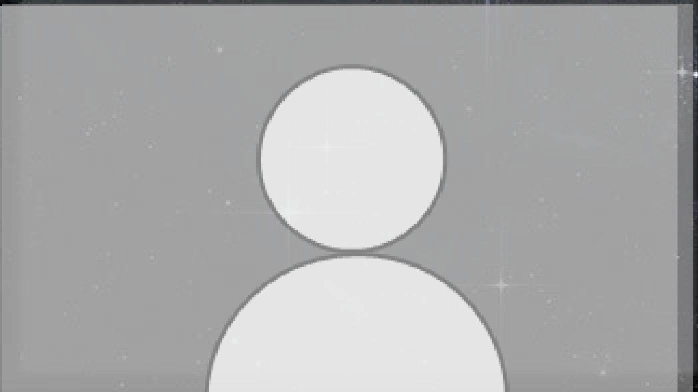
ENTROPIA E A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

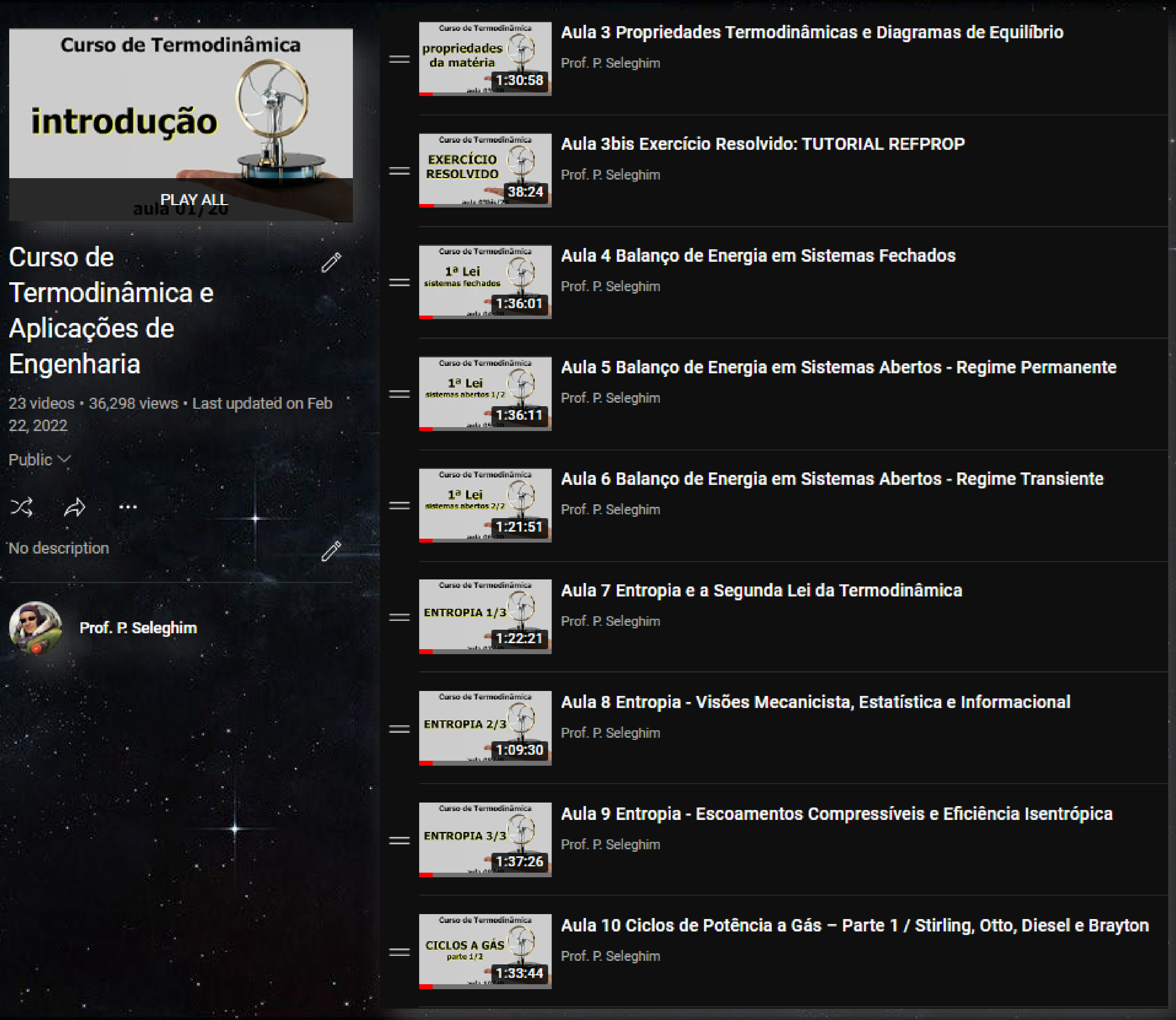
Paulo Seleghim Jr.
Universidade de São Paulo

Parte 1: Enunciados da 2ª lei, quantificando o nível de desordem de um sistema (ordem → desordem)

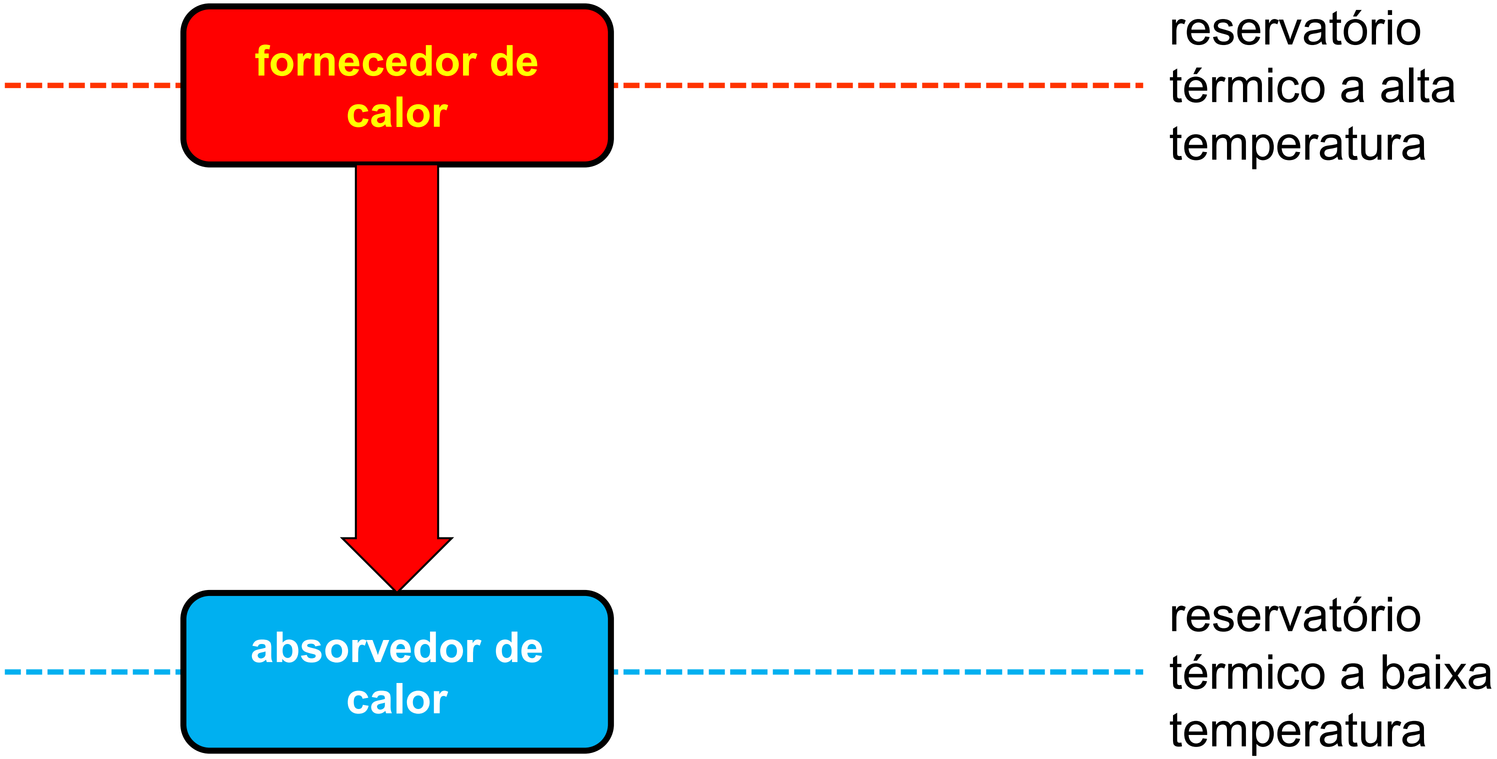
Parte 2: abordagens mecanicista e estatística (e também informacional)

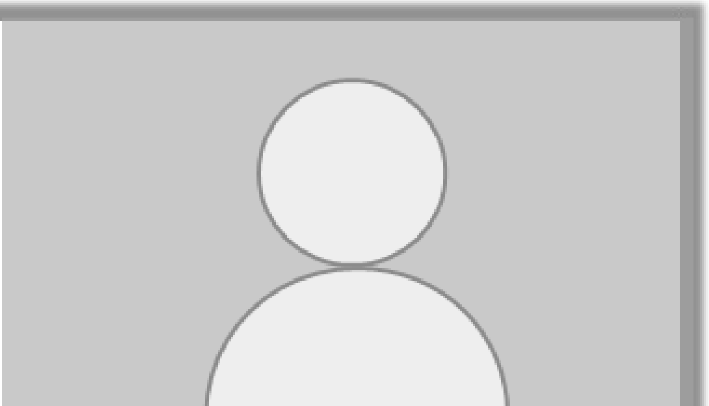
Parte 3: eficiência isentrópica e escoamentos compressíveis (aplicações de engenharia)



