[Figura adaptada de: HALLIDAY, David. Fundamentos de Física, vol. 2. 10ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016]



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento de uma máquina térmica é:

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

Temos que:

$$\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)}$$

e:

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

Então:

$$\boxed{\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{T_F}{T_Q}}$$

(ciclo de Carnot)

$$\boxed{\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento de uma máquina térmica é:

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|}$$

Temos que:

$$\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{T_F \ln \left( \frac{V_c}{V_d} \right)}{T_Q \ln \left( \frac{V_b}{V_a} \right)}$$

e:

$$\frac{V_b}{V_a} = \frac{V_c}{V_d}$$

Então:

$$\boxed{\frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = \frac{T_F}{T_Q}}$$

(ciclo de Carnot)

$$\boxed{\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}}$$

< 100%



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento da máquina de Carnot é:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento da máquina de Carnot é:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

Se a máquina operar entre as temperaturas

$$T_F = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (273,15 K)} \quad \text{e} \quad T_Q = 100 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (373,15 K)}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento da máquina de Carnot é:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

Se a máquina operar entre as temperaturas

$$T_F = 0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (273,15 K)} \quad \text{e} \quad T_Q = 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (373,15 K)}$$

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{273,15 \text{ K}}{373,15 \text{ K}} = 0,268$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot (um tipo particular de máquina térmica ideal, proc. reversível) → Ciclo de Carnot

O rendimento da máquina de Carnot é:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

Se a máquina operar entre as temperaturas

$$T_F = 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (273,15 K)} \quad \text{e} \quad T_Q = 100 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (373,15 K)}$$

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{273,15 \text{ K}}{373,15 \text{ K}} = 0,268$$

$$\varepsilon_C = 26,8\%$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Ciclo de Carnot:  
(ciclo Stirling)

$$\varepsilon_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$

- Ciclo Otto:

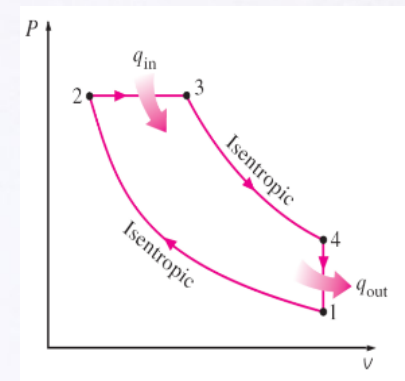
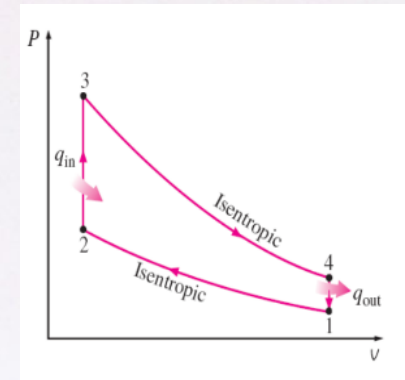
$$\varepsilon_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r_c^{(\gamma-1)}}$$

- Ciclo Diesel:

$$\varepsilon_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r_c^{(\gamma-1)}} \left[ \frac{\beta^\gamma - 1}{\gamma(\beta - 1)} \right]$$

- Ciclo Brayton:

$$\varepsilon_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_c^{(\gamma-1)/\gamma}}$$



$$r_c = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\beta = \frac{V_3}{V_2}$$

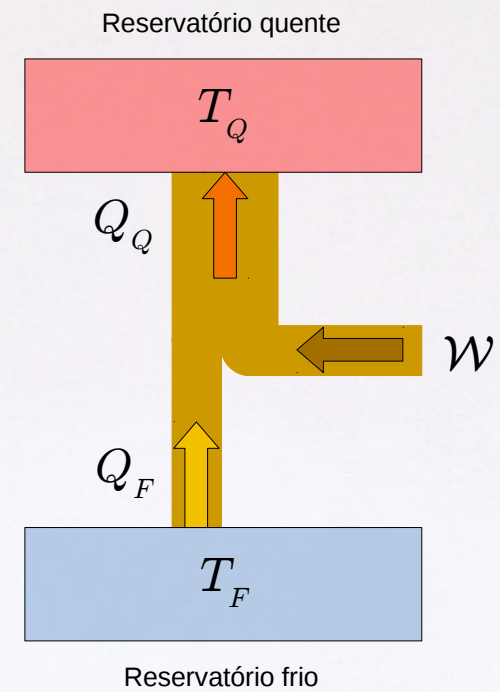
# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)



# 2ª Lei da Termodinâmica

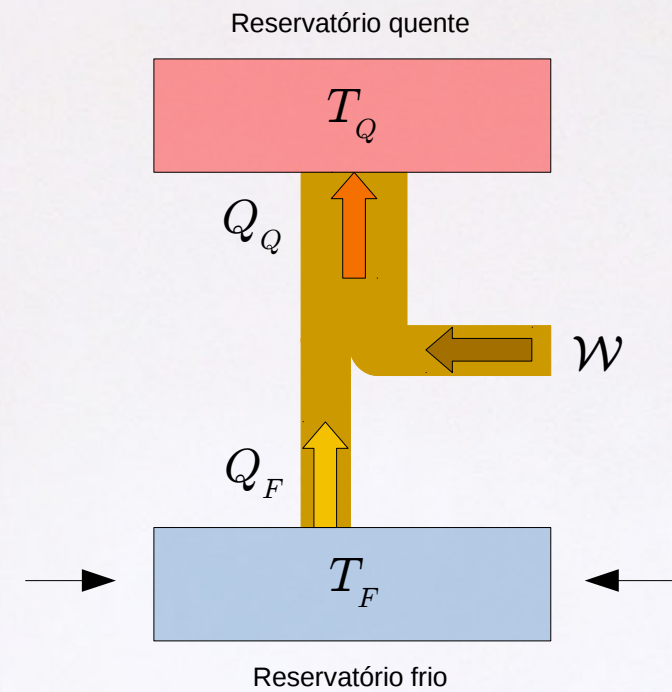
→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]

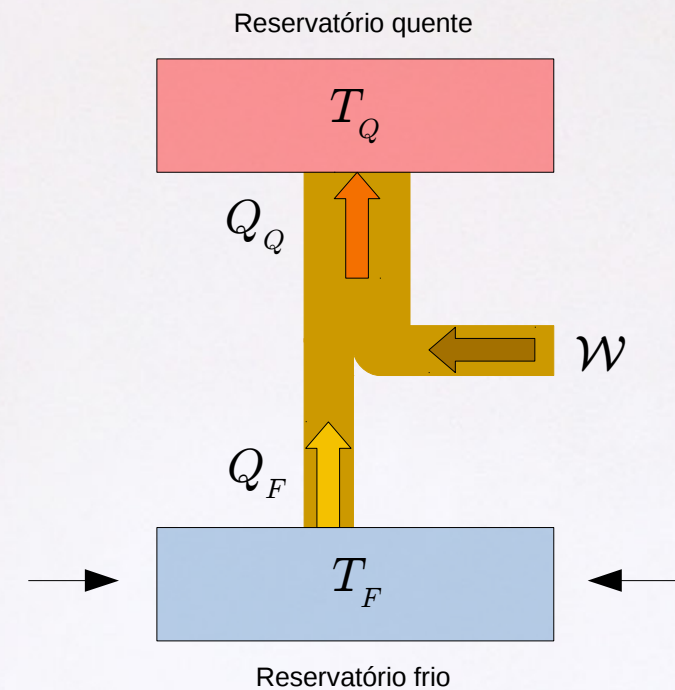




# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]

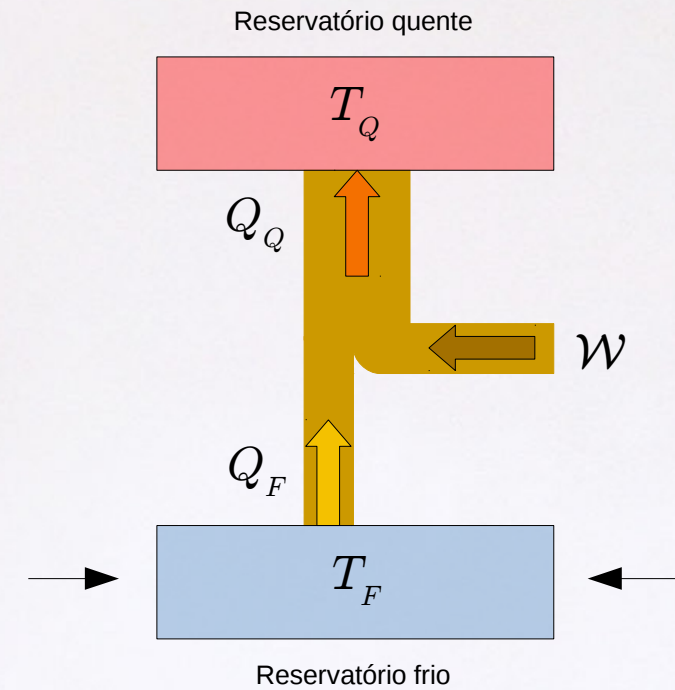


$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |\mathcal{W}| + |Q_F|$$

$$|\mathcal{W}| = |Q_Q| - |Q_F|$$



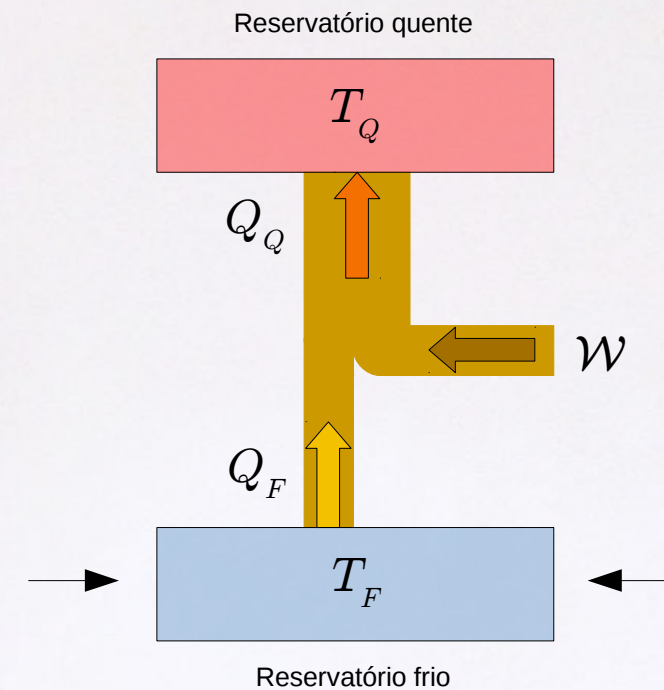
# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** do refrigerador é dado por:

$$COP = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

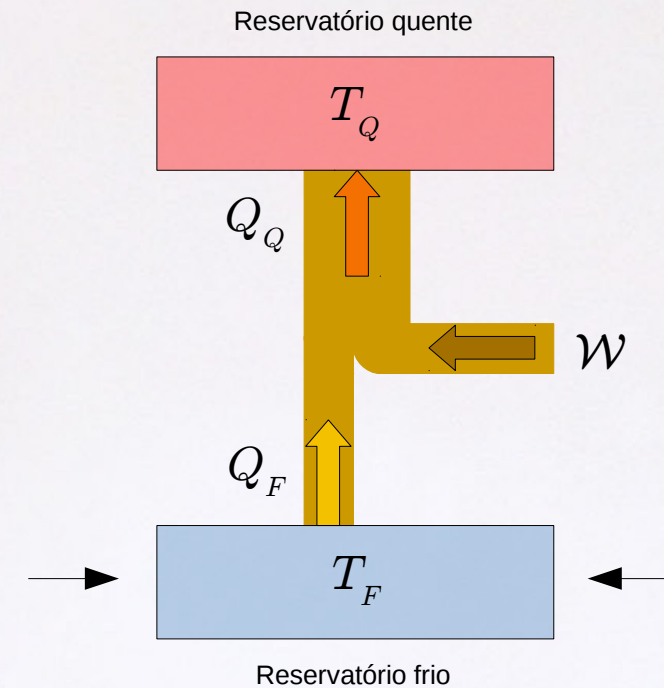
→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** do refrigerador é dado por:

$$COP = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$COP = \frac{|Q_F|}{|W|}$$

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



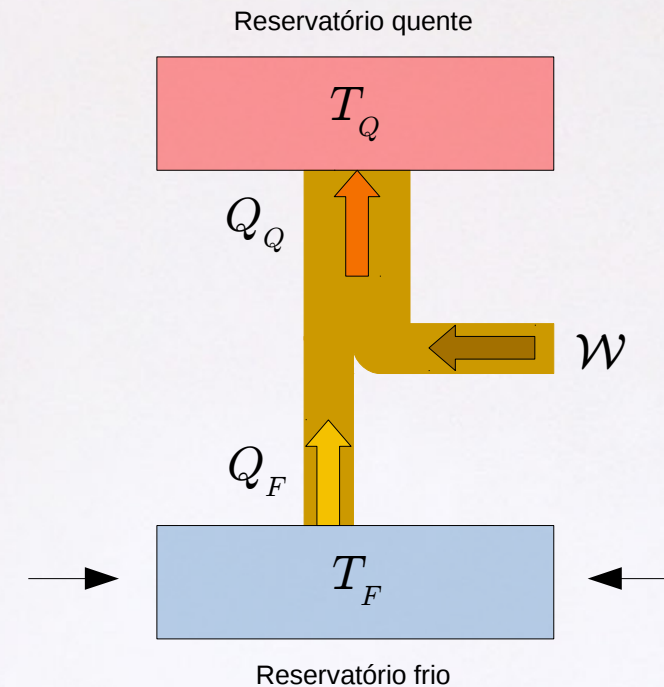
# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** do refrigerador é dado por:

$$COP = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$
$$COP = \frac{|Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q| - |Q_F|}$$

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

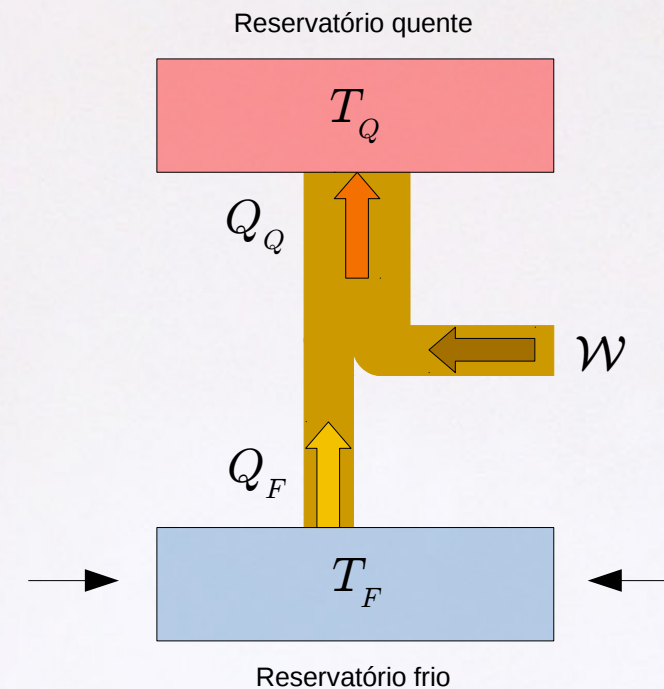
# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** do refrigerador é dado por:

$$COP = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$
$$COP = \frac{|Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q| - |Q_F|} = \frac{1}{\frac{|Q_Q|}{|Q_F|} - 1}$$

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Refrigerador ideal (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** do refrigerador é dado por:

$$COP = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

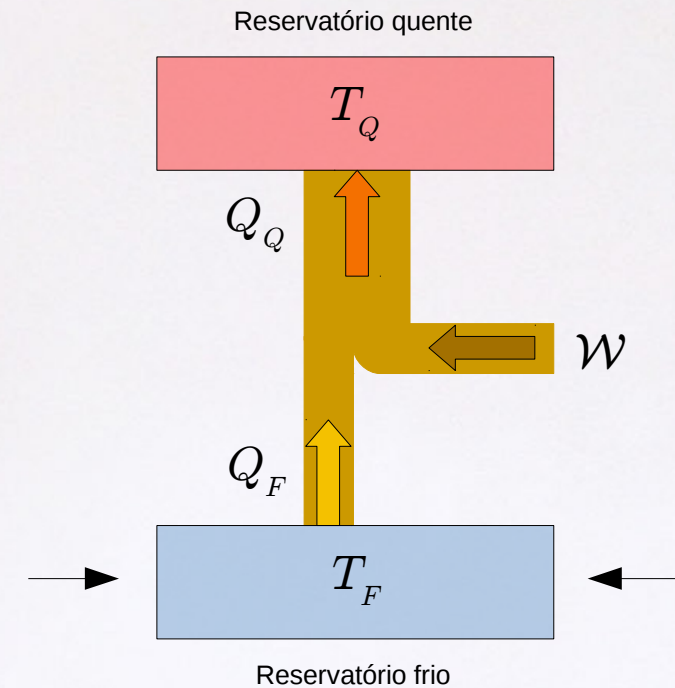
$$COP = \frac{|Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_F|}{|Q_Q| - |Q_F|} = \frac{1}{\frac{|Q_Q|}{|Q_F|} - 1}$$

Refrigerador de Carnot:

$$COP_C = \frac{T_F}{T_Q - T_F} = \frac{1}{\frac{T_Q}{T_F} - 1}$$

Coefficient Of Performance

[Manter resfriada a região em  $T_F$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Máquina de Carnot e Refrigerador de Carnot:

O rendimento da máquina é:  $\varepsilon_C = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$  ; Para o refrigerador temos:  $COP_C = \frac{T_F}{T_Q - T_F}$

Se a máquina (e o refrigerador) operar entre as temperaturas

$$T_F = 0 \text{ }^\circ\text{C (273,15 K)} \quad \text{e} \quad T_Q = 100 \text{ }^\circ\text{C (373,15 K)}$$

- Rendimento:  $\varepsilon_C = 1 - \frac{273,15 \text{ K}}{373,15 \text{ K}} = 0,268$   $\varepsilon_C = \underline{26,8\%}$

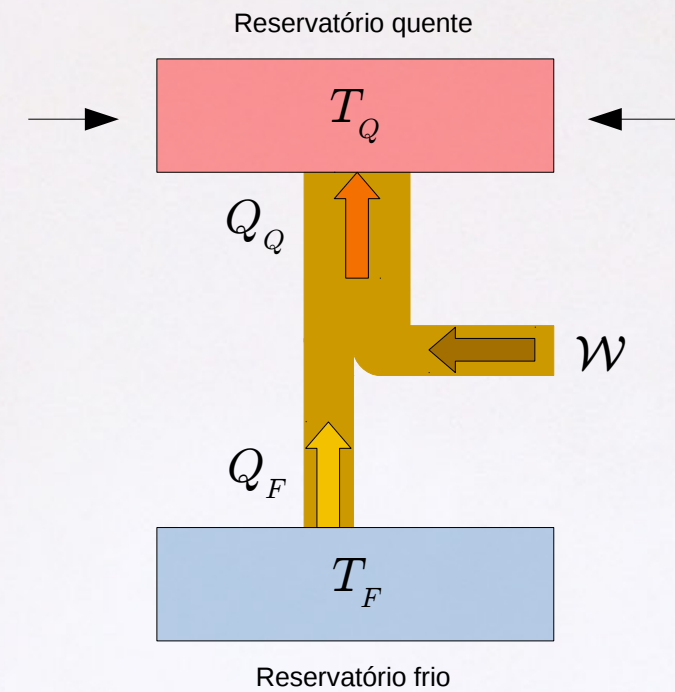
- Coeficiente de Desempenho:  $COP_C = \frac{1}{\frac{T_Q}{T_F} - 1} = \frac{1}{\frac{373,15}{273,15} - 1}$   $COP_C = \underline{2,73}$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

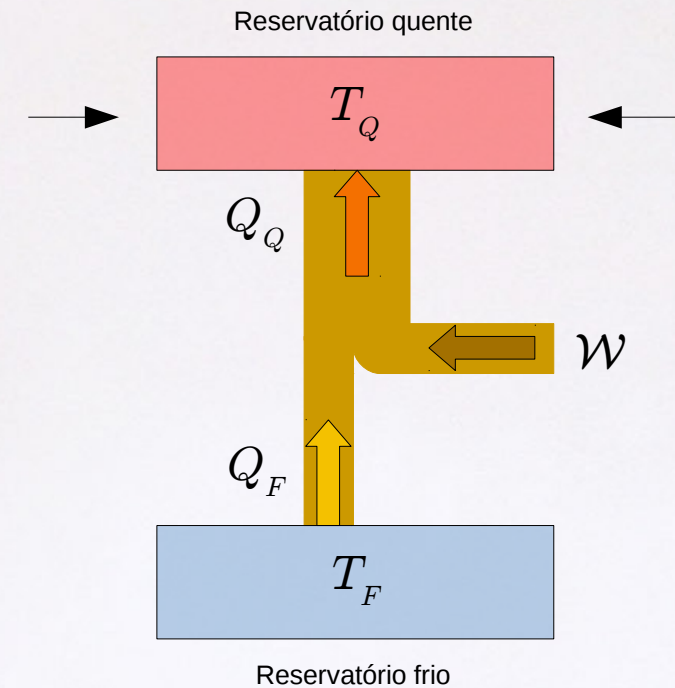
# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** da bomba térmica é dado por:

$$COP_{BT} = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

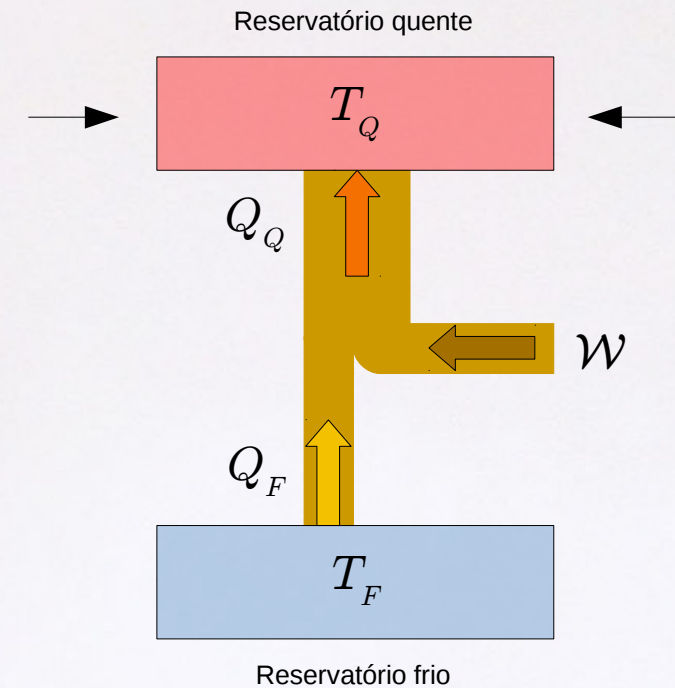
→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** da bomba térmica é dado por:

$$COP_{BT} = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$COP_{BT} = \frac{|Q_Q|}{|W|}$$