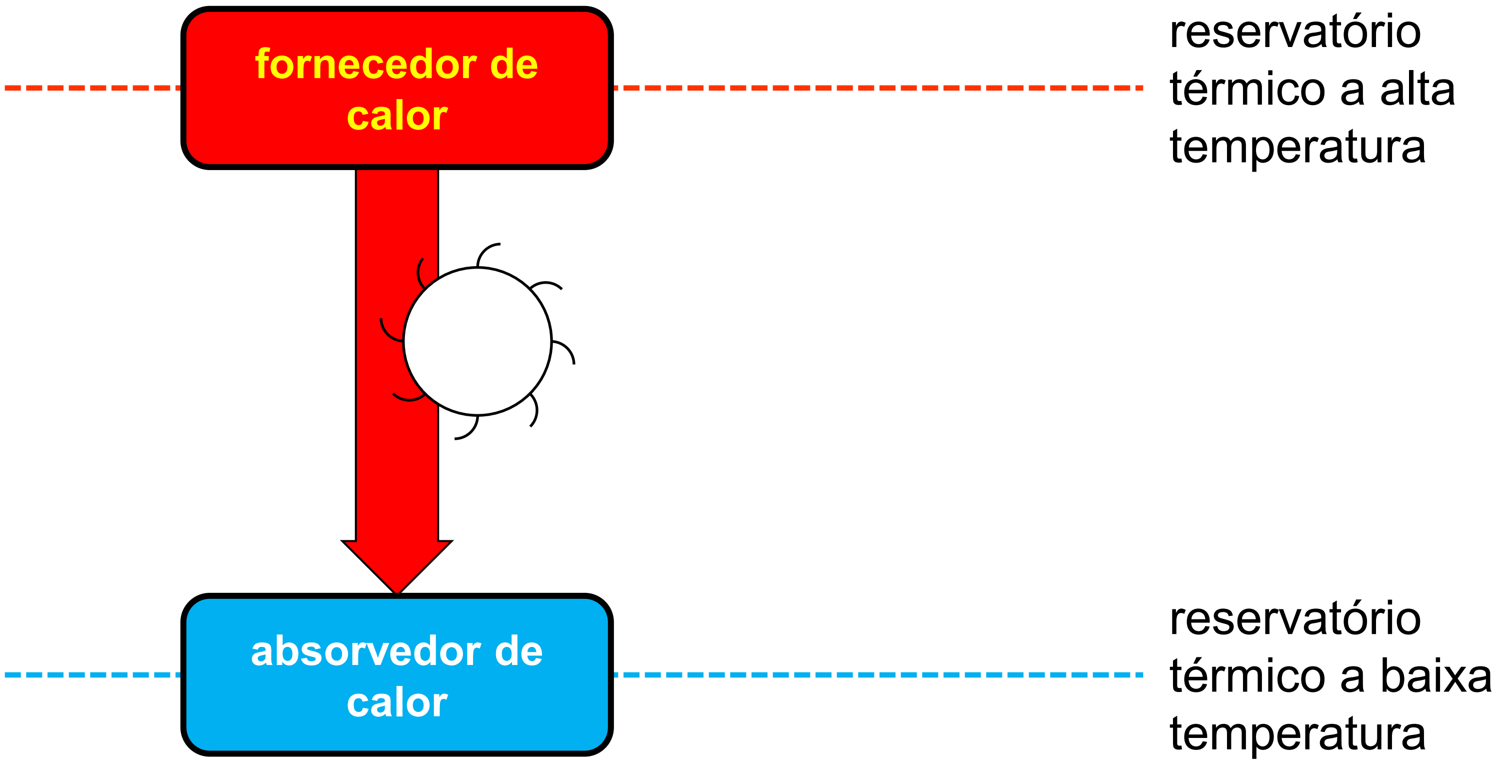


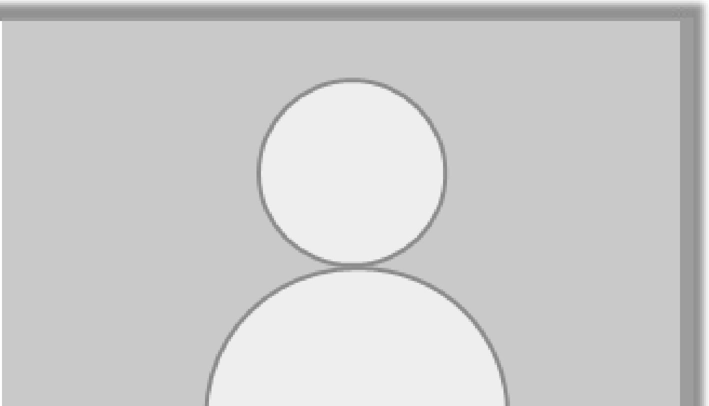
Sentido espontâneo do fluxo de energia



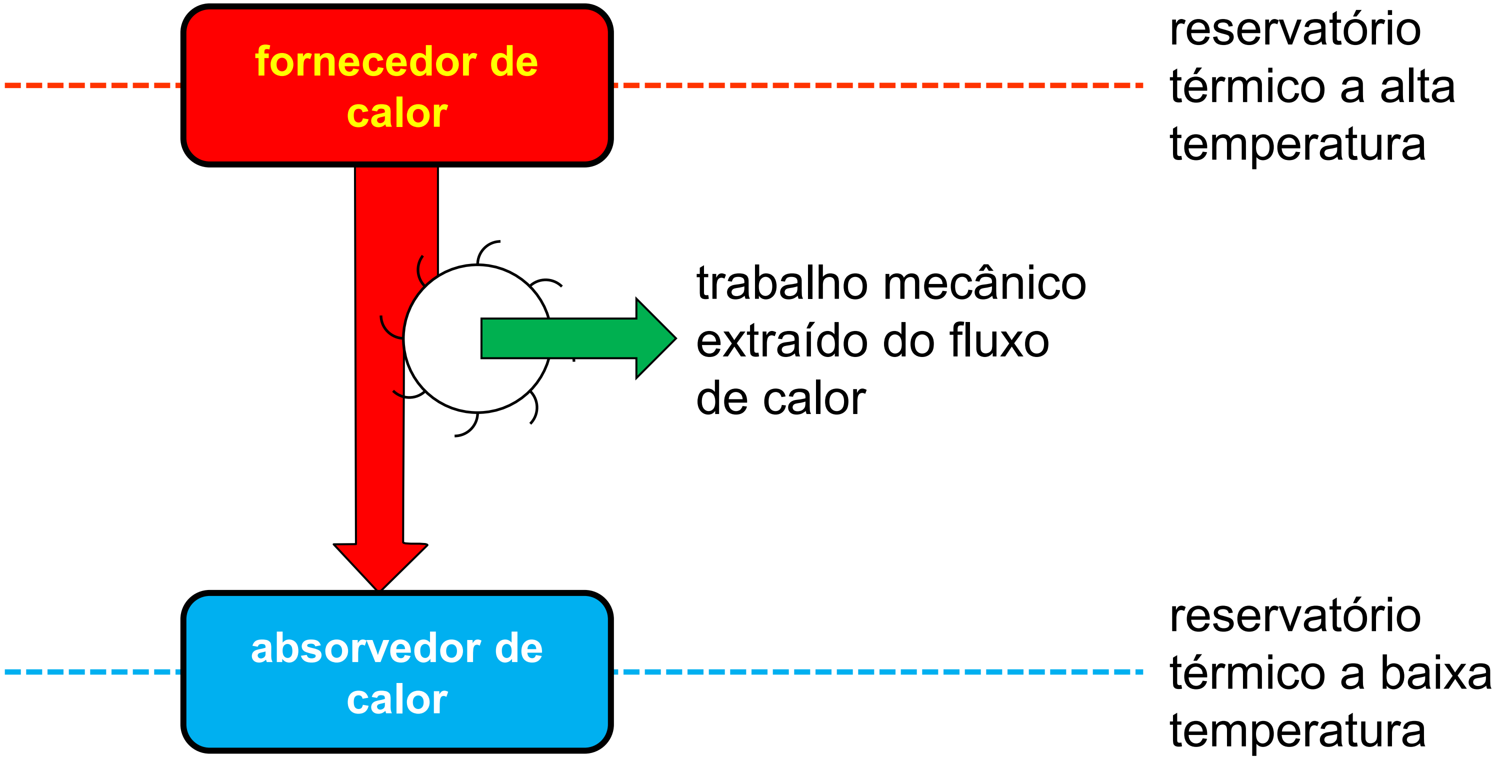


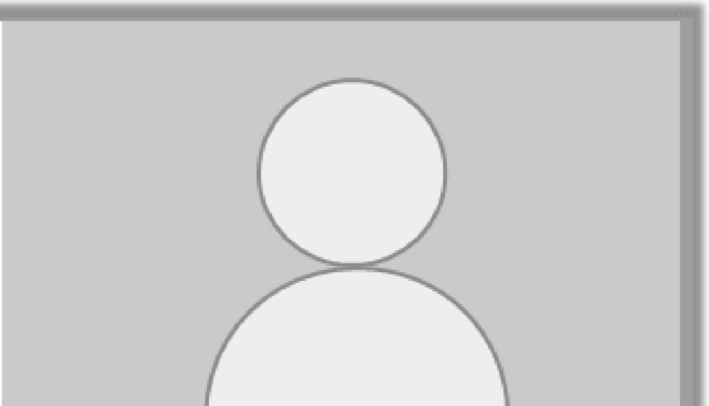
Sentido espontâneo do fluxo de energia



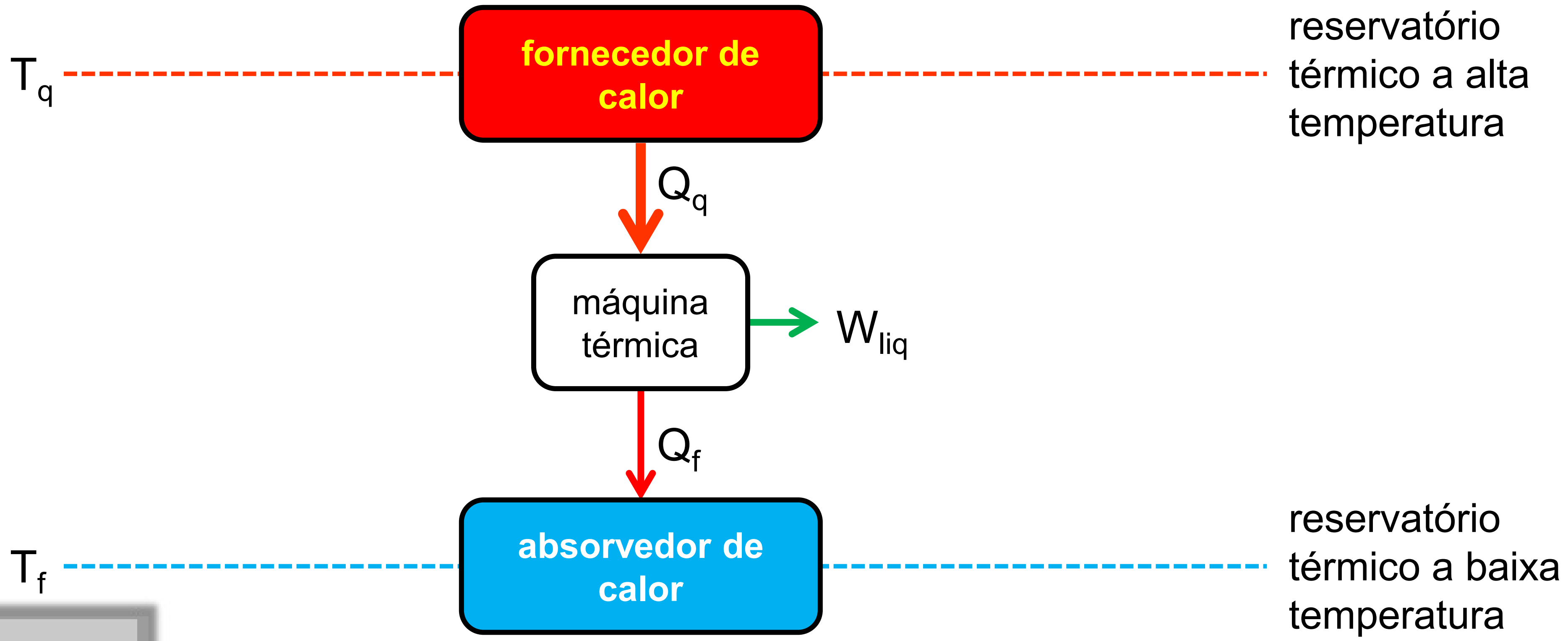


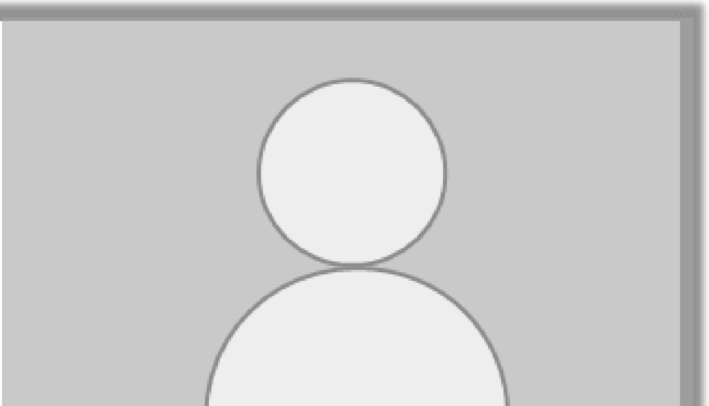
Sentido espontâneo do fluxo de energia



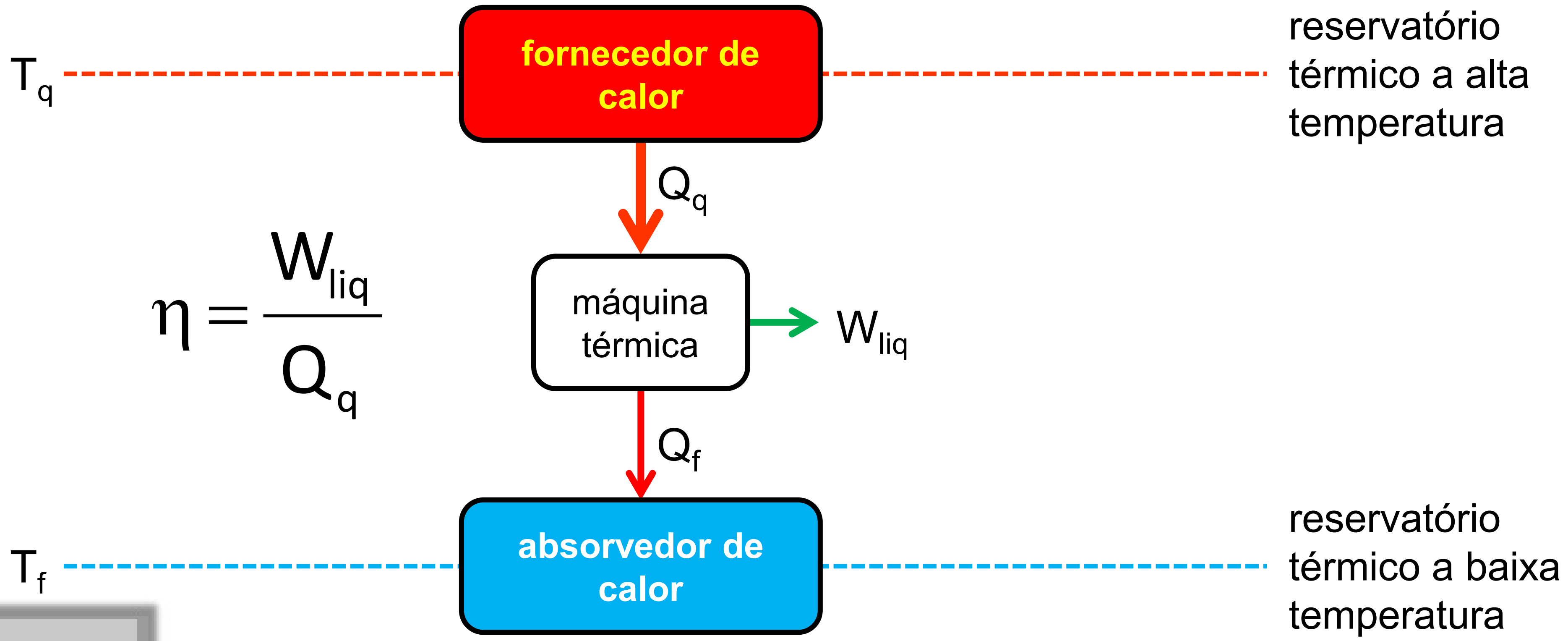


Sentido espontâneo do fluxo de energia

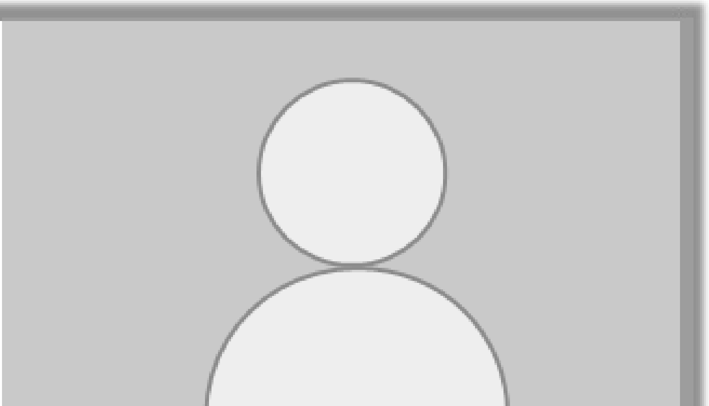




Sentido espontâneo do fluxo de energia



$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q}$$



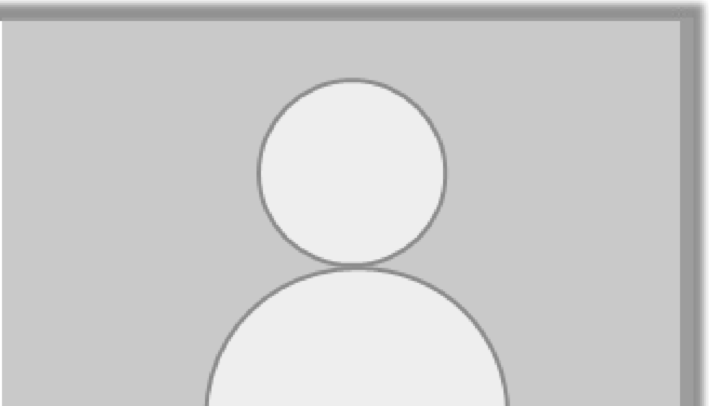
eficiência do ciclo de conversão

Sentido espontâneo do fluxo de energia

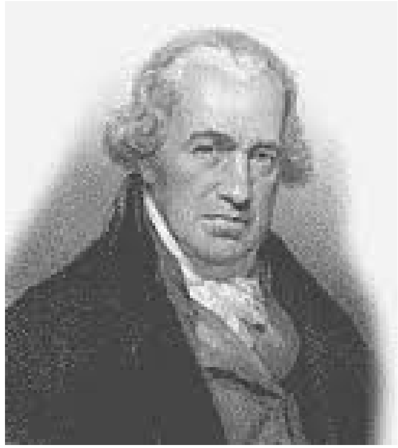
$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q}$$

equivalente ao trabalho executado por xxx cavalos unidade de potência $\rightarrow$ HP

custo proporcional a uma determinada quantidade de carvão (fonte de calor)

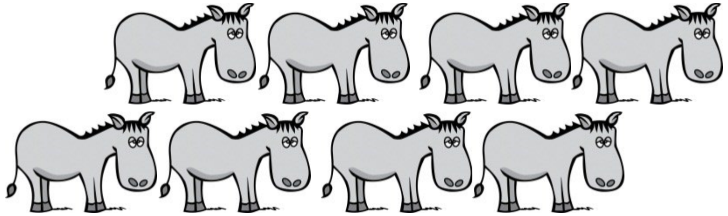


Sentido espontâneo do fluxo de energia



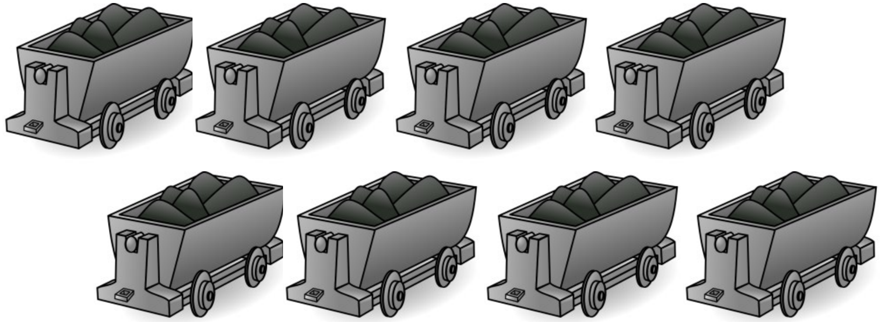
J. Watt desenvolveu o conceito de "cavalo-vapor" para facilitar a venda de sua máquina térmica (ele ficou muito rico...)