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

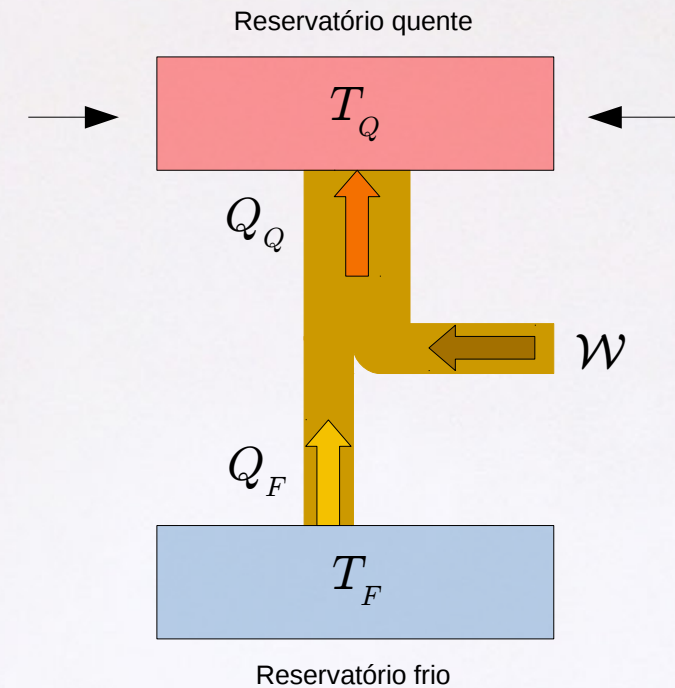
→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** da bomba térmica é dado por:

$$COP_{BT} = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$COP_{BT} = \frac{|Q_Q|}{|W|} = \frac{|W| + |Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_Q|}{|Q_Q| - |Q_F|}$$

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

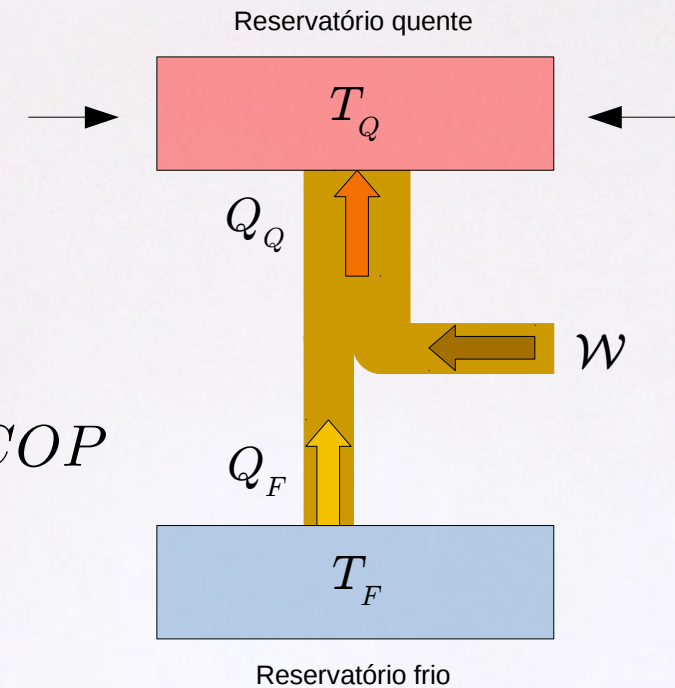
→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** da bomba térmica é dado por:

$$COP_{BT} = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$COP_{BT} = \frac{|Q_Q|}{|W|} = \frac{|W| + |Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_Q|}{|Q_Q| - |Q_F|} = 1 + COP$$

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Bomba térmica (Ciclo de Carnot inverso)

O **coeficiente de desempenho** da bomba térmica é dado por:

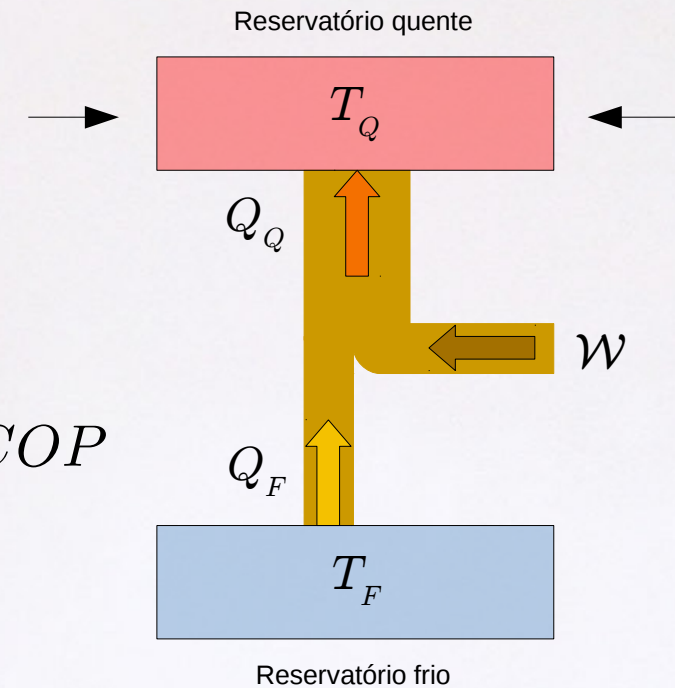
$$COP_{BT} = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}}$$

$$COP_{BT} = \frac{|Q_Q|}{|W|} = \frac{|W| + |Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_Q|}{|Q_Q| - |Q_F|} = 1 + COP$$

Bomba térmica de Carnot:

$$COP_{BTC} = \frac{T_Q}{T_Q - T_F} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_Q}}$$

[Manter aquecida a região em  $T_Q$ ]



$$|Q_Q| = |W| + |Q_F|$$

$$|W| = |Q_Q| - |Q_F|$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

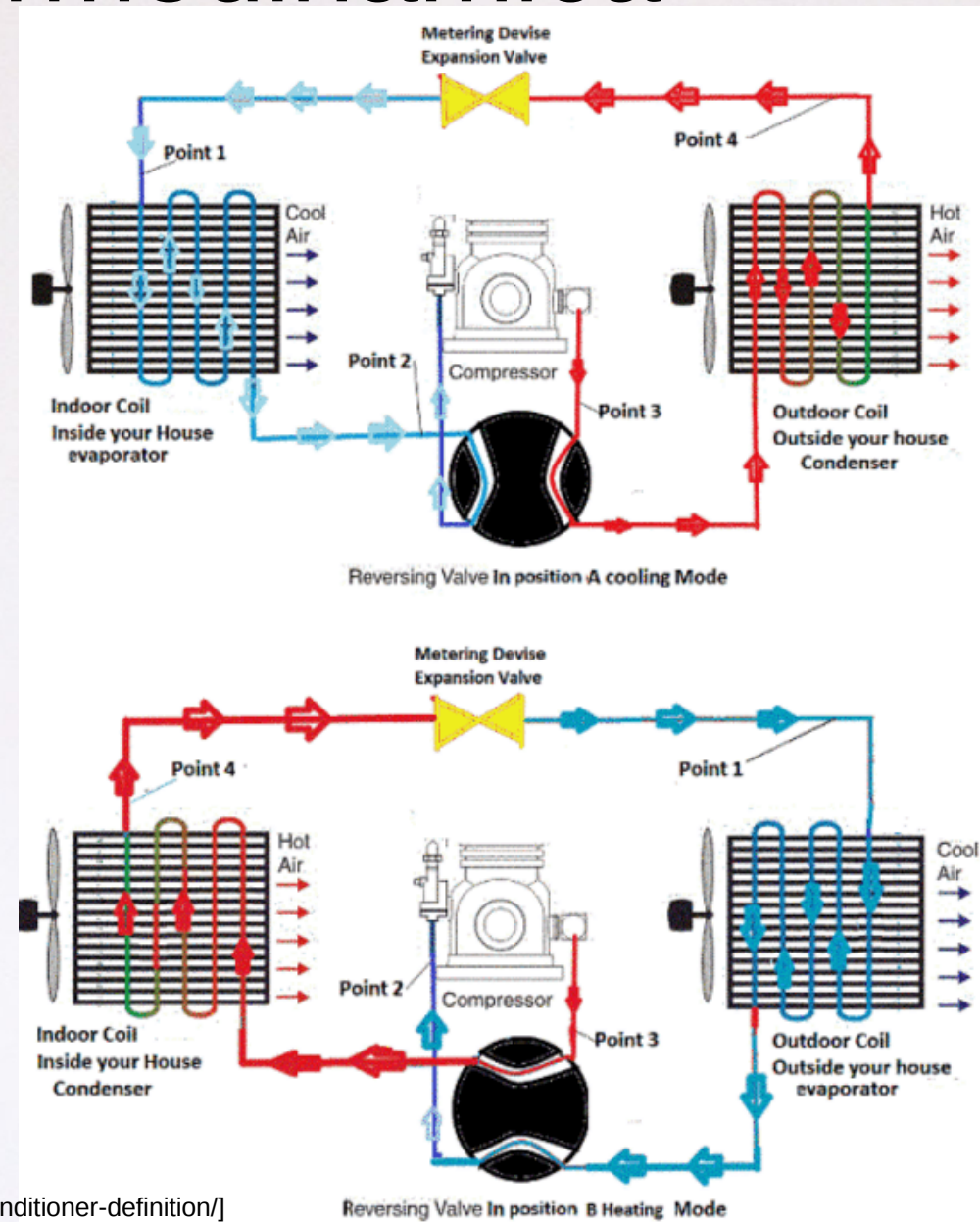
→ Refrigerador e Bomba térmica

Refrigerador →

(Ar condicionado – quente/frio)

Ciclo reverso

Bomba térmica →



[Figura: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-coefficient-of-performance-cop-refrigerator-air-conditioner-definition/>]

# 2ª Lei da Termodinâmica



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Alguns processos ocorrem em um sentido e não no sentido inverso.
- **Fluxo de energia térmica ocorre do corpo com  $T$  mais alta para o corpo com  $T$  mais baixa.**
- De acordo com a 1ª lei da Termodinâmica a energia é sempre conservada ( $\Delta U = Q + W$ ).
- Contudo:
  - energia térmica fluir do corpo com  $T$  baixa para o corpo com  $T$  alta não viola a 1ª lei.
  - **nem toda a energia pode ser utilizada para realizar trabalho útil.**
- Processos reversíveis e irreversíveis ←

# 2ª Lei da Termodinâmica

## - Enunciado de Kelvin (1851):

Nenhum sistema pode absorver energia térmica ( $Q > 0$ ) de um único reservatório e convertê-la inteiramente em energia mecânica ( $W < 0$ ) sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca.

## - Enunciado de Clausius (1854):

Um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar energia térmica (calor) de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de energia térmica (calor) para um reservatório quente é impossível.



# 2ª Lei da Termodinâmica

## - Enunciado de Kelvin (1851):

Nenhum sistema pode absorver energia térmica ( $Q > 0$ ) de um único reservatório e convertê-la inteiramente em energia mecânica ( $W < 0$ ) sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca.

## - Enunciado de Clausius (1854):

Um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar energia térmica (calor) de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de energia térmica (calor) para um reservatório quente é impossível.

## - Enunciado da 2ª lei para máquinas térmicas:

É impossível para uma máquina térmica, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar energia térmica (calor) de um único reservatório e realizar uma quantidade equivalente de trabalho.

## - Enunciado da 2ª lei para refrigeradores:

É impossível para um refrigerador, operando em um ciclo, produzir como único efeito o de retirar energia térmica (calor) de um corpo frio e liberar a mesma quantidade de energia térmica (calor) para um corpo quente.

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Formulação inicial qualitativa em termos de impossibilidade.



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Formulação inicial qualitativa em termos de impossibilidade.
- Posterior formulação quantitativa da 2ª lei: **Entropia (S)**

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Formulação inicial qualitativa em termos de impossibilidade.
- Posterior formulação quantitativa da 2ª lei: **Entropia (S)**
- Termodinâmica:  $\Delta S$
- Mec. Estatística: S



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Formulação inicial qualitativa em termos de impossibilidade.
- Posterior formulação quantitativa da 2ª lei: **Entropia (S)**
- Termodinâmica:  $\Delta S$
- Mec. Estatística: S

Entropia : contagem de microestados acessíveis (probabilidades)

# 3ª Lei da Termodinâmica

Formulações:

→ Quando  $T \rightarrow 0$  ;  $S \rightarrow 0$

→ É impossível atingir o zero absoluto (temperatura) através de um número finito de processos termodinâmicos.



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$P V = n R T$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$dQ = C_V dT + P dV$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$P V = n R T$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$dQ = C_V dT + P dV$$

$$dQ = n c_V dT + \frac{n R T}{V} dV$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$P V = n R T$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$dQ = C_V dT + P dV$$

$$dQ = n c_V dT + \frac{n R T}{V} dV$$

$$\frac{dQ}{T} = n c_V \frac{dT}{T} + n R \frac{dV}{V}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$P V = n R T$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$dQ = C_V dT + P dV$$

$$dQ = n c_V dT + \frac{n R T}{V} dV$$

$$\frac{dQ}{T} = n c_V \frac{dT}{T} + n R \frac{dV}{V}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$P V = n R T$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\Delta S = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\boxed{\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$\boxed{dS = \frac{dQ}{T}}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\Delta S = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

ou:

$$S(V, T) = n c_V \ln(T) + n R \ln(V) + \text{cte}$$

$$\boxed{\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\Delta S = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

ou:

$$S(V, T) = n c_V \ln(T) + n R \ln(V) + \text{cte}$$

Não depende do caminho  
→ S é uma função de estado

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$

# 2ª Lei da Termodinâmica

→ Gás ideal e Entropia

$$PV = nRT$$

$$U = U(T)$$

- processo reversível (infinitesimal):

$$dU = dQ + dW$$

$$dQ = dU - dW$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \int_i^f \frac{dT}{T} + n R \int_i^f \frac{dV}{V}$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

$$\Delta S = n c_V \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) + n R \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

ou:

$$s(V, T) = c_V \ln(T) + R \ln(V) + \text{cte}$$

Não depende do caminho  
→ s é uma função de estado

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Formulação da 2ª lei para processos reversíveis e irreversíveis:

**Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis. A entropia nunca diminui.**

# 2ª Lei da Termodinâmica

- Formulação da 2ª lei para processos reversíveis e irreversíveis:

**Se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis. A entropia nunca diminui.**

- sistema + vizinhança = universo

**Em um processo reversível, a variação da entropia do universo é zero.**

**Em um processo irreversível, a entropia do universo aumenta.**

**Para qualquer processo, a entropia do universo nunca diminui.**

Ou seja:

$$\Delta S \geq 0$$



# 2ª Lei da Termodinâmica

- Variações da entropia em diversos processos

FAZER

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ 1ª tentativa de conectar as grandezas termodinâmicas (que são macroscópicas) com médias de grandezas microscópicas.

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ 1ª tentativa de conectar as grandezas termodinâmicas (que são macroscópicas) com médias de grandezas microscópicas.

O estudo de sistemas termodinâmicos levou alguns cientistas a considerar que os gases poderiam ser compostos por um grande número de partículas, abrindo caminho para a Mecânica Estatística.



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ 1ª tentativa de conectar as grandezas termodinâmicas (que são macroscópicas) com médias de grandezas microscópicas.

O estudo de sistemas termodinâmicos levou alguns cientistas a considerar que os gases poderiam ser compostos por um grande número de partículas, abrindo caminho para a Mecânica Estatística.

► Termodinâmica : descrição macroscópica

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ 1ª tentativa de conectar as grandezas termodinâmicas (que são macroscópicas) com médias de grandezas microscópicas.

O estudo de sistemas termodinâmicos levou alguns cientistas a considerar que os gases poderiam ser compostos por um grande número de partículas, abrindo caminho para a Mecânica Estatística.

▶ Termodinâmica : descrição macroscópica

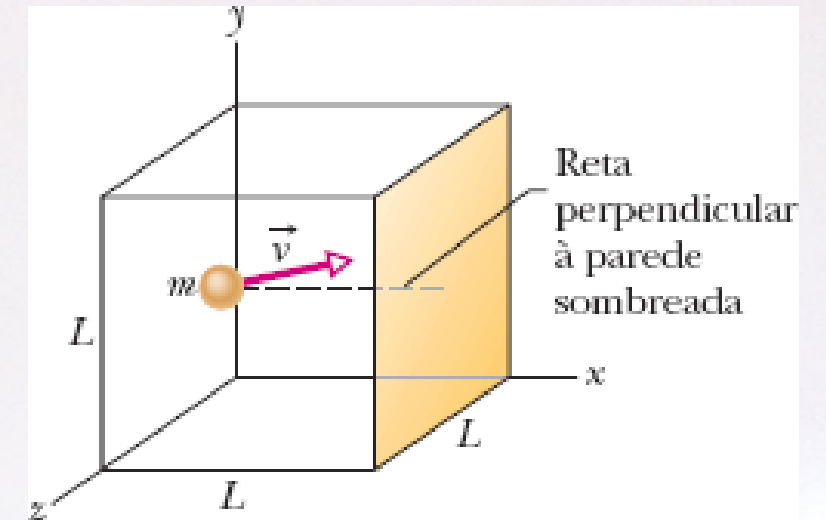
▶ Mec. Estatística : descrição microscópica



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente



$$P = \frac{F}{A}$$

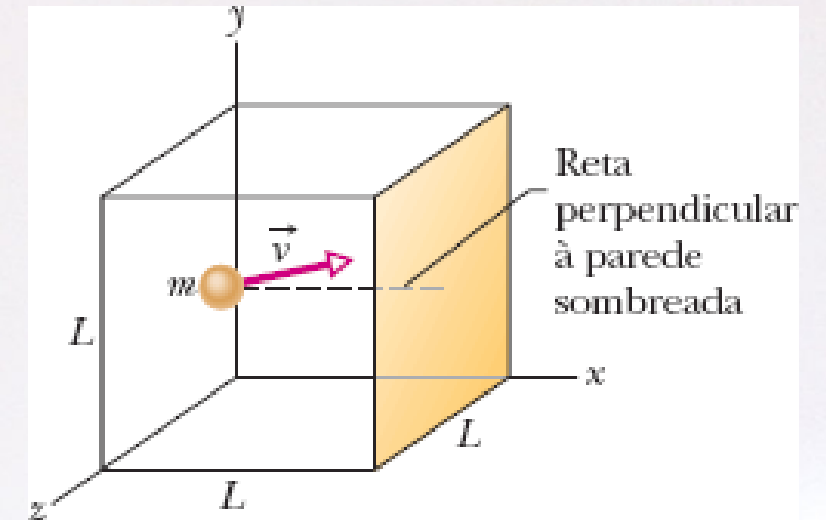
$$F = \frac{dp}{dt}$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

(Alguns autores chamam as partículas de um gás por “moléculas”)



$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = \frac{dp}{dt}$$



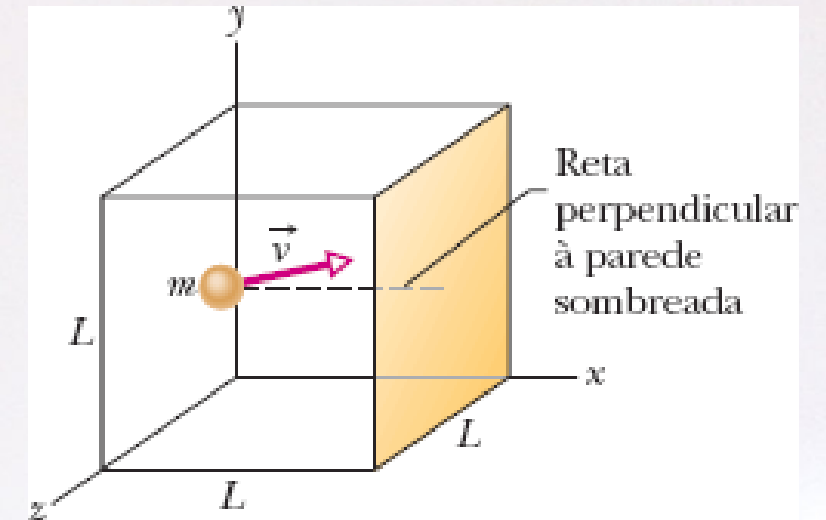
# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

(Alguns autores chamam as partículas de um gás por “moléculas”)

Considerando um **gás ideal** com  $N$  partículas num volume  $V$  :



$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = \frac{dp}{dt}$$

# Teoria Cinética dos Gases

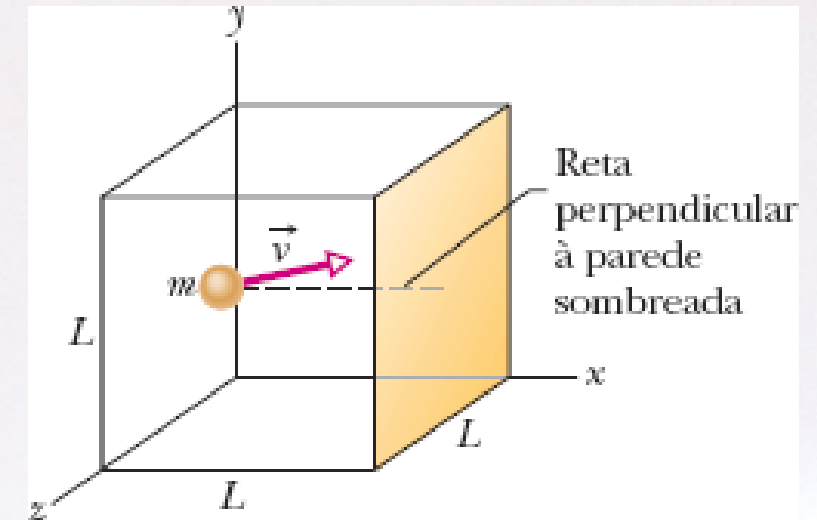
(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

(Alguns autores chamam as partículas de um gás por “moléculas”)

Considerando um **gás ideal** com  $N$  partículas num volume  $V$  :

- gás monoatômico;
- sem colisões entre as partículas;
- colisões elásticas com as paredes do recipiente;
- os efeitos são análogos em todas as direções;
- vamos tratar o caso em 1D e generalizar para 3D;



$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = \frac{dp}{dt}$$



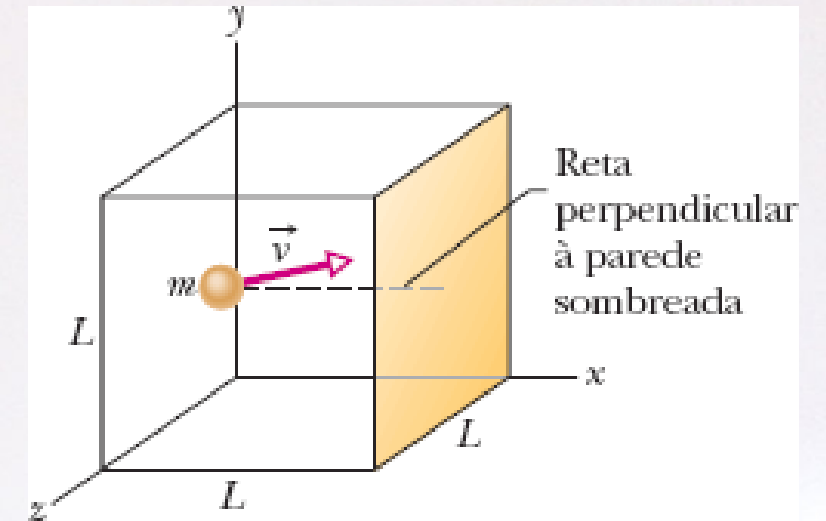
# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Considerando apenas o movimento da direção  $x$  , o momentum linear de uma partícula com massa  $m$  é dado por:

$$p_x = m v_x$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

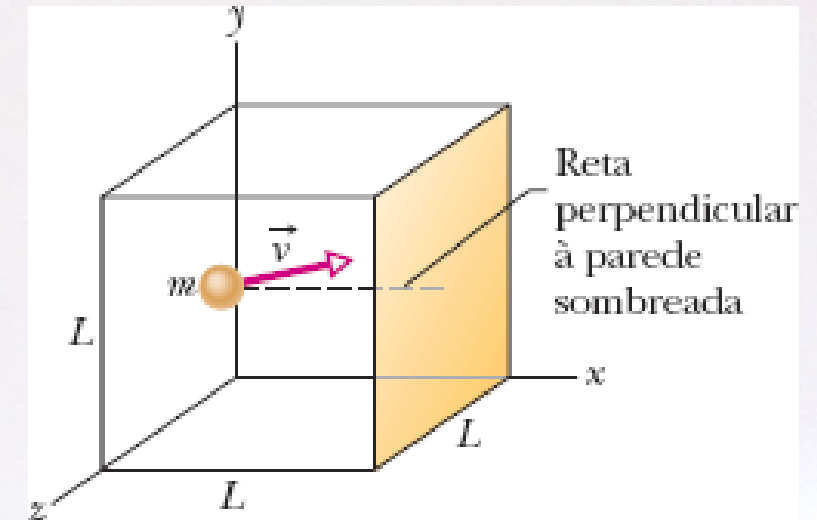
→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Considerando apenas o movimento da direção  $x$  , o momentum linear de uma partícula com massa  $m$  é dado por:

$$p_x = m v_x$$

Se a partícula se chocar com a parede e apenas mudar sua direção, vai sofrer uma variação na quantidade de movimento:

$$\Delta p = p - p_0$$





# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Considerando apenas o movimento da direção  $x$  , o momentum linear de uma partícula com massa  $m$  é dado por:

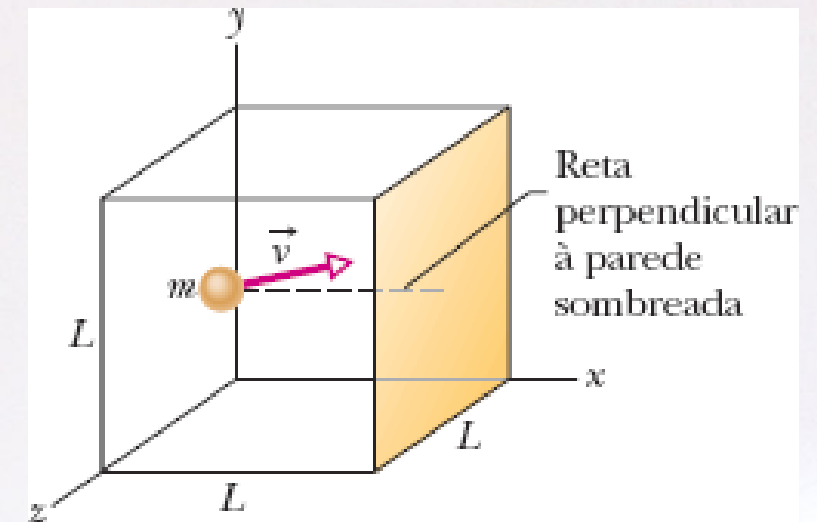
$$p_x = m v_x$$

Se a partícula se chocar com a parede e apenas mudar sua direção, vai sofrer uma variação na quantidade de movimento:

$$\Delta p = p - p_0$$

Partícula  $i$  :

$$\Delta p_i = (-m v_x) - (m v_x) = -2 m v_x$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Considerando apenas o movimento da direção  $x$ , o momentum linear de uma partícula com massa  $m$  é dado por:

$$p_x = m v_x$$

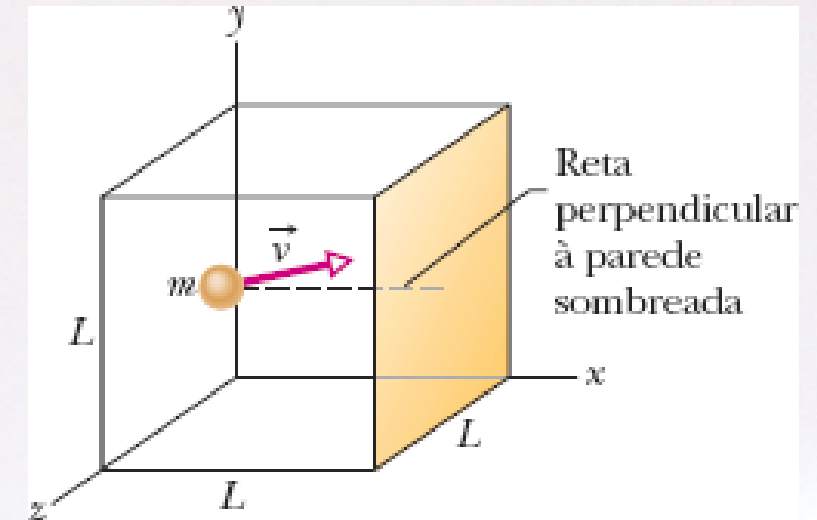
Se a partícula se chocar com a parede e apenas mudar sua direção, vai sofrer uma variação na quantidade de movimento:

$$\Delta p = p - p_0$$

Partícula  $i$  :

$$\Delta p_i = (-m v_x) - (m v_x) = -2 m v_x$$

Assim, o momentum transferido para a parede do recipiente é  $2 m v_x$





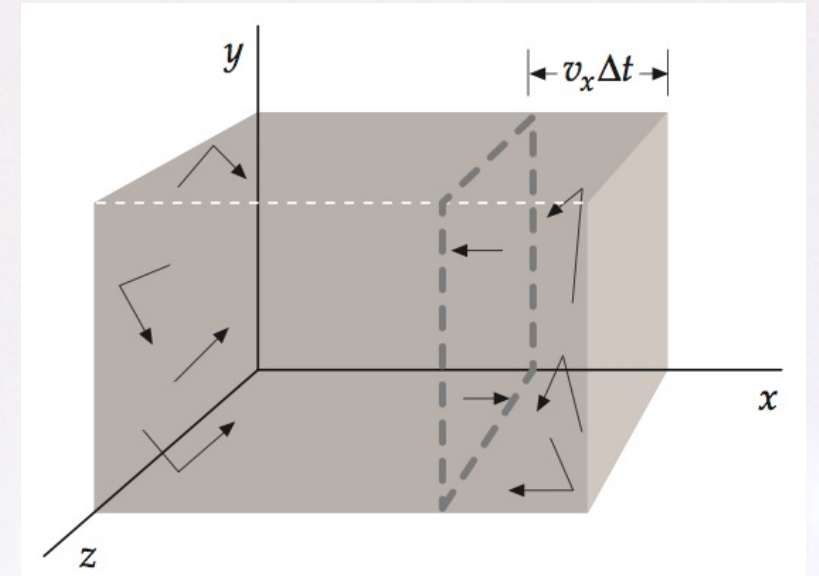
# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A densidade de partículas no recipiente é dada por:

$$\rho_p = \frac{N}{V}$$



# Teoria Cinética dos Gases

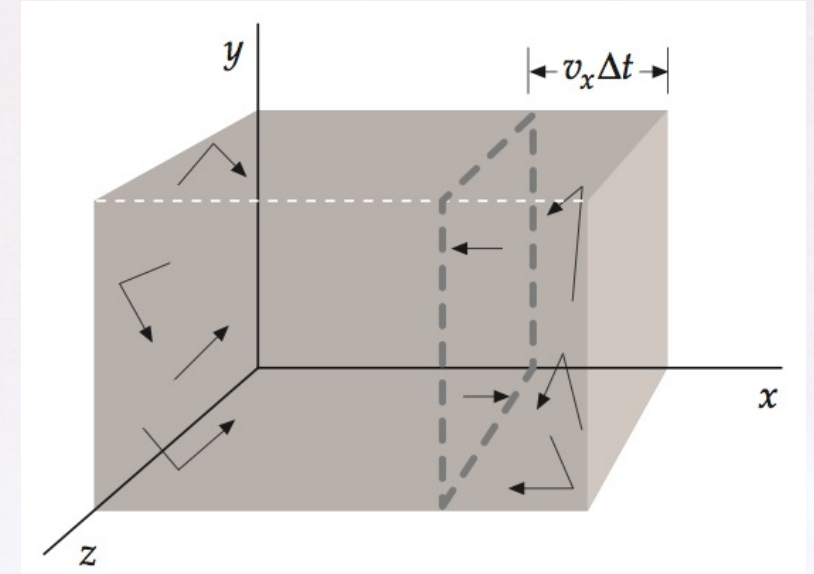
(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A densidade de partículas no recipiente é dada por:

$$\rho_p = \frac{N}{V}$$

Para estimar a força exercida pelas partículas sobre a parede da direita, no intervalo  $\Delta t$ , precisamos obter o número de partículas  $N_t$  que se chocam com a parede neste mesmo  $\Delta t$ . Estas partículas estão a uma distância  $v_x \Delta t$  da parede, que tem área  $A$ .





# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

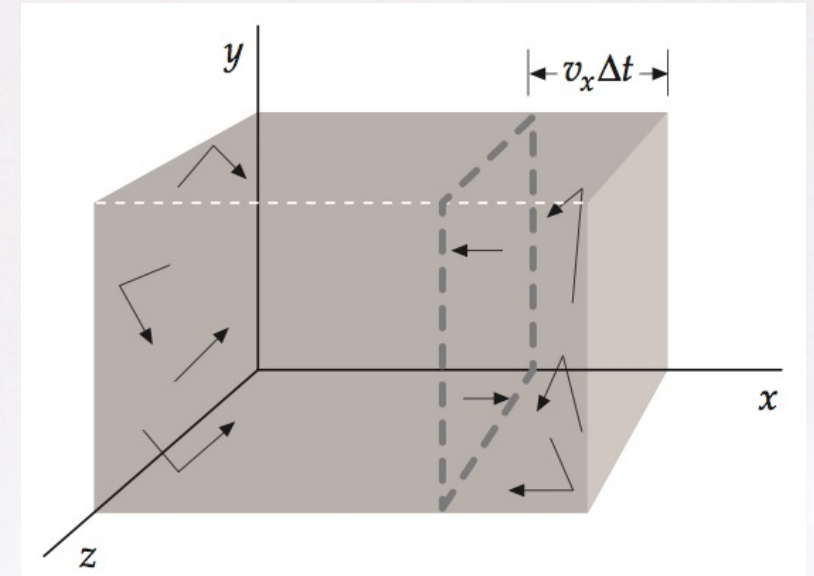
A densidade de partículas no recipiente é dada por:

$$\rho_p = \frac{N}{V}$$

Para estimar a força exercida pelas partículas sobre a parede da direita, no intervalo  $\Delta t$ , precisamos obter o número de partículas  $N_t$  que se chocam com a parede neste mesmo  $\Delta t$ . Estas partículas estão a uma distância  $v_x \Delta t$  da parede, que tem área  $A$ .

Assumindo que em média, metade das partículas deslocam-se para a esquerda e metade para a direita, no volume  $v_x \Delta t A$ , o número de partículas que se chocam com a parede da direita é:

$$N_t = \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$



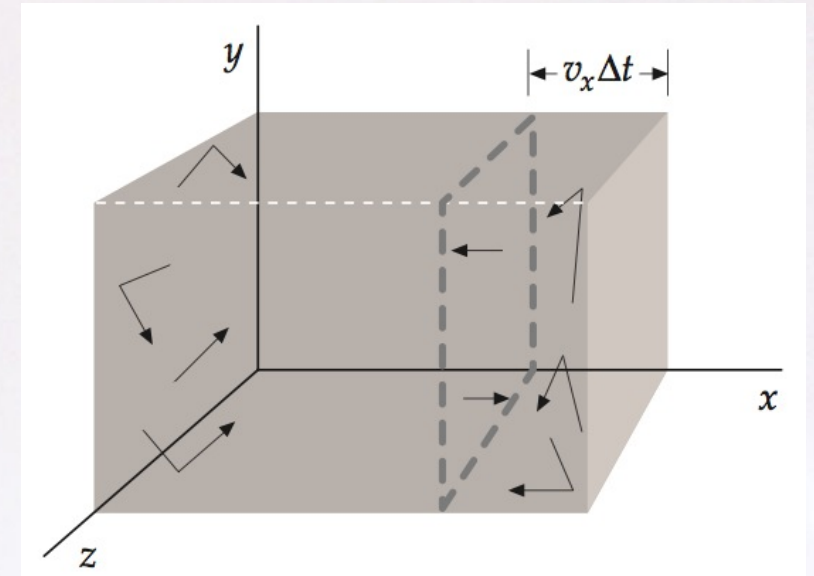
# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A magnitude da transferência de momentum linear na direção  $x$  de todas as partículas que se chocam com a parede no intervalo  $\Delta t$  é:

$$|\Delta p_x| = 2 m v_x \cdot \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$