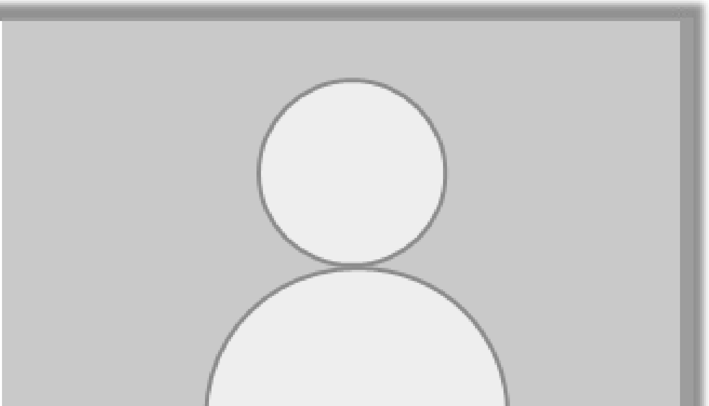
$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q}$$



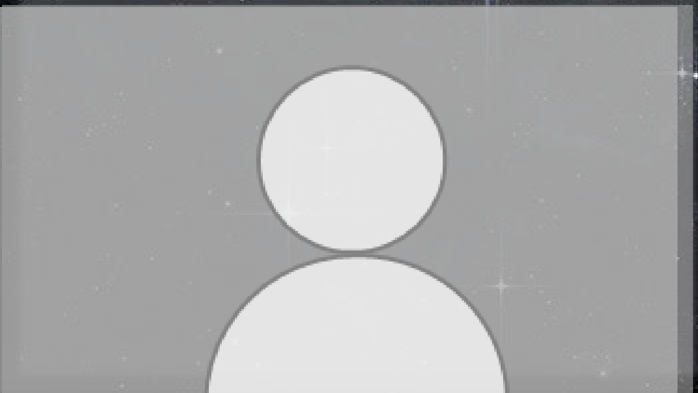
equivalente ao trabalho executado por xxx cavalos unidade de potência → HP

custo proporcional a uma determinada quantidade de carvão (fonte de calor)

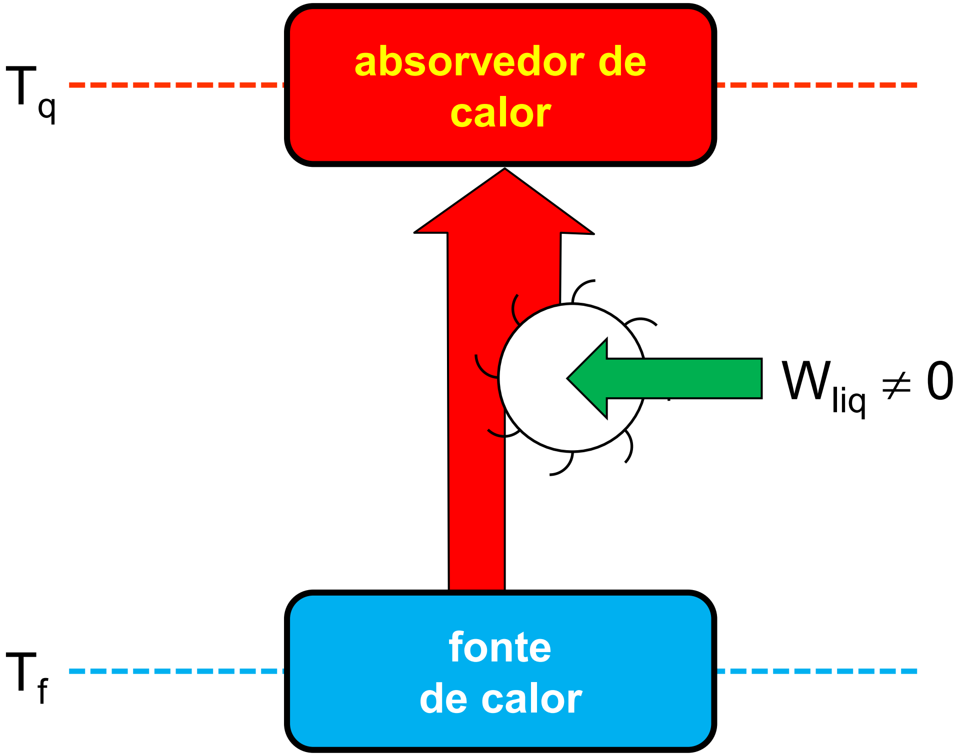


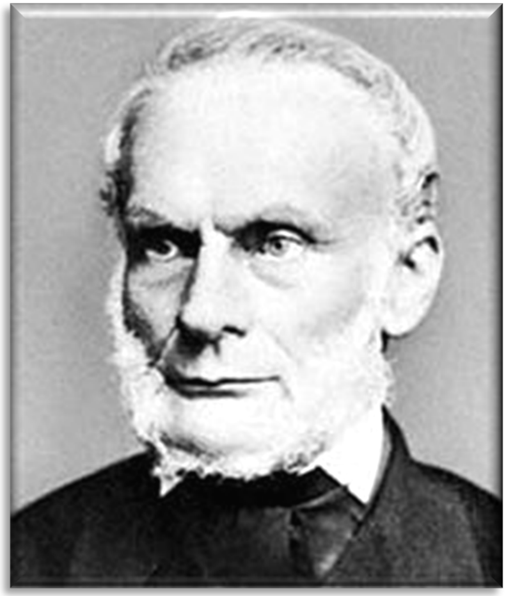


A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA...

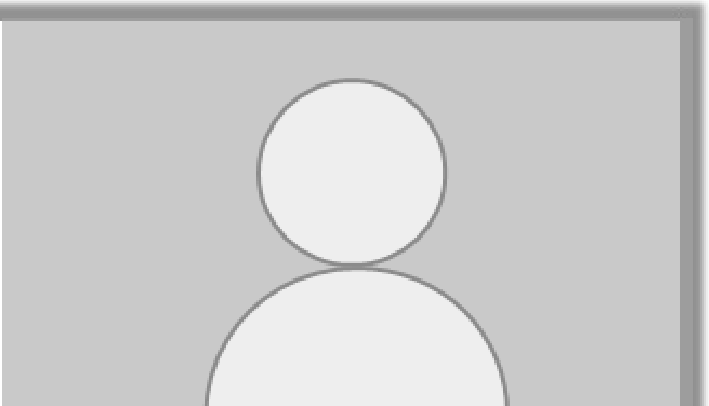


Segunda lei da termodinâmica: enunciado de Clausius



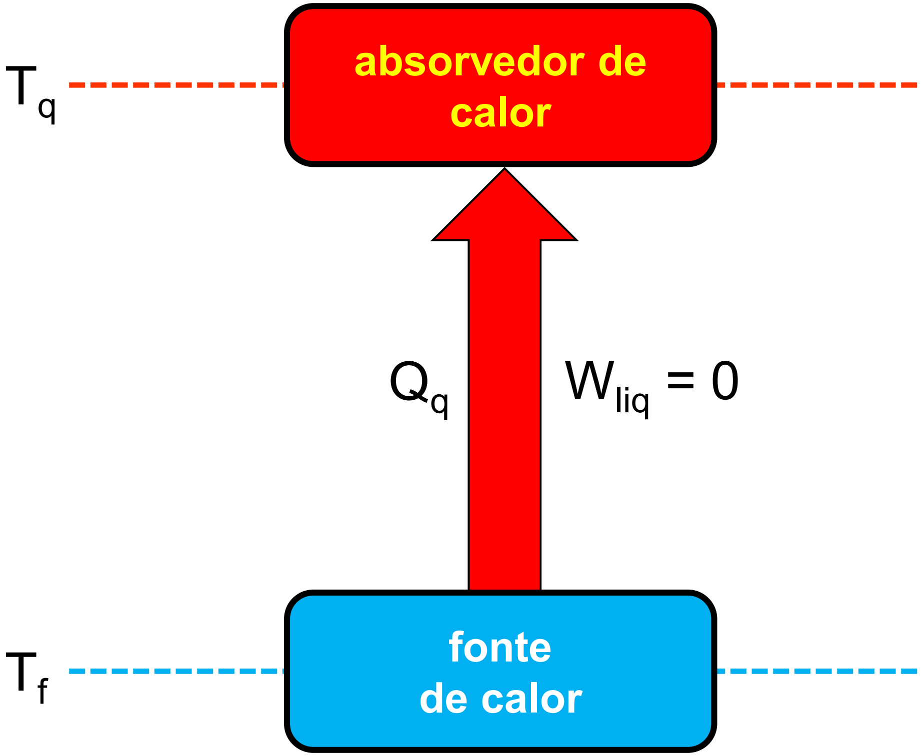


Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



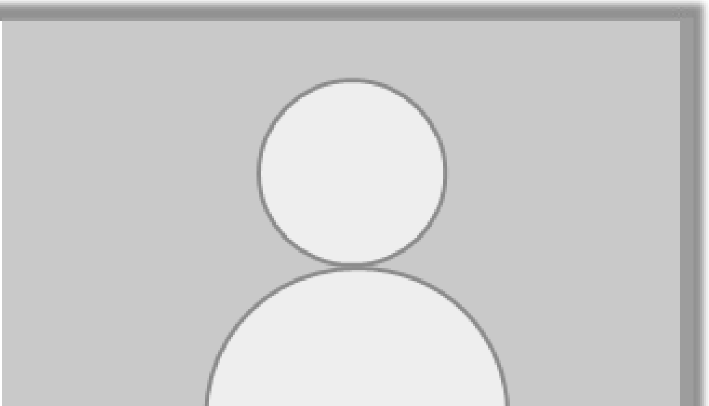
POSSÍVEL

Segunda lei da termodinâmica: enunciado de Clausius

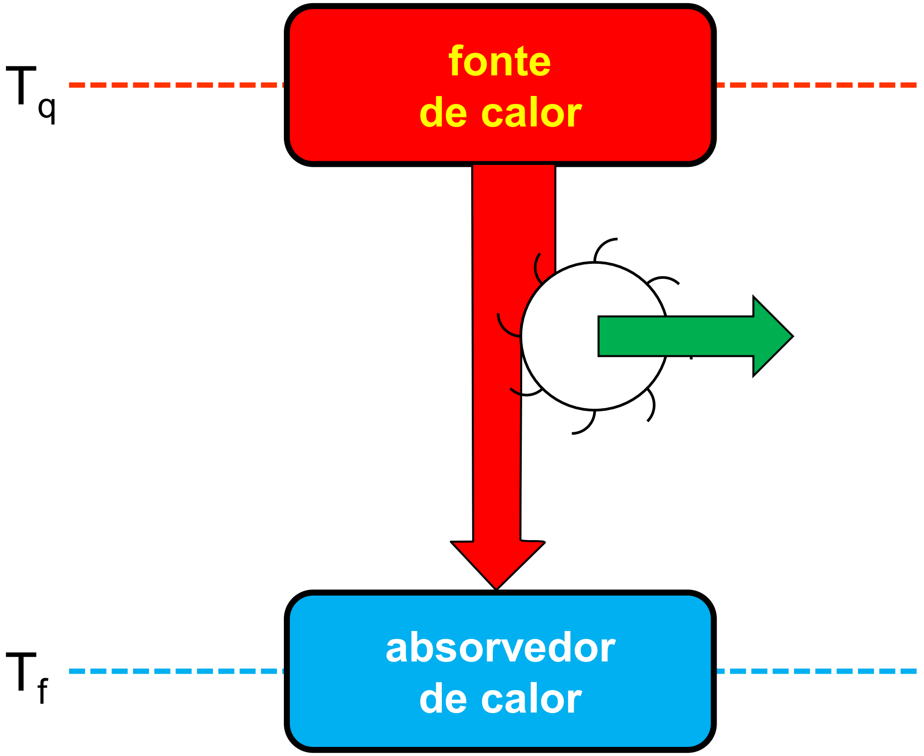


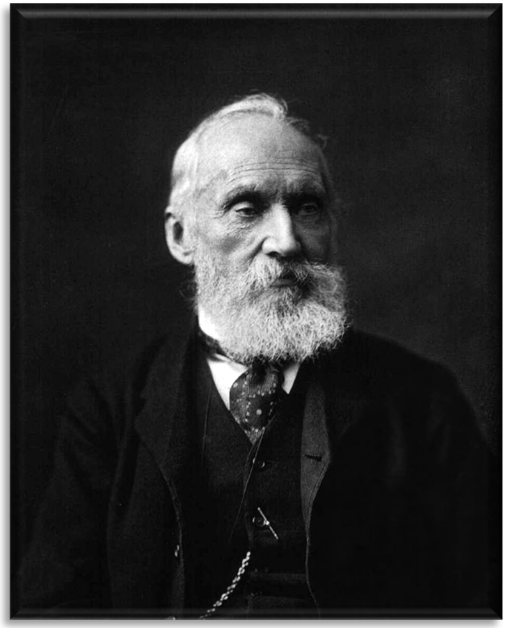
IMPOSSÍVEL

Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

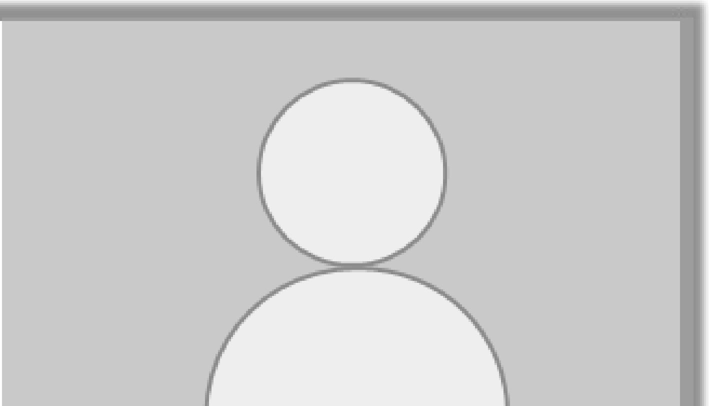


Segunda lei da termodinâmica: Kelvin-Planck



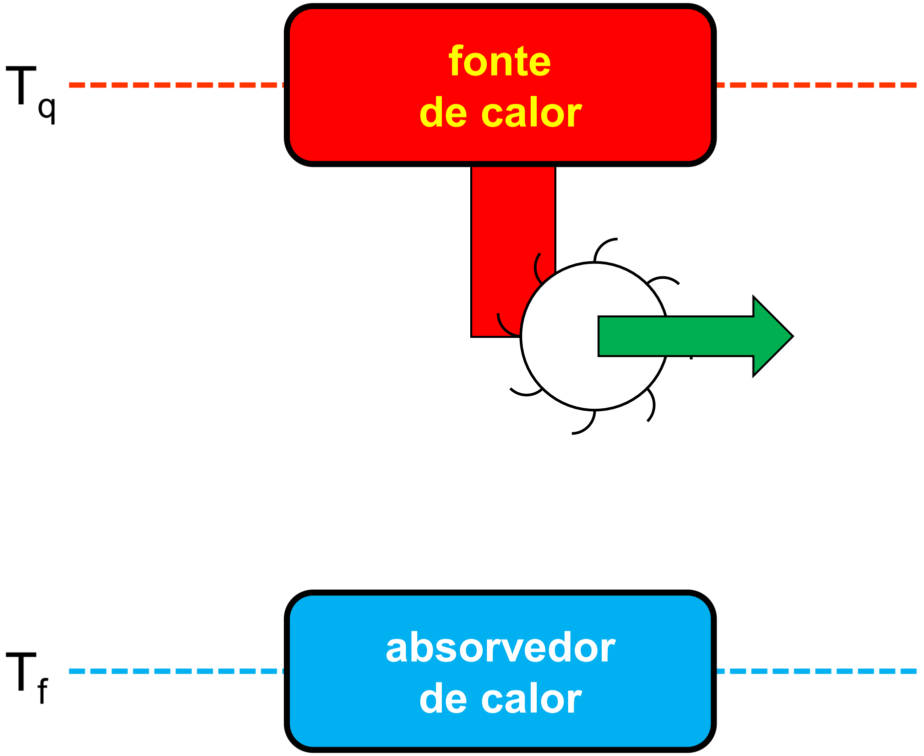


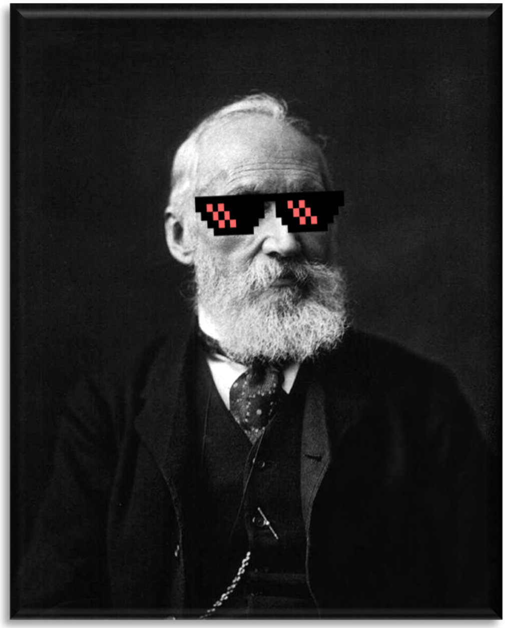
William Thomson, 1st Baron Kelvin
(1824 –1907)



POSSÍVEL

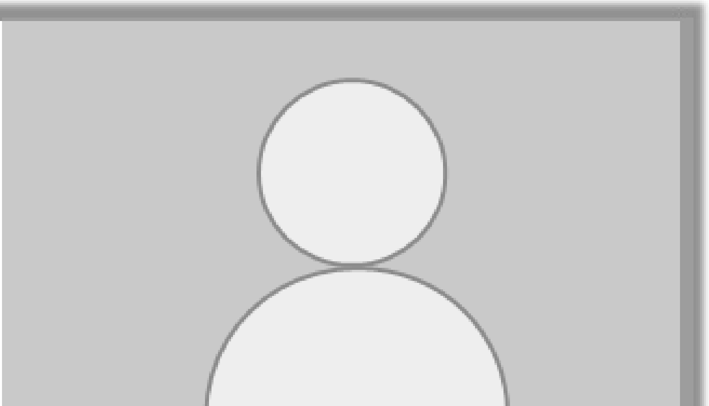
Segunda lei da termodinâmica: Kelvin-Planck



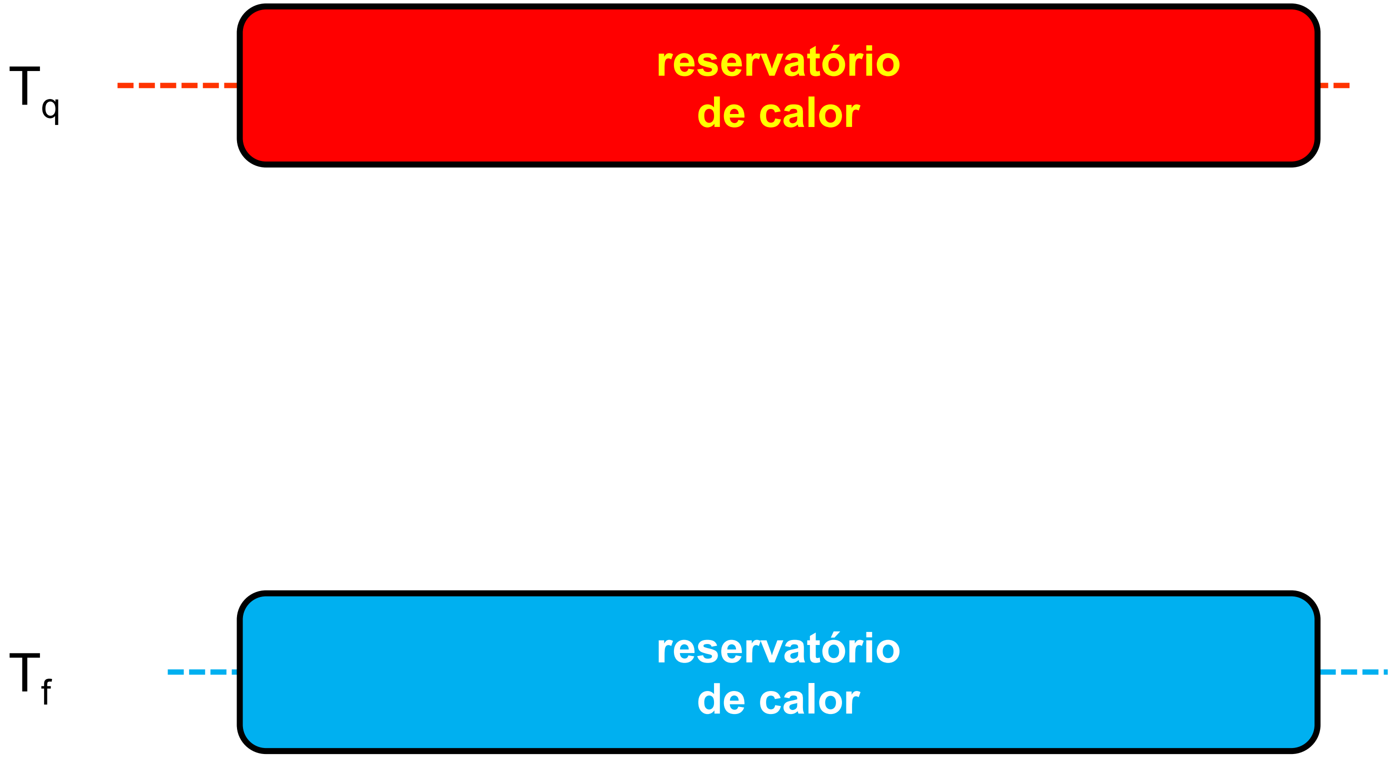


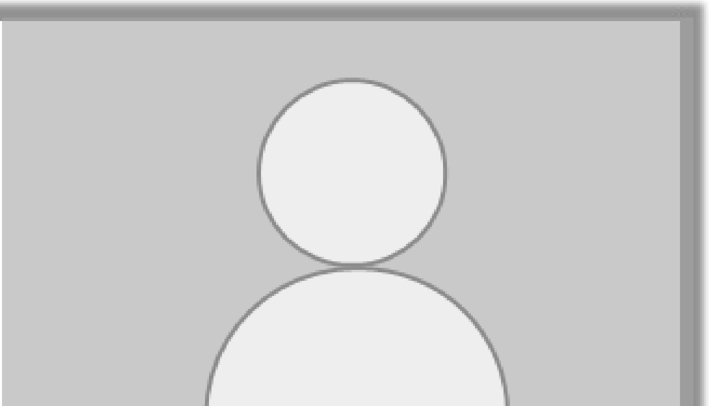
William Thomson, 1st Baron Kelvin
(1824 –1907)