# Teoria Cinética dos Gases

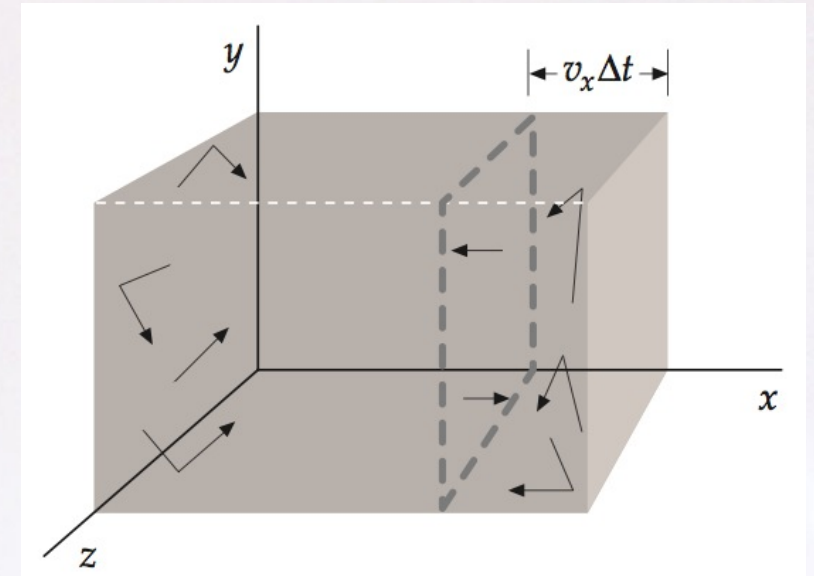
(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A magnitude da transferência de momentum linear na direção  $x$  de todas as partículas que se chocam com a parede no intervalo  $\Delta t$  é:

$$|\Delta p_x| = 2 m v_x \cdot \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$

$$|\Delta p_x| = \rho_p m v_x^2 \Delta t A$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

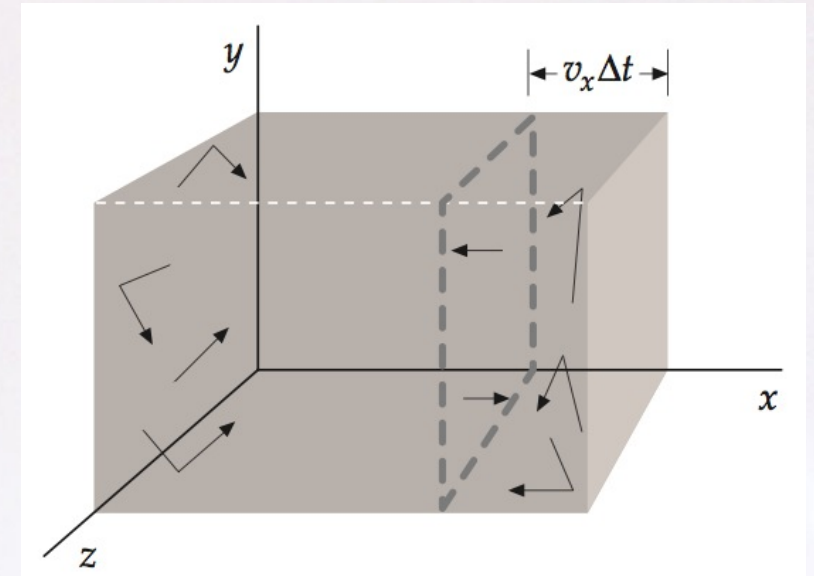
A magnitude da transferência de momentum linear na direção  $x$  de todas as partículas que se chocam com a parede no intervalo  $\Delta t$  é:

$$|\Delta p_x| = 2 m v_x \cdot \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$

$$|\Delta p_x| = \rho_p m v_x^2 \Delta t A$$

Deste modo, a pressão sobre a parede da direita é dada por:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{|\Delta p_x|}{\Delta t} = \rho_p m v_x^2$$





# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A magnitude da transferência de momentum linear na direção  $x$  de todas as partículas que se chocam com a parede no intervalo  $\Delta t$  é:

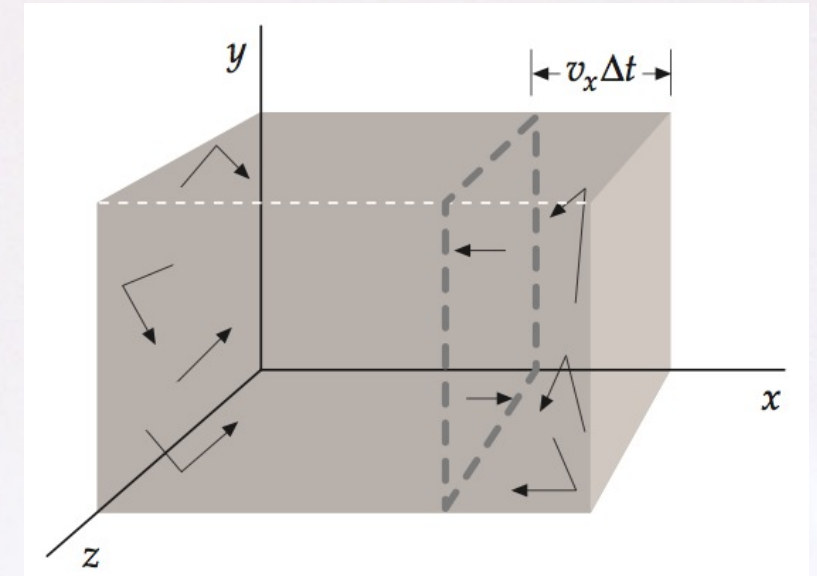
$$|\Delta p_x| = 2 m v_x \cdot \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$

$$|\Delta p_x| = \rho_p m v_x^2 \Delta t A$$

Deste modo, a pressão sobre a parede da direita é dada por:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{|\Delta p_x|}{\Delta t} = \rho_p m v_x^2$$

$$P = \frac{N}{V} m v_x^2$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

A magnitude da transferência de momentum linear na direção  $x$  de todas as partículas que se chocam com a parede no intervalo  $\Delta t$  é:

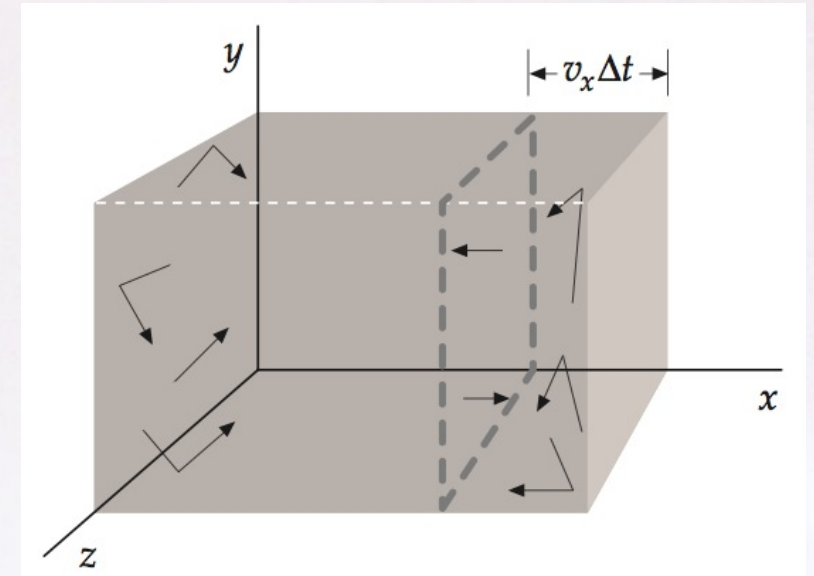
$$|\Delta p_x| = 2 m v_x \cdot \frac{1}{2} \rho_p v_x \Delta t A$$

$$|\Delta p_x| = \rho_p m v_x^2 \Delta t A$$

Deste modo, a pressão sobre a parede da direita é dada por:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{|\Delta p_x|}{\Delta t} = \rho_p m v_x^2$$

$$P = \frac{N}{V} m v_x^2 \quad \Rightarrow \quad P V = N m v_x^2$$





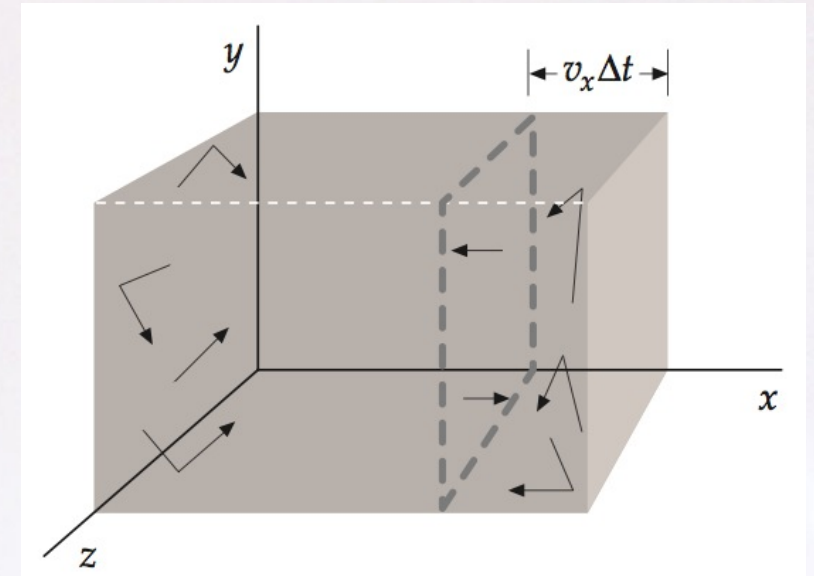
# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como as partículas possuem diferentes velocidades, consideramos a velocidade quadrática média na direção  $x$  :

$$v_x^2 \rightarrow \langle v_x^2 \rangle$$



# Teoria Cinética dos Gases

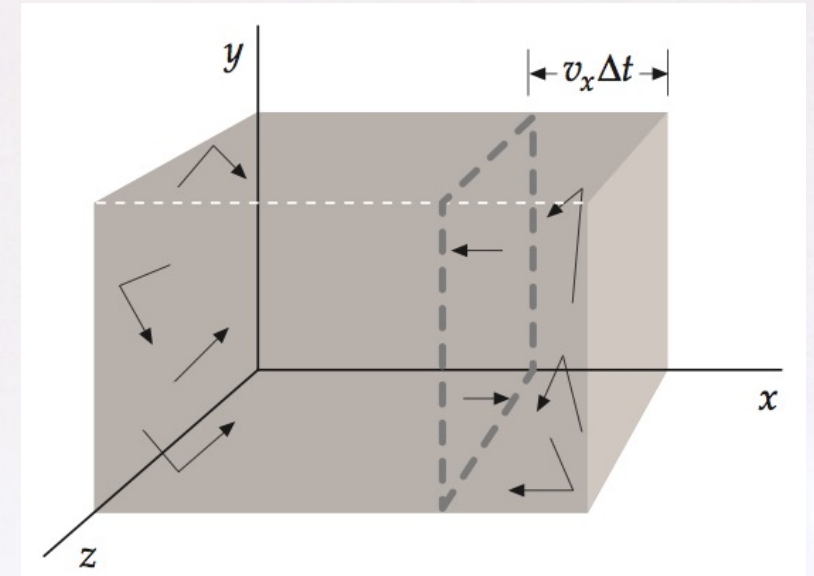
(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como as partículas possuem diferentes velocidades, consideramos a velocidade quadrática média na direção  $x$  :