IMPOSSÍVEL

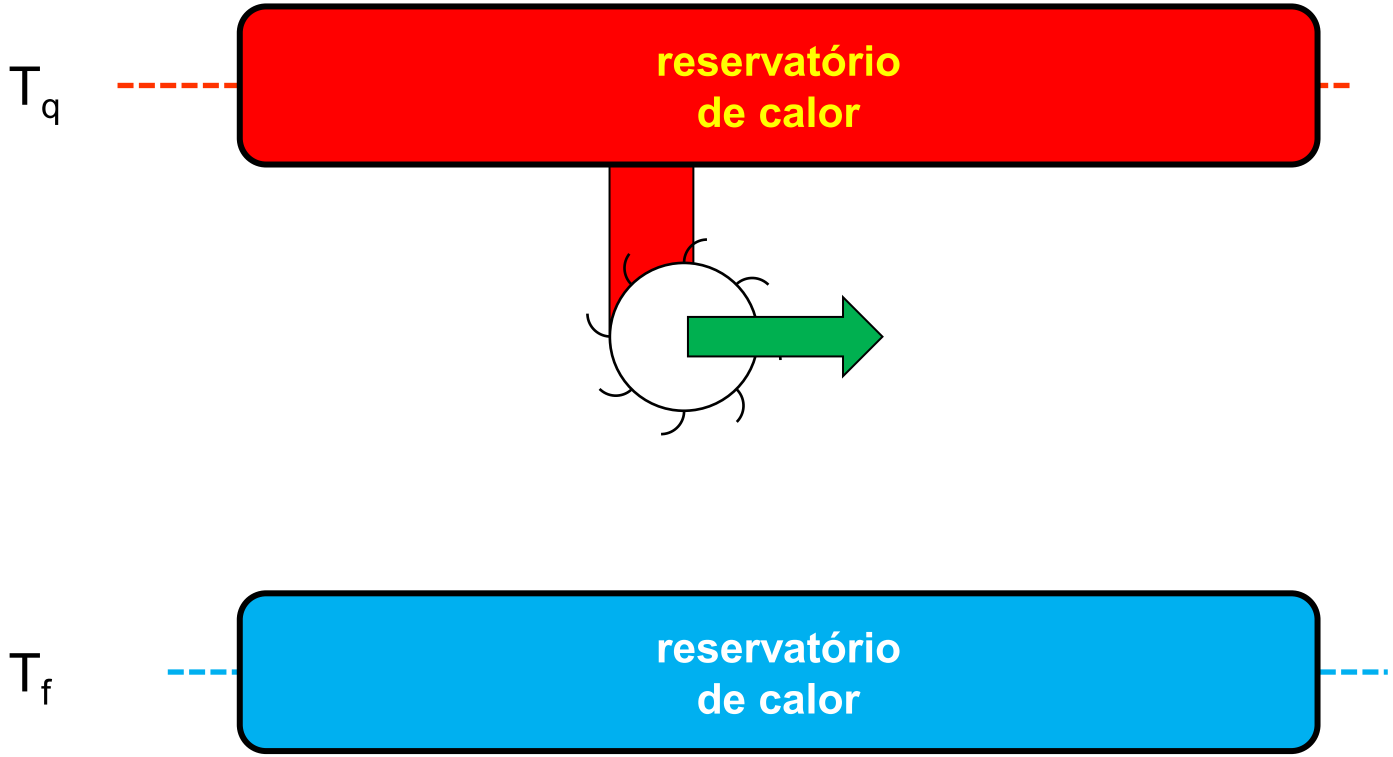


Equivalência dos dois enunciados da segunda lei



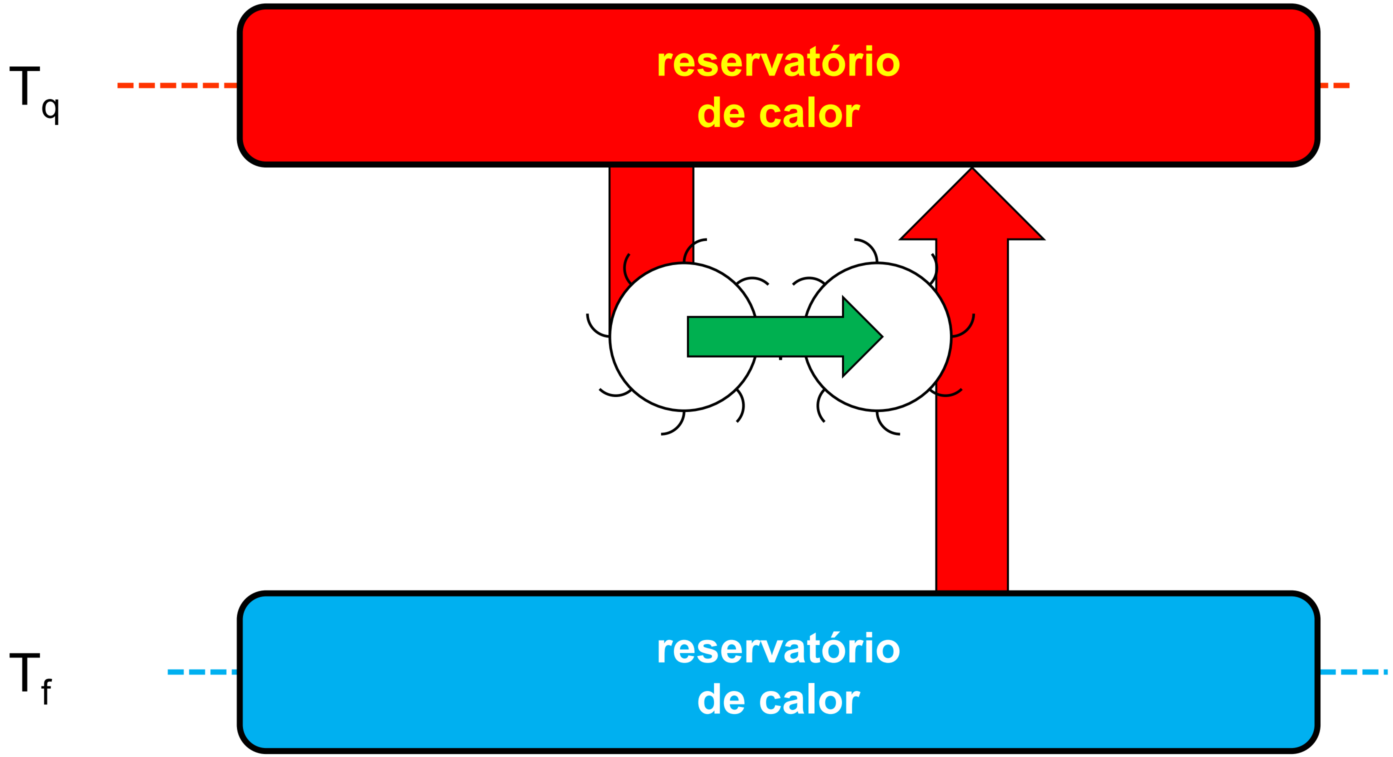


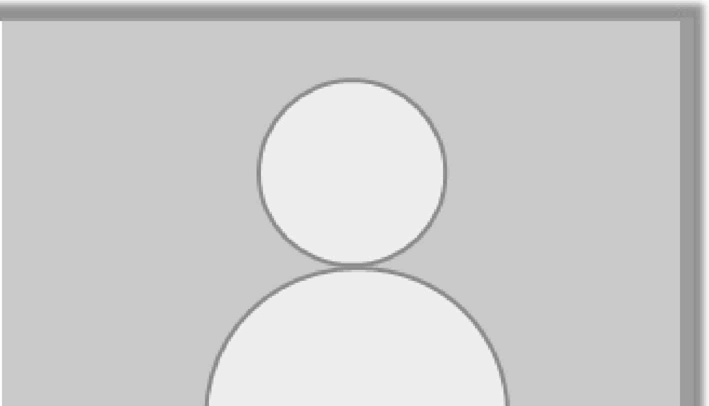
Equivalência dos dois enunciados da segunda lei



POSSÍVEL
por hipótese

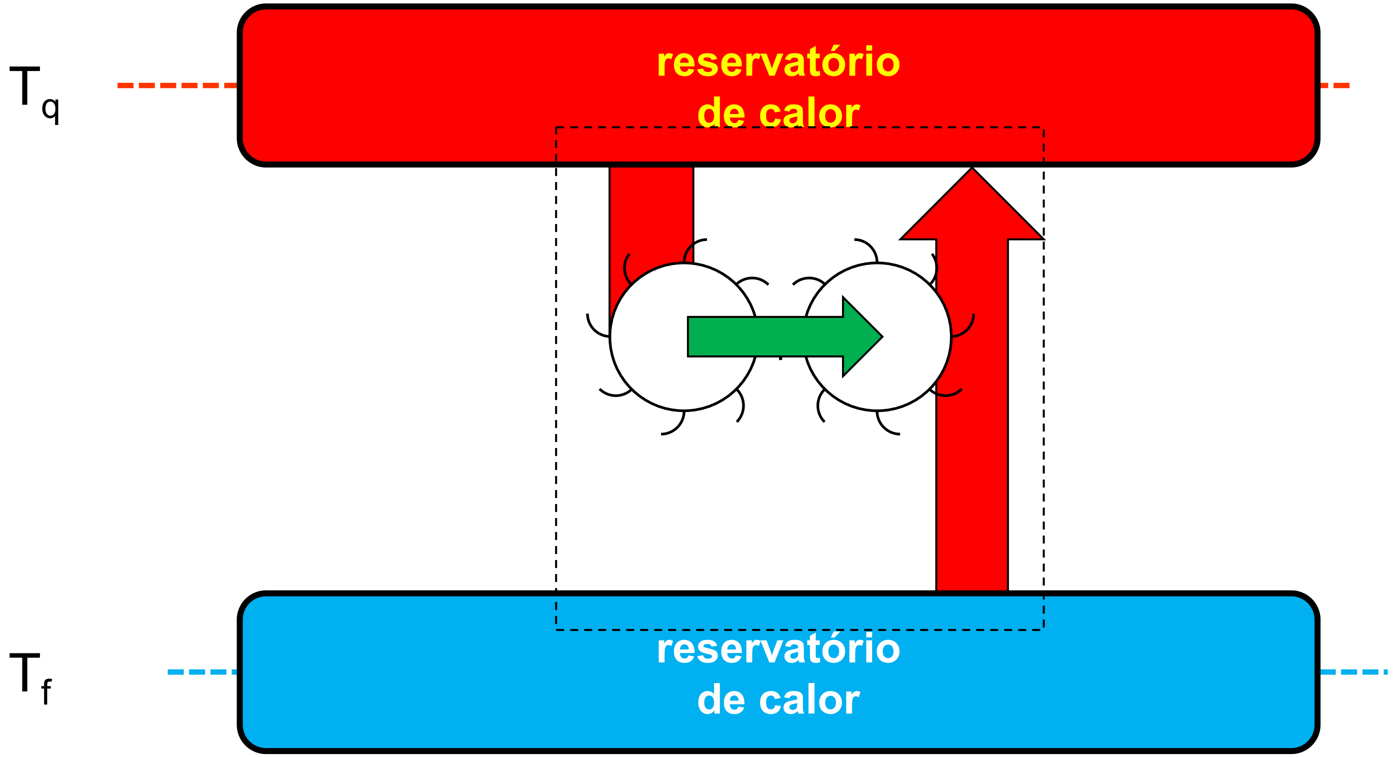
Equivalência dos dois enunciados da segunda lei



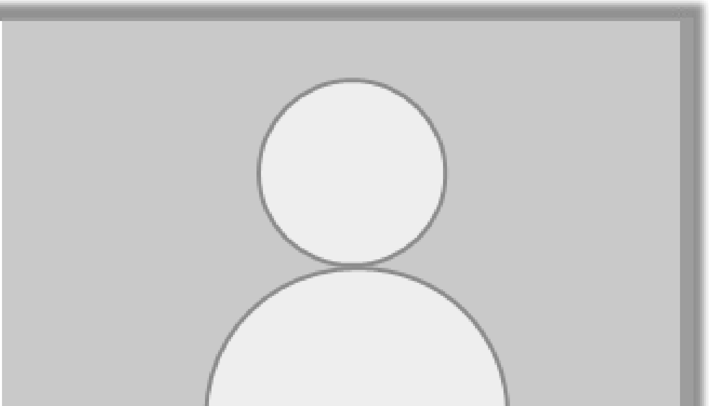


POSSÍVEL
por hipótese

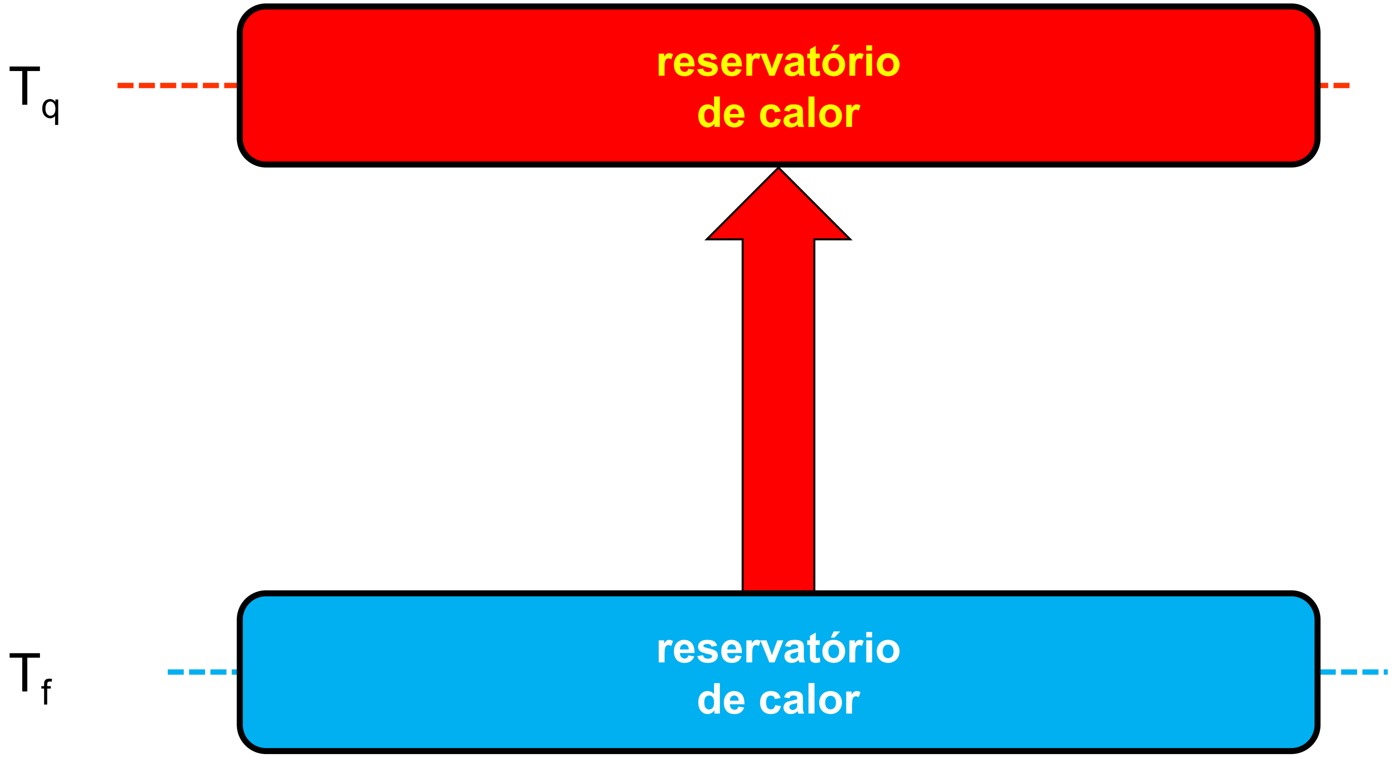
Equivalência dos dois enunciados da segunda lei



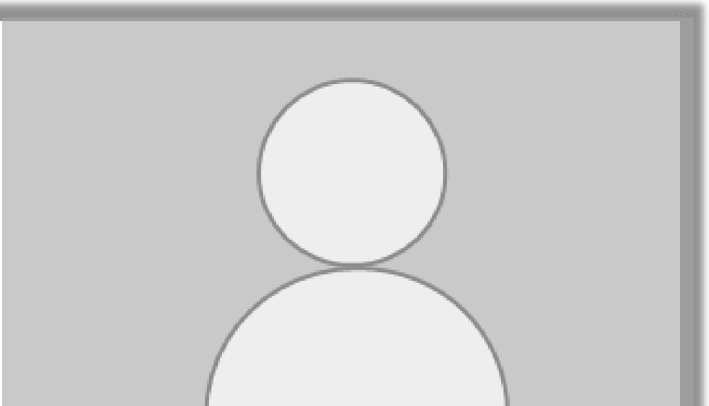
POSSÍVEL
por hipótese



Equivalência dos dois enunciados da segunda lei

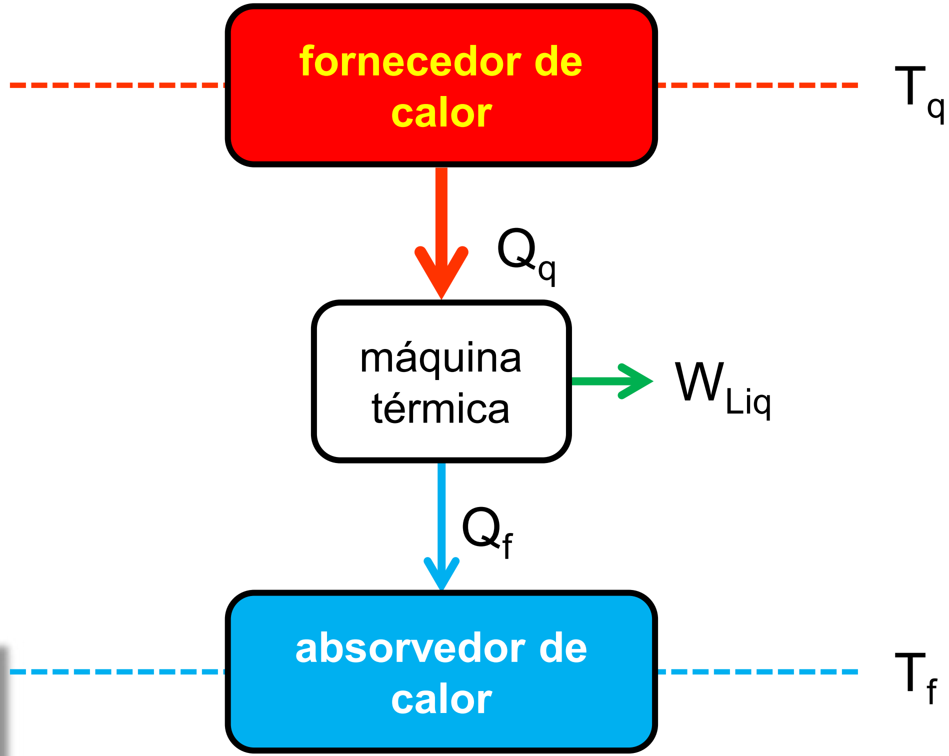


→ **POSSÍVEL**

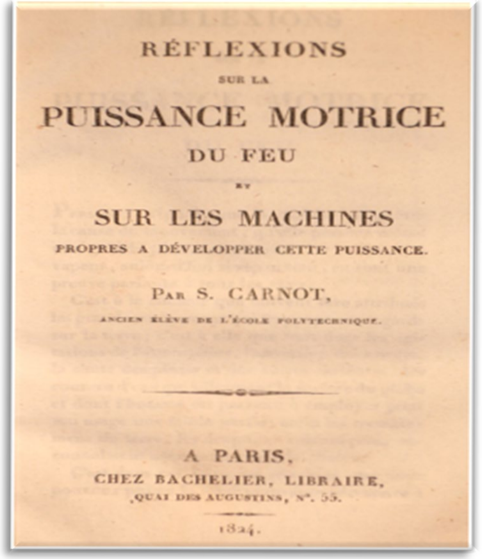


A MÁXIMA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO $Q \rightarrow W$...