$$v_x^2 \rightarrow \langle v_x^2 \rangle$$

$$PV = Nm \langle v_x^2 \rangle$$





# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

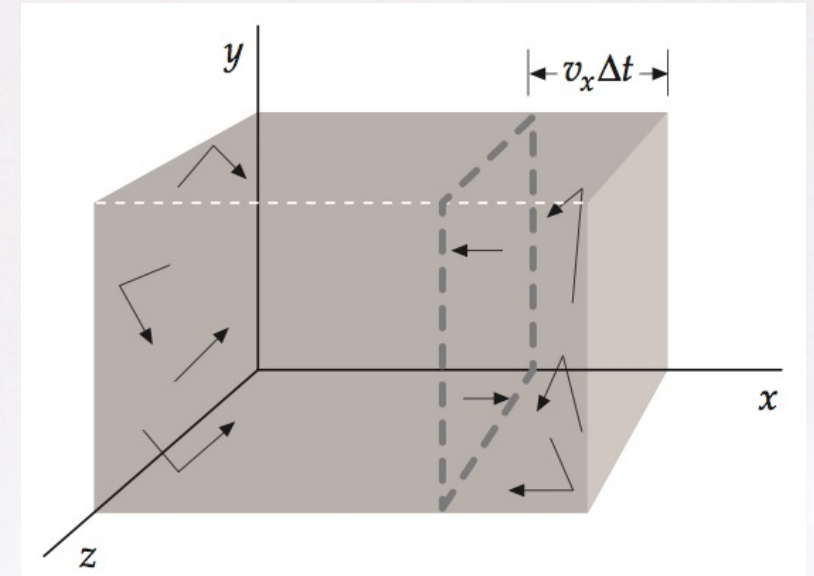
Como as partículas possuem diferentes velocidades, consideramos a velocidade quadrática média na direção  $x$  :

$$v_x^2 \rightarrow \langle v_x^2 \rangle$$

$$PV = Nm \langle v_x^2 \rangle$$

O termo  $mv^2$  lembra a expressão para a energia cinética, assim:

$$m \langle v_x^2 \rangle = \langle m v_x^2 \rangle = \left\langle \frac{2}{2} m v_x^2 \right\rangle = 2 \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como as partículas possuem diferentes velocidades, consideramos a velocidade quadrática média na direção  $x$  :

$$v_x^2 \rightarrow \langle v_x^2 \rangle$$

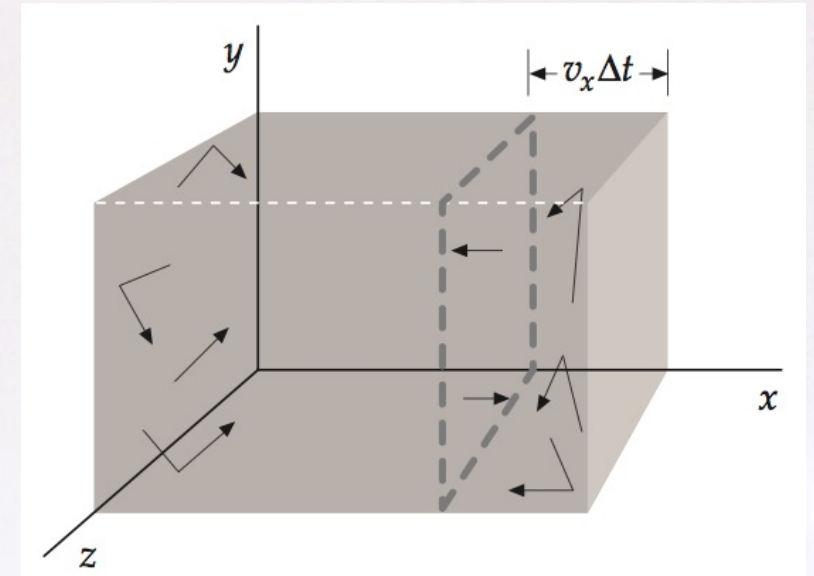
$$PV = Nm \langle v_x^2 \rangle$$

O termo  $mv^2$  lembra a expressão para a energia cinética, assim:

$$m \langle v_x^2 \rangle = \langle m v_x^2 \rangle = \left\langle \frac{2}{2} m v_x^2 \right\rangle = 2 \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

Assim:

$$PV = 2N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$





# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como:

$$PV = 2N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como:

$$P V = 2 N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

Lembrando que:

$$P V = N k_B T \quad \text{(Gás Ideal)}$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como:

$$P V = 2 N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

Lembrando que:

$$P V = N k_B T \quad (\text{Gás Ideal})$$

Temos que:

$$\left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como:

$$P V = 2 N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

Lembrando que:

$$P V = N k_B T \quad (\text{Gás Ideal})$$

Temos que:

$$\left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

A energia cinética média de uma partícula levando em conta o movimento apenas em  $x$  é  $\frac{1}{2} k_B T$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

→ Pressão : colisões de partículas com as paredes do recipiente

Como:

$$P V = 2 N \left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle$$

Lembrando que:

$$P V = N k_B T \quad (\text{Gás Ideal})$$

Temos que:

$$\left\langle \frac{1}{2} m v_x^2 \right\rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

A energia cinética média de uma partícula levando em conta o movimento apenas em  $x$  é  $\frac{1}{2} k_B T$

- não há interação (i. e., sem energia potencial)
- não há rotação (i. e., sem energia cinética de rotação da partícula ou do C. M.)
- não há vibração (apenas gás monoatômico)

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Como:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Então:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Como:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

Então:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$$

Se considerarmos que não há uma direção preferencial (isotropia), o movimento é equivalente em todas as direções, e desprezando efeitos da gravidade, temos que:

$$\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle$$

Deste modo:

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$$

E assim:

$$\langle v_x^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Deste modo:

$$\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

Assim, a energia cinética média de translação de uma partícula (movimento em 3D) é:

$$\langle \mathcal{K}_{\text{tr}} \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Deste modo:

$$\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

Assim, a energia cinética média de translação de uma partícula (movimento em 3D) é:

$$\langle \mathcal{K}_{\text{tr}} \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

Para um sistema com  $N$  partículas ou  $n$  mols de partículas, temos:

$$\mathcal{K}_{\text{tr}} = N \langle \mathcal{K}_{\text{tr}} \rangle = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} n R T$$

onde:

$$N k_B = n N_A k_B = n R$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Assim:

$$PV = \frac{2}{3} N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

$$PV = \frac{2}{3} \mathcal{K}_{\text{tr}}$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Assim:

$$PV = \frac{2}{3} N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

$$PV = \frac{2}{3} \mathcal{K}_{\text{tr}}$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{\mathcal{K}_{\text{tr}}}{V} = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Assim:

$$PV = \frac{2}{3} N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

$$PV = \frac{2}{3} \mathcal{K}_{\text{tr}}$$

macroscópico

microscópico

$$\underline{P} = \frac{2}{3} \frac{\mathcal{K}_{\text{tr}}}{V} = \frac{1}{3} \rho \underline{\langle v^2 \rangle}$$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Assim:

$$P V = \frac{2}{3} N \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle$$

$$P V = \frac{2}{3} \mathcal{K}_{\text{tr}}$$

macroscópico

microscópico

$$P = \frac{2}{3} \frac{\mathcal{K}_{\text{tr}}}{V} = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$$

Que nos permite obter:

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3 P}{\rho}$$

e a velocidade média quadrática:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3 P}{\rho}}$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Ou ainda:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3 R T}{M}}$$

Como veremos em outro tópico, a velocidade do som em um gás é dada por:

$$v_{\text{som}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

onde  $\gamma$  é 1,4 para o ar. Uma onda sonora é uma onda de pressão que se propaga ao longo de um gás através de colisões entre as partículas. (no gás ideal não há colisões entre as partículas).



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Teorema da Equipartição da energia:

Para um gás em equilíbrio térmico, a energia média por partícula vale  $\frac{1}{2} k_B T$  associada a cada grau de liberdade quadrático (ou  $\frac{1}{2} RT$  por mol, para cada grau de lib. quadrático).

**Gás ideal → Energia interna depende apenas da temperatura**

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Teorema da Equipartição da energia:

Para um gás em equilíbrio térmico, a energia média por partícula vale  $\frac{1}{2} k_B T$  associada a cada grau de liberdade quadrático (ou  $\frac{1}{2} R T$  por mol, para cada grau de lib. quadrático).

**Gás ideal → Energia interna depende apenas da temperatura**

Graus de liberdade ( $f$ ) estão associados com movimentos de translação, rotação, vibração, ou ainda, com a energia potencial de vibração, em cada dimensão do espaço que está disponível ao sistema (ex.: translação 3D).

$$U(T) = \left(\frac{f}{2}\right) N k_B T$$

ou

$$U(T) = \left(\frac{f}{2}\right) n R T$$

(gás ideal)

O teorema da Equipartição da energia possui validade limitada em função de fenômenos quânticos que se manifestam em determinadas condições (energia quantizada, por exemplo).

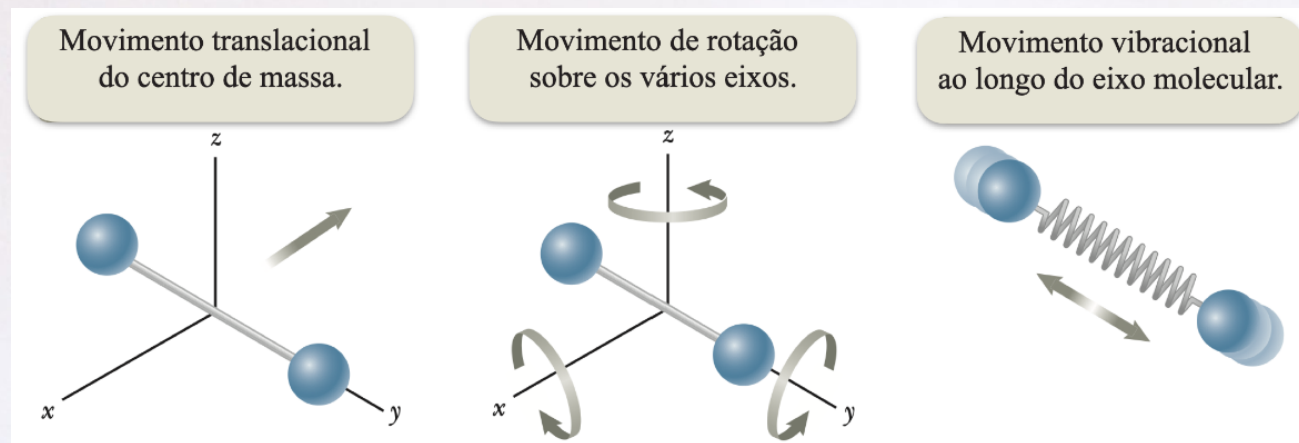


# Teoria Cinética dos Gases

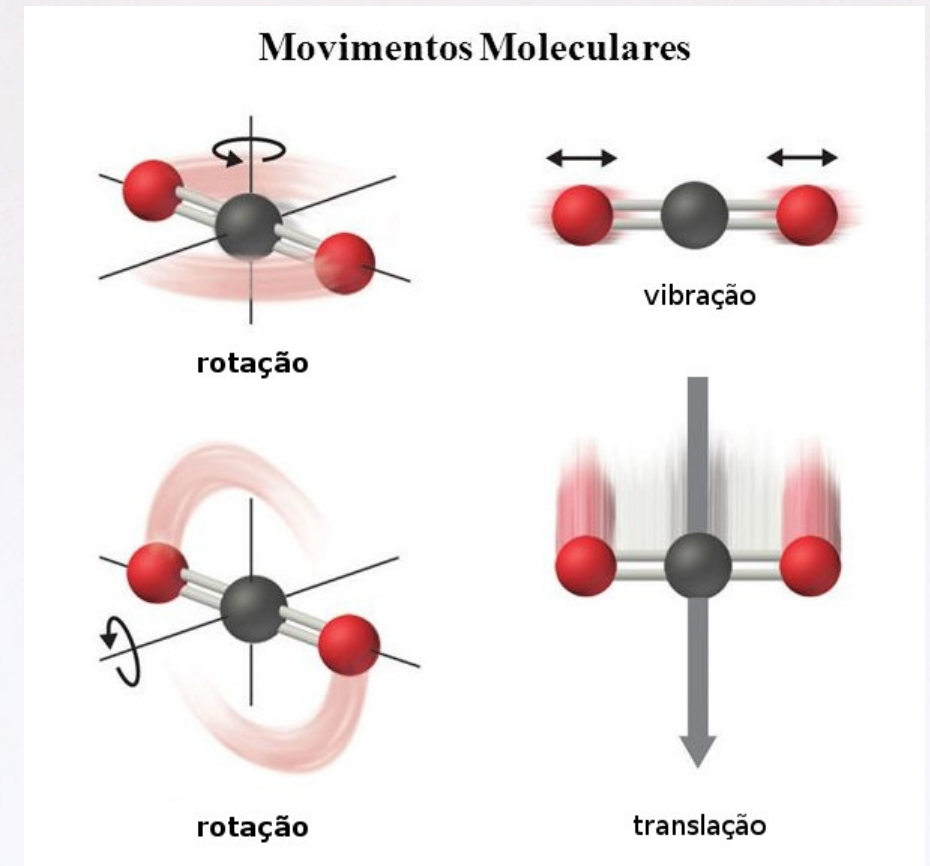
(Gás Ideal)

Graus de liberdade:

- translação (x, y, z) → máximo: 3 graus de liberdade
- rotação (x, y, z) → máximo: 3 graus de liberdade
- etc.



(Exemplo: molécula diatômica)



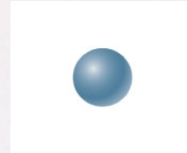
(Exemplo: alguns movimentos - molécula triatômica)

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Graus de liberdade ( $f$ ):

- gás monoatômico

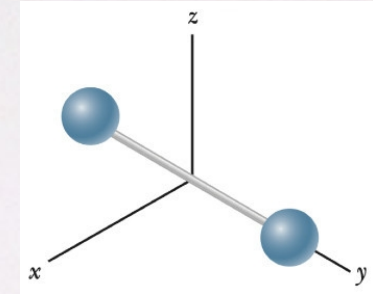


- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

- rotação:  $f_r = 1$

→ máximo:  $f = 4$

- gás diatômico



- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

- rotação:  $f_r = 3$

- vibração:  $f_v = 2$  (parte cinética e potencial)

→ máximo:  $f = 8$



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Teorema da Equipartição da energia:

Se:

$$U(T) = \left(\frac{f}{2}\right) n R T$$

e

$$C_V = \frac{dU}{dT}$$

,

$$C_P - C_V = nR$$

$$c_P - c_V = R$$

Então:

$$C_V = \left(\frac{f}{2}\right) n R$$

e

$$c_V = \left(\frac{f}{2}\right) R$$

assim:

$$C_P = \left(\frac{f}{2} + 1\right) n R$$

e

$$c_P = \left(\frac{f}{2} + 1\right) R$$

$$\frac{f}{2} + 1 = \frac{f+2}{2}$$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

$$c_P = \left(\frac{f}{2} + 1\right) R$$

$$c_V = \left(\frac{f}{2}\right) R$$

$f = 1$

$c_P = 12,47$

$c_V = 4,16$

(Valores em J/mol.K)

$f = 2$

$c_P = 16,63$

$c_V = 8,31$

$f = 3$

$c_P = 20,78$

$c_V = 12,47$

(Comparar os valores com os dados experimentais)

$f = 4$

$c_P = 24,94$

$c_V = 16,63$

$f = 5$

$c_P = 29,10$

$c_V = 20,78$

$f = 6$

$c_P = 33,26$

$c_V = 24,94$

$f = 7$

$c_P = 37,41$

$c_V = 29,10$



$$c_P - c_V = R$$

# Teoria Cinética dos Gases

Dados experimentais:  
(25°C)

Tipo de gás	Gás	$c_P$ (J/mol.K)	$c_V$ (J/mol.K)	$c_P - c_V$ (J/mol.K)	$\gamma = c_P/c_V$
Monoatômico	He (hélio)	20,797	12,485	8,312	1,666
	Ne (neônio)	20,784	12,471	8,313	1,666
	Ar (argônio)	20,806	12,492	8,314	1,666
	Xe (xenônio)	20,772	12,474	8,298	1,665
Diatômico	H <sub>2</sub> (hidrogênio)	28,856	20,543	8,313	1,405
	N <sub>2</sub> (nitrogênio)	29,134	20,819	8,315	1,399
	O <sub>2</sub> (oxigênio)	29,392	21,072	8,320	1,395
	CO (mon. carb)	29,164	20,851	8,313	1,399
Poliatômico	CO <sub>2</sub> (dio. carb)	37,144	28,835	8,309	1,288
	H <sub>2</sub> O (vap. água)	33,593	25,282	8,311	1,329
	SO <sub>2</sub> (dio. enxof)	39,884	31,567	8,317	1,263
	NH <sub>3</sub> (amônia)	35,580	27,238	8,342	1,306
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (acetileno)	44,123	35,807	8,316	1,232
	CH <sub>4</sub> (metano)	34,247	25,932	8,315	1,321
	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (hidrazina)	52,729	44,274	8,455	1,191
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (etileno)	42,911	34,597	8,314	1,240
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (etano)	52,694	44,383	8,311	1,187	

[Dados de  $c_p$  e  $c_v$  retirados de: BURGHARDT, M. D., Engineering Thermodynamics With Applications, 3rd ed., Harper & Row, 1986. tabela A.1, pág. 519 ]

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

$$c_P = \left(\frac{f}{2} + 1\right) R$$

$$c_V = \left(\frac{f}{2}\right) R$$

(Valores em J/mol.K)

$$f = 1$$

$$c_P = 12,47$$

$$c_V = 4,16$$

$$f = 2$$

$$c_P = 16,63$$

$$c_V = 8,31$$

M

$$f = 3$$

$$c_P = \underline{20,78}$$

$$c_V = \underline{12,47}$$

(Comparar os valores com os dados experimentais)

$$f = 4$$

$$c_P = 24,94$$

$$c_V = 16,63$$

D

$$f = 5$$

$$c_P = \underline{29,10}$$

$$c_V = \underline{20,78}$$

→ sabendo que para o ar  $\gamma = 1,4$ , Clausius então percebeu que o ar deveria ser descrito por moléculas como um corpo complexo, com partes constituintes movendo-se em torno do centro de massa do sistema.

P

$$f = 6$$

$$c_P = 33,26$$

$$c_V = 24,94$$

P

$$f = 7$$

$$c_P = 37,41$$

$$c_V = 29,10$$

P



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Graus de liberdade ( $f$ ):

- gás monoatômico



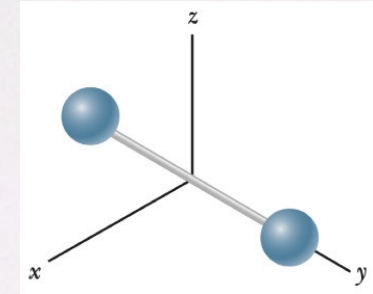
- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

~~- rotação:  $f_r = 1$~~

→ máximo:  $f = 4$

→  $f = 3$

- gás diatômico



- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

~~- rotação:  $f_r = 3$~~  → 2

~~- vibração:  $f_v = 2$~~

→ máximo:  $f = 8$

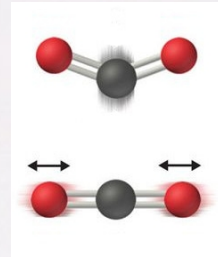
→  $f = 5$

# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

Graus de liberdade ( $f$ ):

- gás poliatômico (3)



- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

- rotação:  $f_r = 3$

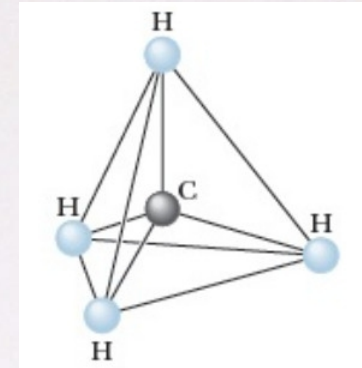
- vibração:  $f_v = 2?$

- (...) ←

→ máximo:  $f = ?$

→  $f = 6, 7, 8?$

- gás politômico (5)



- translação (x, y, z):  $f_t = 3$

- rotação:  $f_r = 3$

~~- vibração:  $f_v = 2?$~~

← (CH<sub>4</sub>)

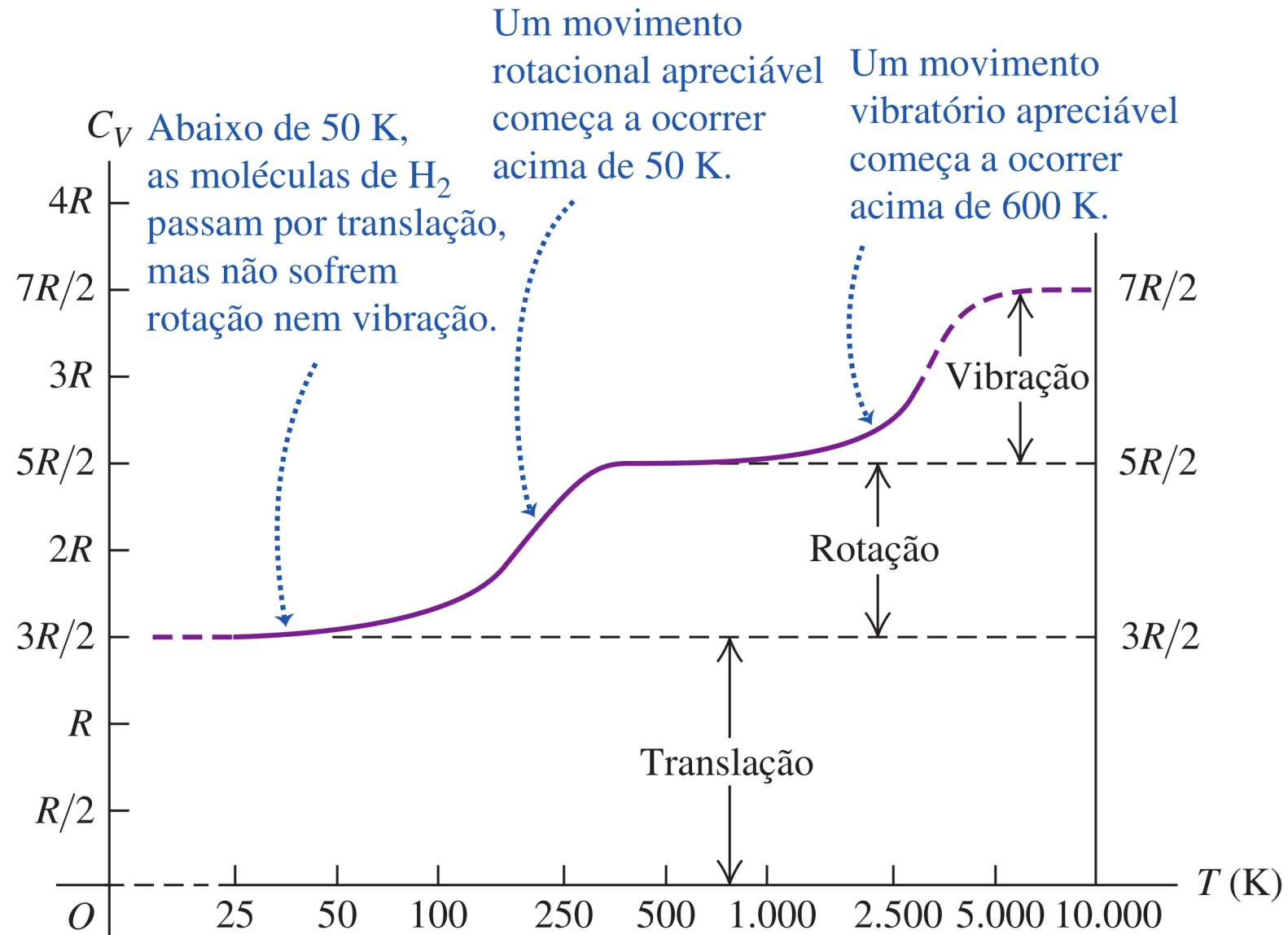
~~- (...) ←~~

→ máximo:  $f = ?$

→  $f = 6, 7, 10?$  ;  $f = 6$  (CH<sub>4</sub>)



**Calor específico molar a volume constante, para o gás hidrogênio (H<sub>2</sub>).**  
A temperatura é representada em escala logarítmica.



# Teoria Cinética dos Gases

(Gás Ideal)

...



FIM