Máxima eficiência de conversão



Nicolas Léonard Sadi Carnot
em 1824, aos vinte anos de idade



RÉFLEXIONS

SUR LA

PUISSANCE MOTRICE

DU FEU

ET

SUR LES MACHINES

PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.

PAR S. CARNOT,

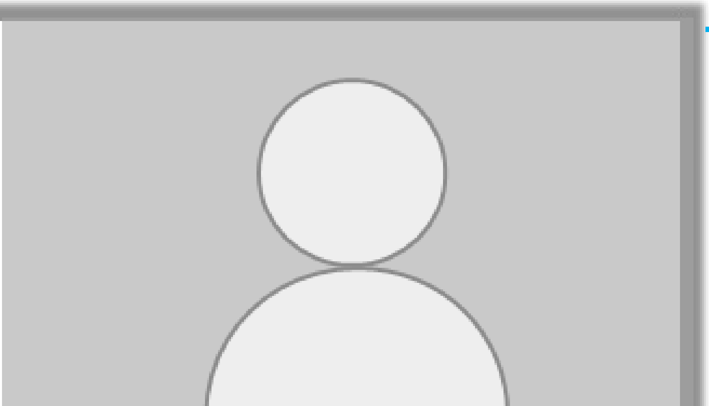
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

A PARIS,

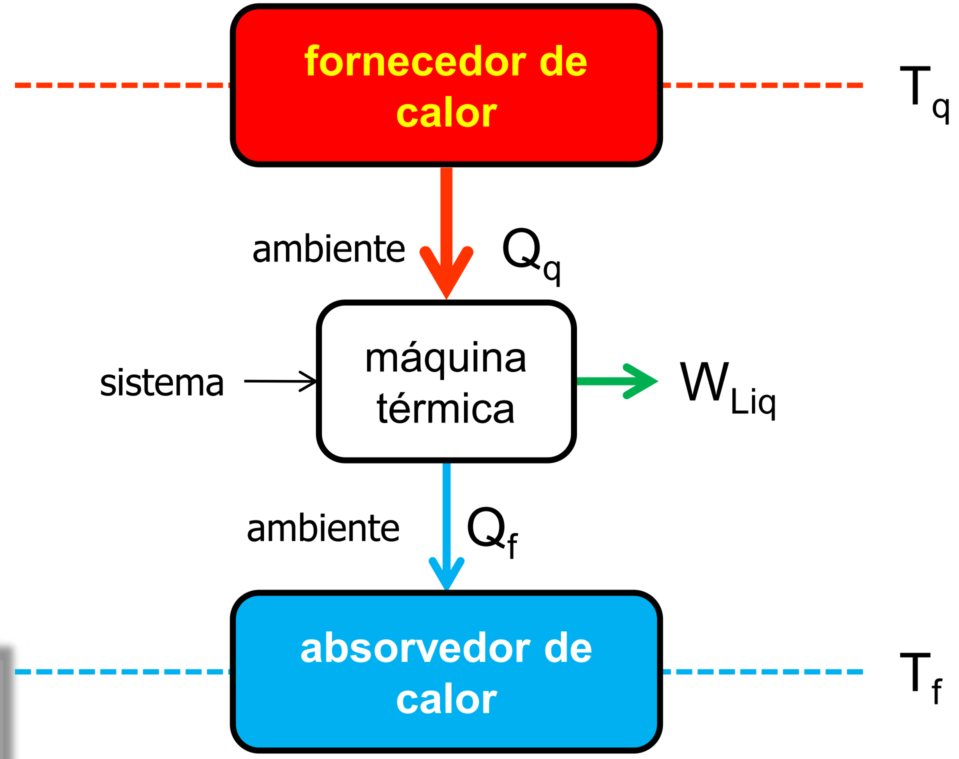
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.

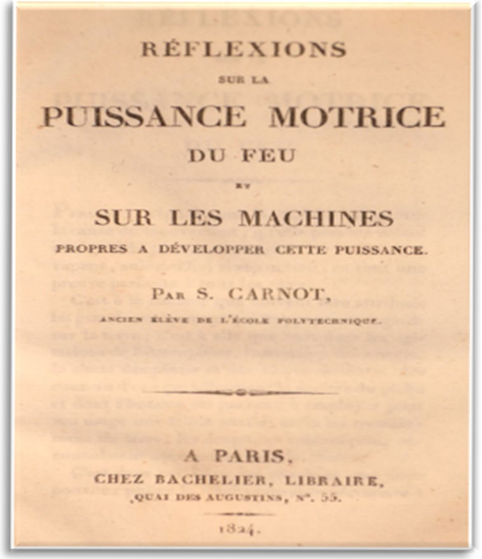
1824.



Máxima eficiência de conversão

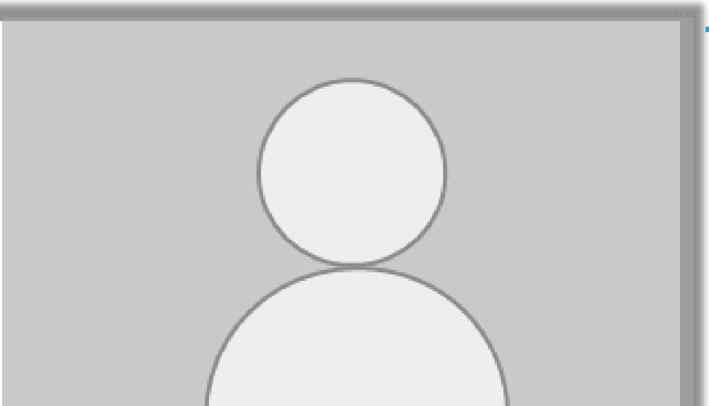


Nicolas Léonard Sadi Carnot
em 1824, aos vinte anos de idade

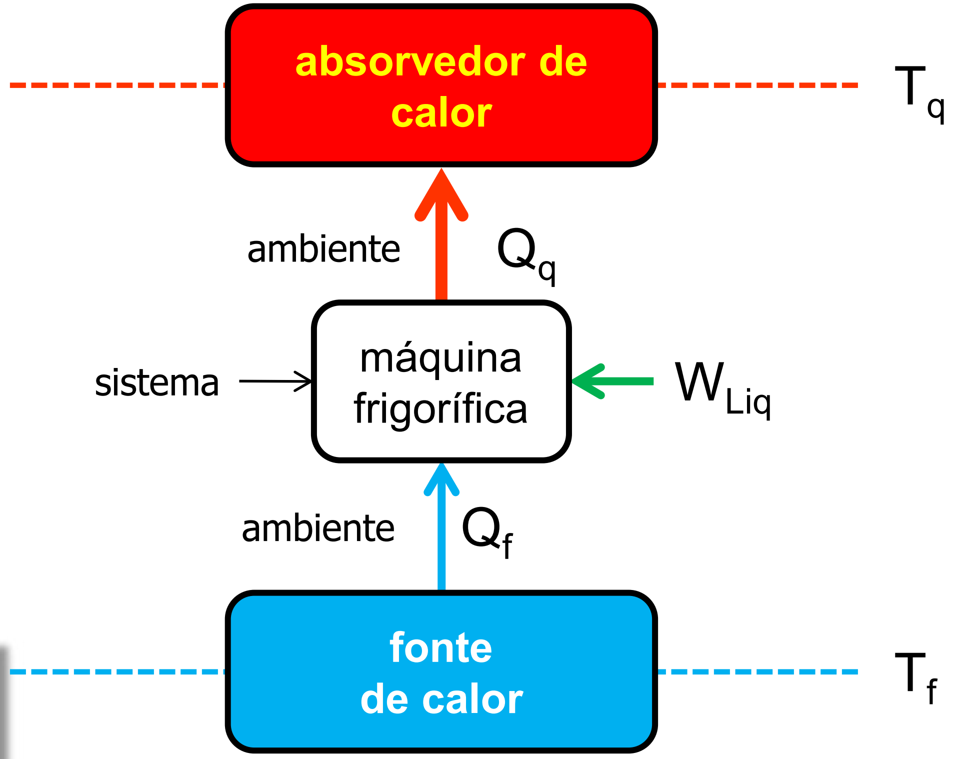


RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
PAR S. CARNOT,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

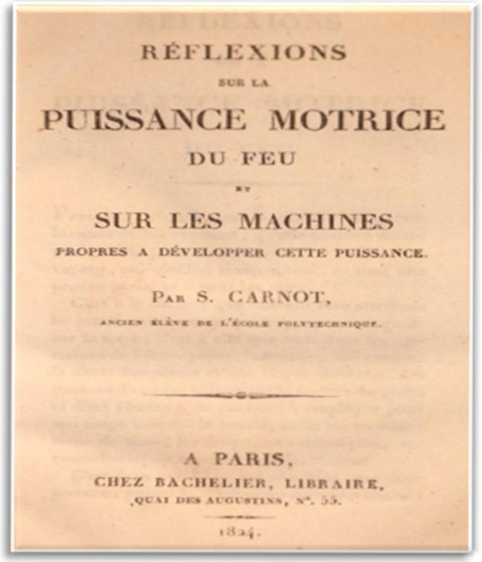
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.
1824.



Máxima eficiência de conversão

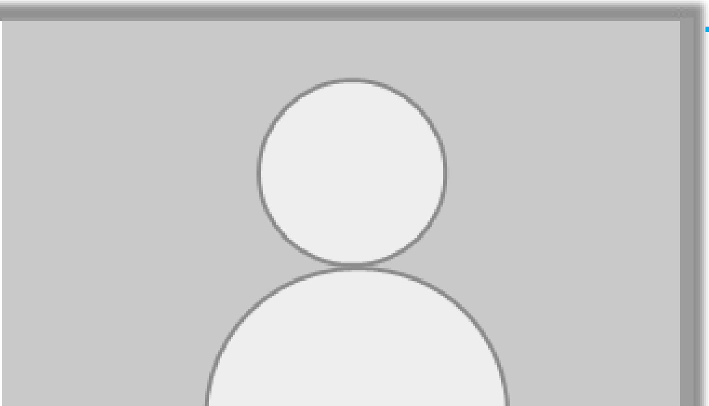


Nicolas Léonard Sadi Carnot
em 1824, aos vinte anos de idade



RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
PAR S. CARNOT,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

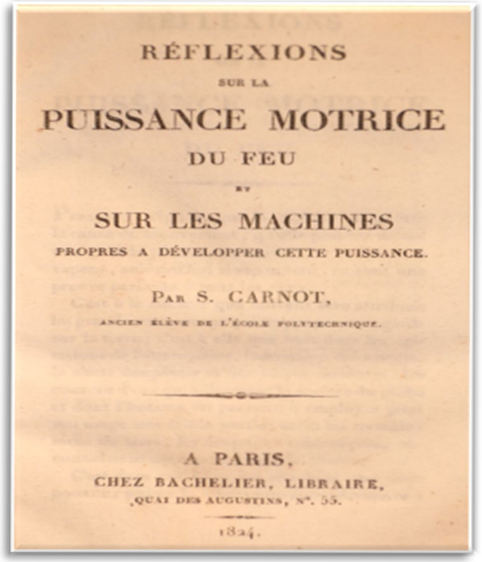
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.
1824.



Máxima eficiência de conversão

"Le moteur peut être actionné en sens inverse et le résultat net serait alors la consommation d'un travail égal à celui produit par le fonctionnement en sens direct et le transfert de la même quantité de chaleur, mais dans ce cas du corps froid au corps chaud...

Nicolas Léonard Sadi Carnot
em 1824, aos vinte anos de idade



RÉFLEXIONS

SUR LA

PUISSANCE MOTRICE

DU FEU

ET

SUR LES MACHINES

PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.

PAR S. CARNOT,

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

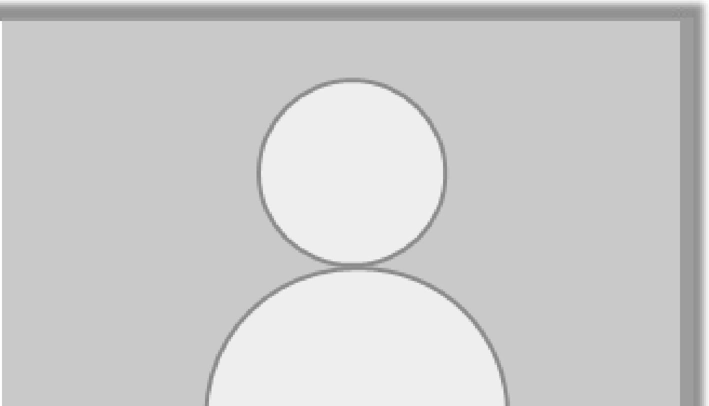
A PARIS,

CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,

QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.

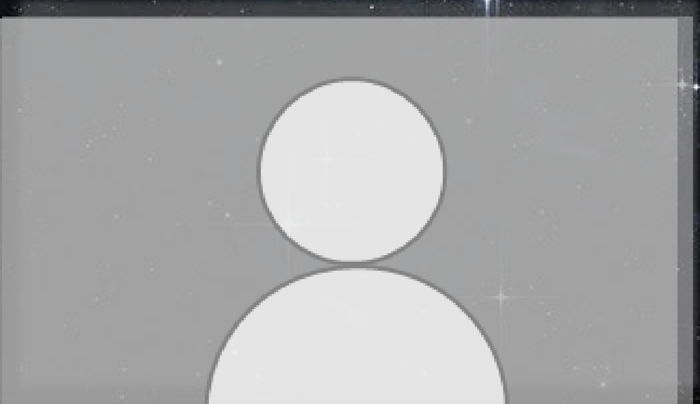
1824.

Máxima Eficiência: ocorre quando a máquina térmica é reversível !!!

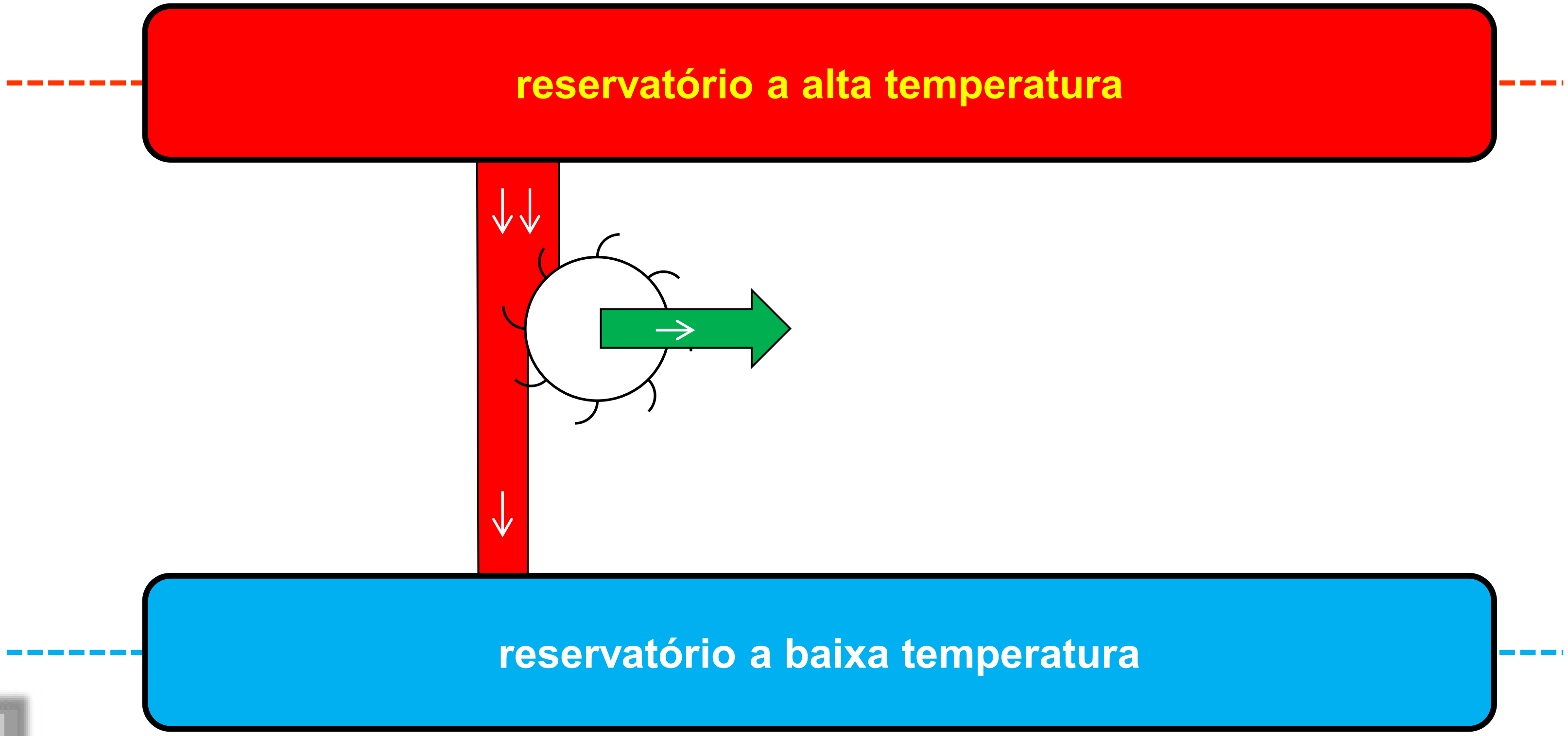


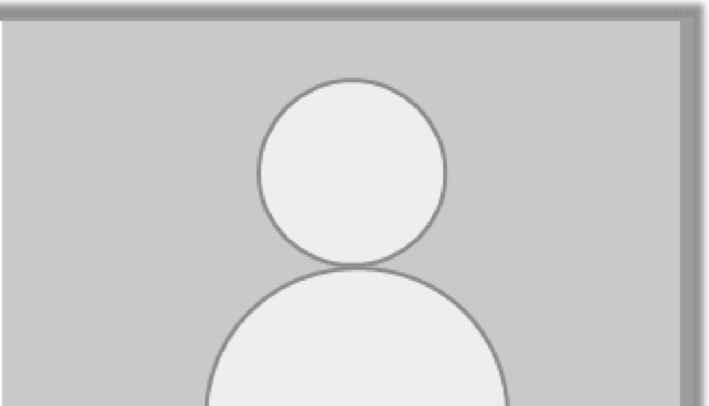
Reversibilidade estrita: ocorre quando a troca de calor e a realização de trabalho entre o **sistema e o ambiente** for nulo para o processo combinado (original e inverso), o que sabemos ser IMPOSSÍVEL !

O QUE SIGNIFICA REVERSIBILIDADE ESTRITA ?

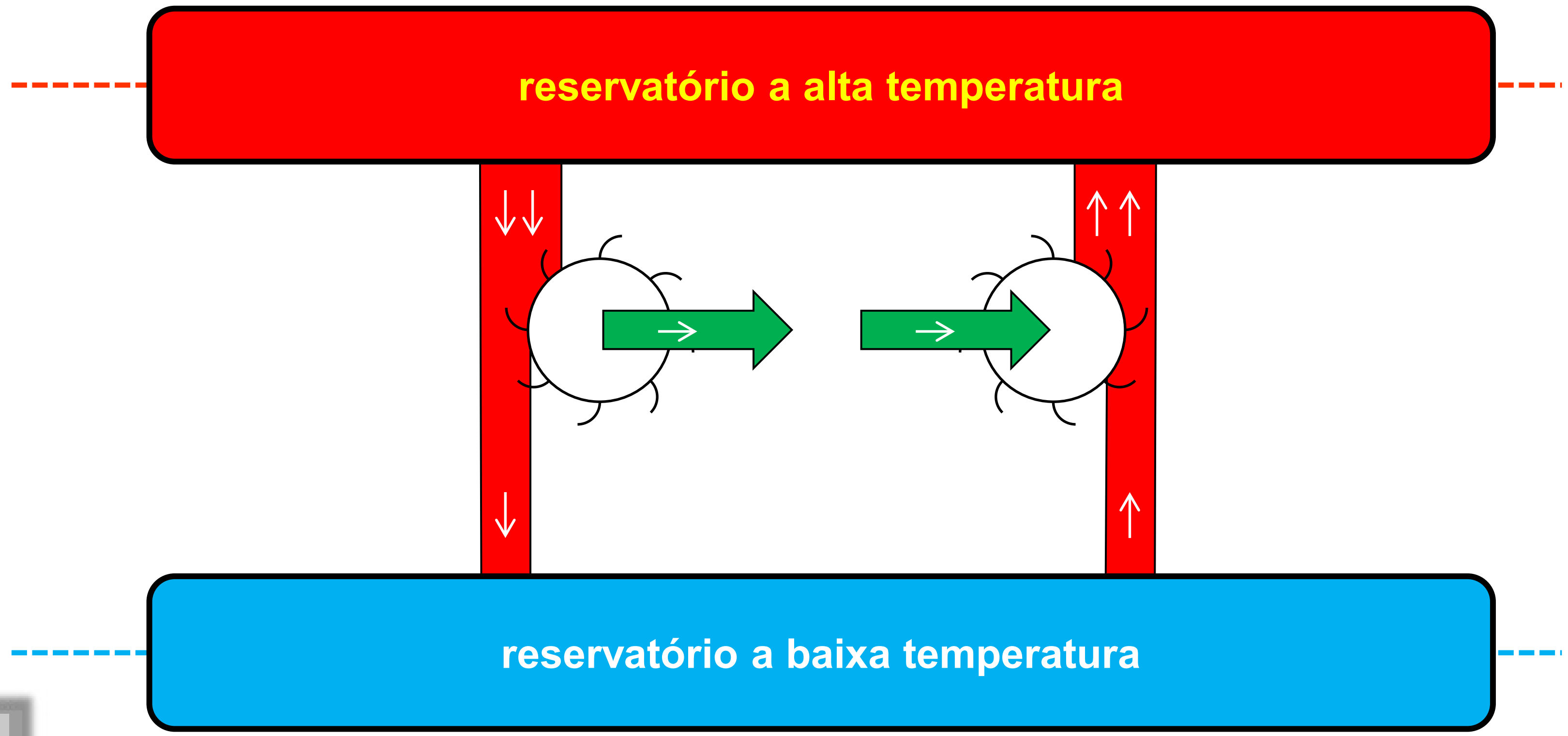


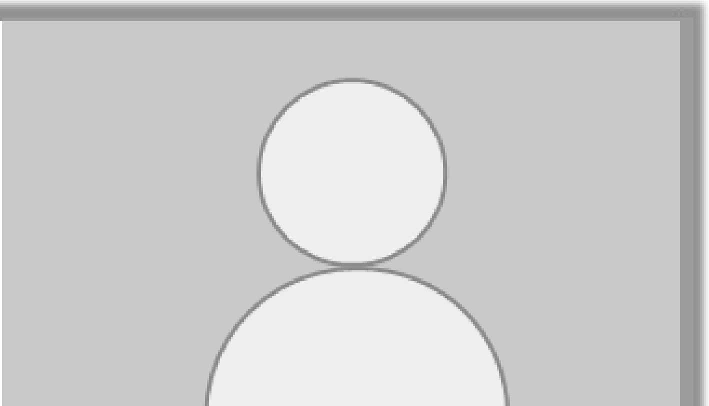
O conceito de reversibilidade estrita...



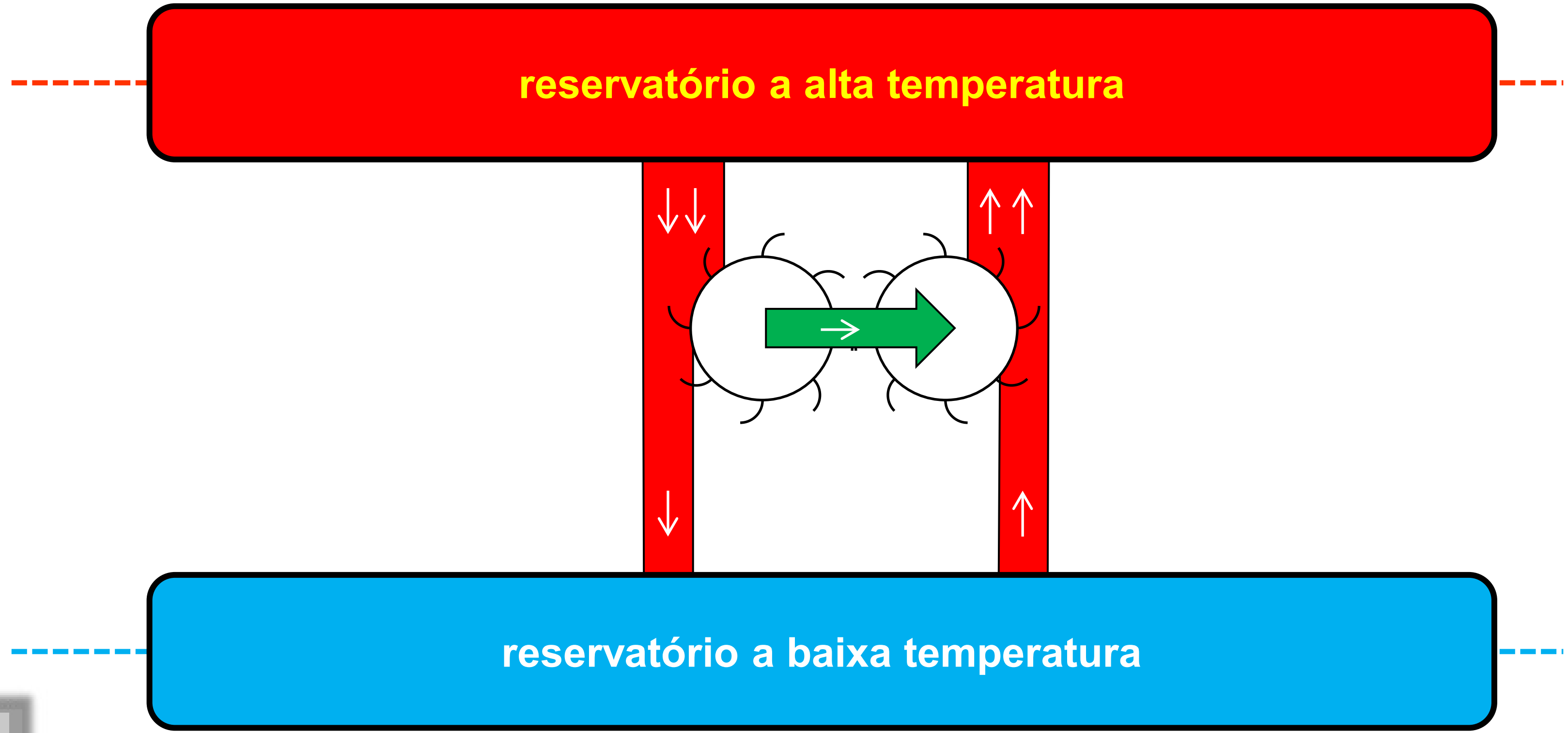


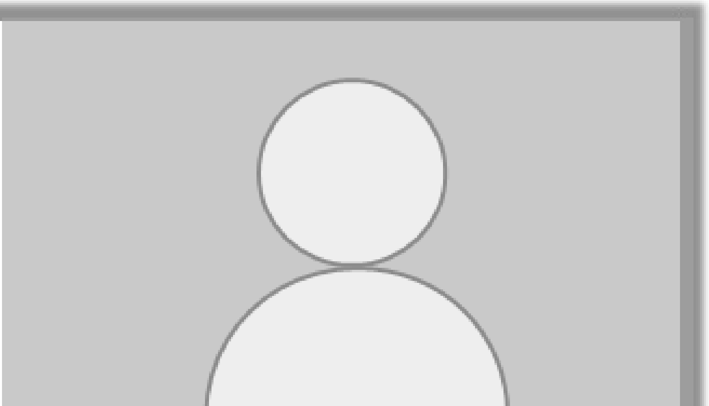
O conceito de reversibilidade estrita...



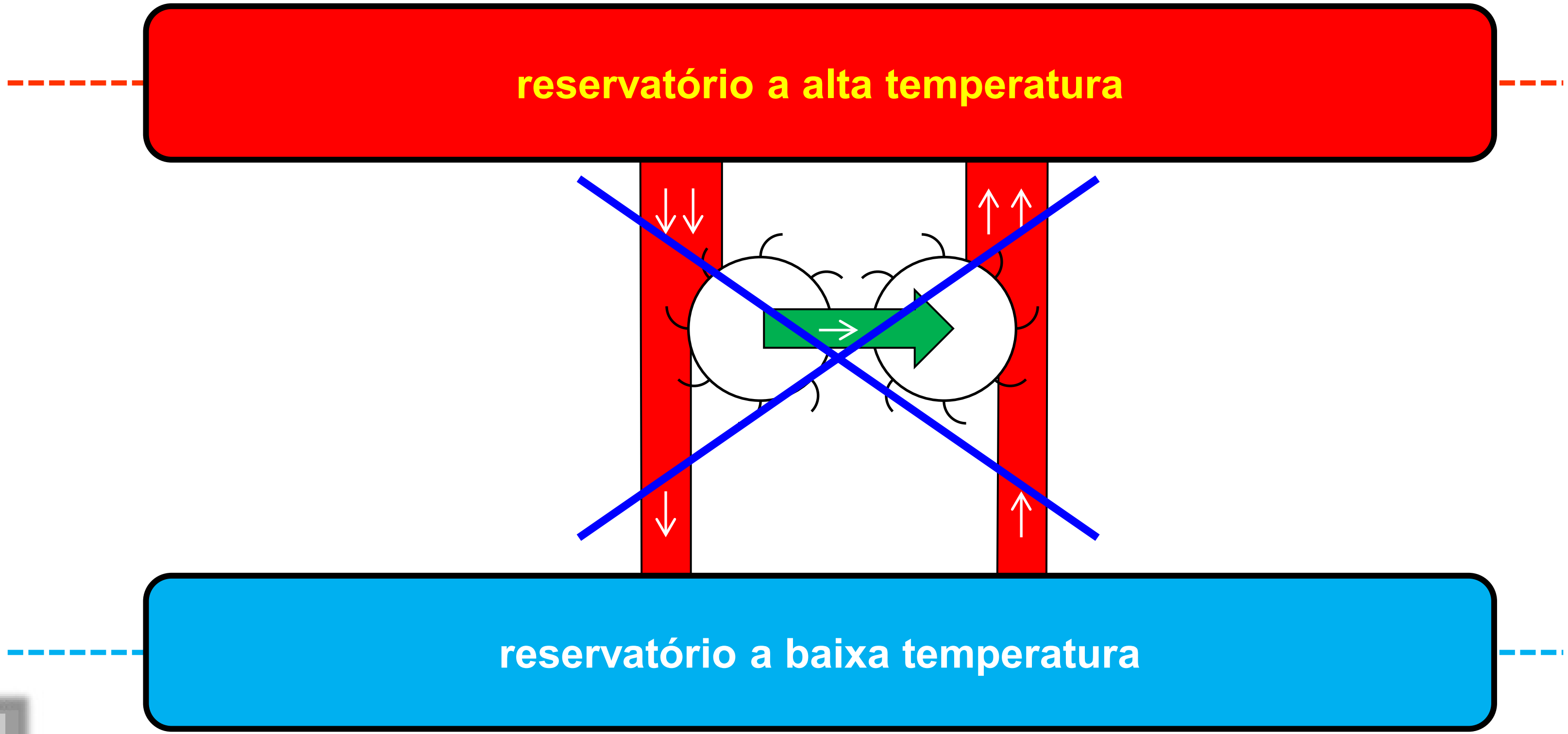


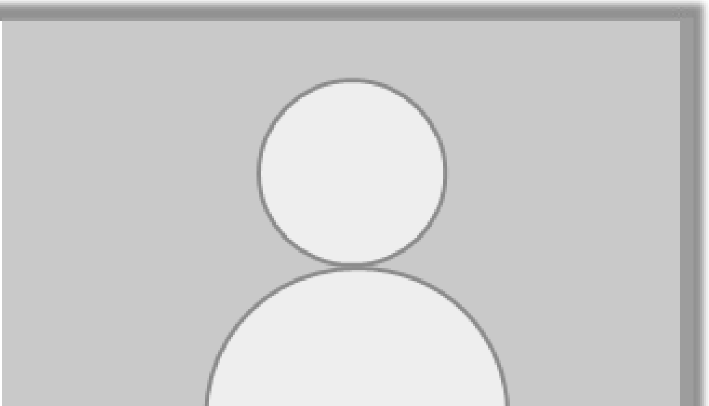
O conceito de reversibilidade estrita...





O conceito de reversibilidade estrita...

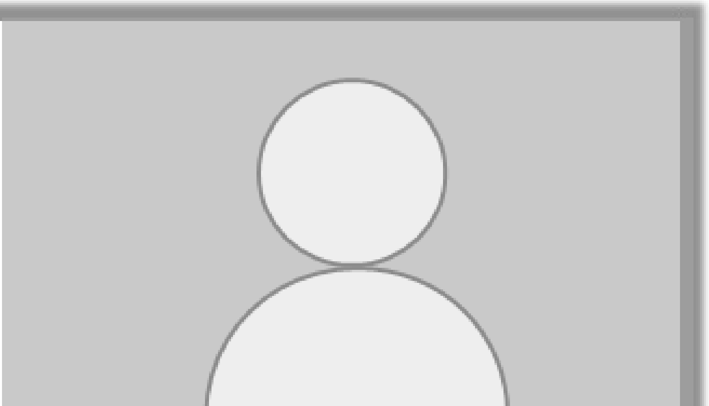




O conceito de reversibilidade estrita...

reservatório a alta temperatura

reservatório a baixa temperatura

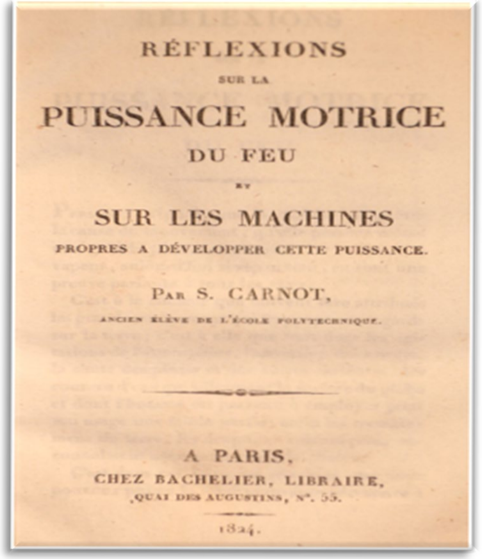


Máxima eficiência de conversão

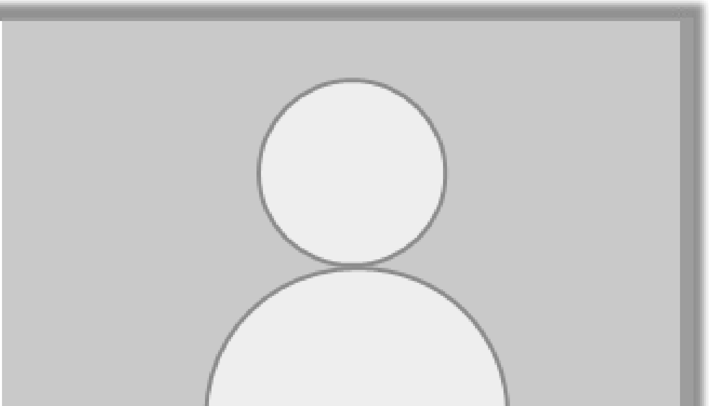
- $\eta < 1$ para $\Delta T < \infty$
- $\eta_{rev} > \eta_{irrev}$
- $\eta_{rev,m} = \eta_{rev,n} \ \forall \ m,n$
- $\eta_{rev} = f(T_f \, , \, T_q \,)$

É a diferença de temperaturas entre os reservatórios quente e frio influi na eficiência, e não a diferença de pressão como se pensava...

Nicolas Léonard Sadi Carnot
em 1824, aos vinte anos de idade



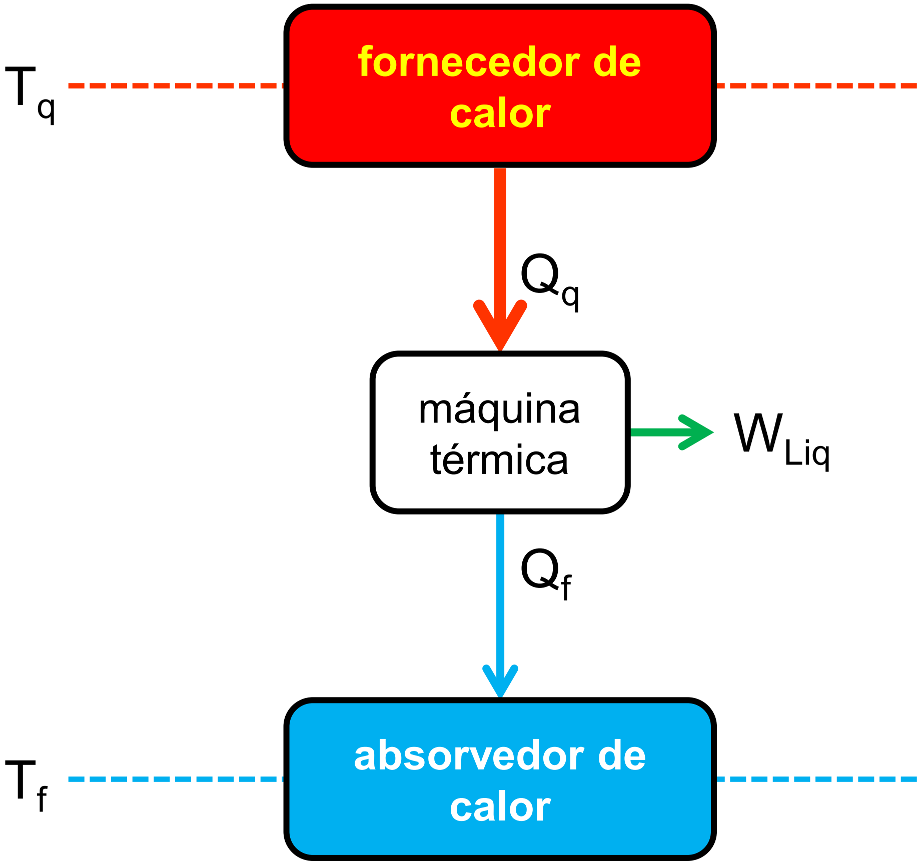
RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES
PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE.
PAR S. CARNOT,
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.
A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N°. 55.
1824.



A ESCALA TERMODINÂMICA DE TEMPERATURA

A escala termodinâmica de temperatura

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$



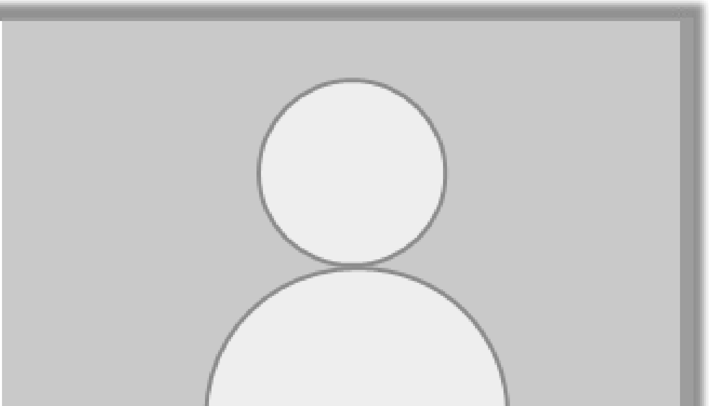
primeira lei

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q} = \frac{Q_q - Q_f}{Q_q}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q}$$

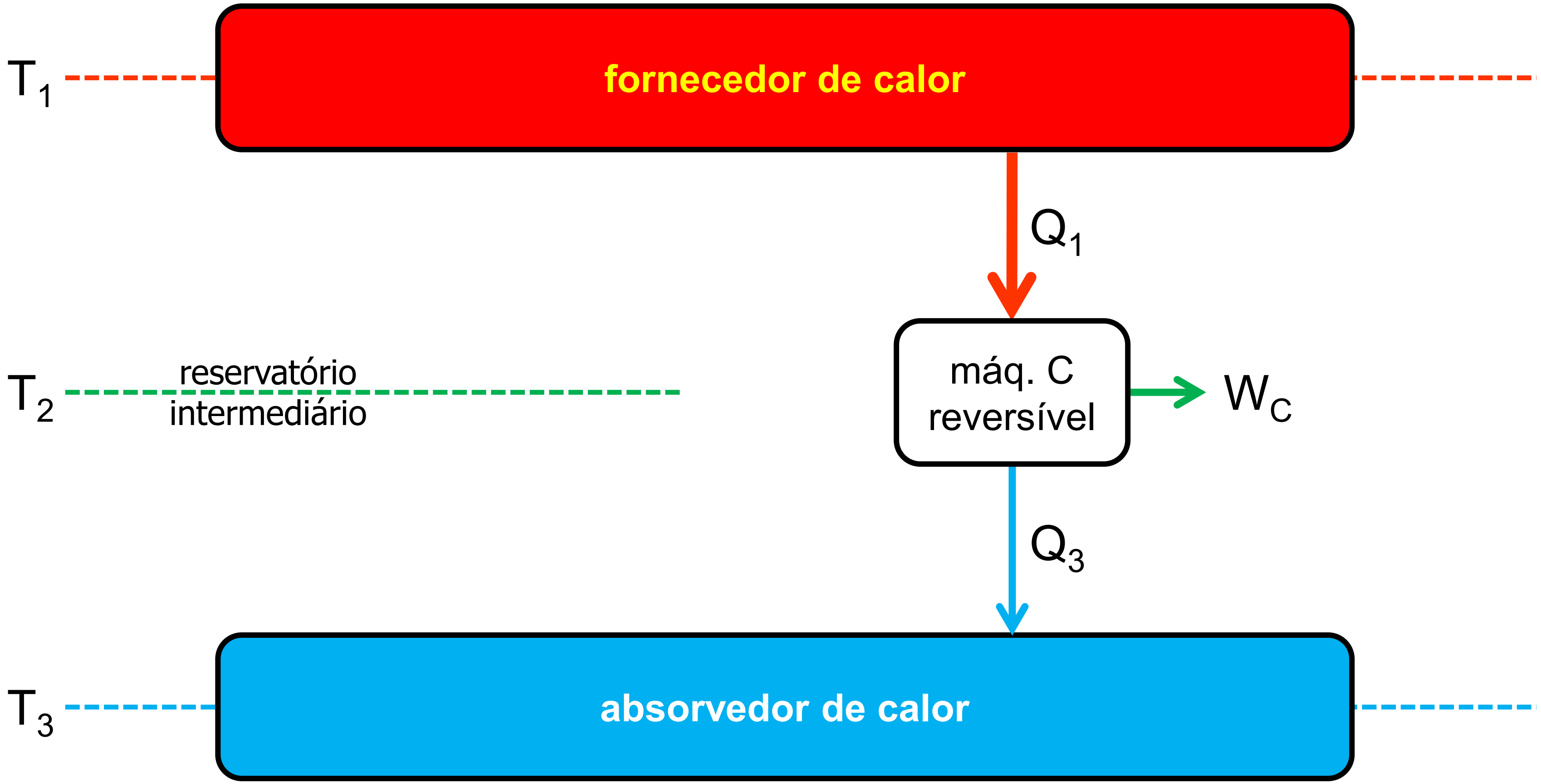
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \overset{C}{=} f(T_f, T_q)$$

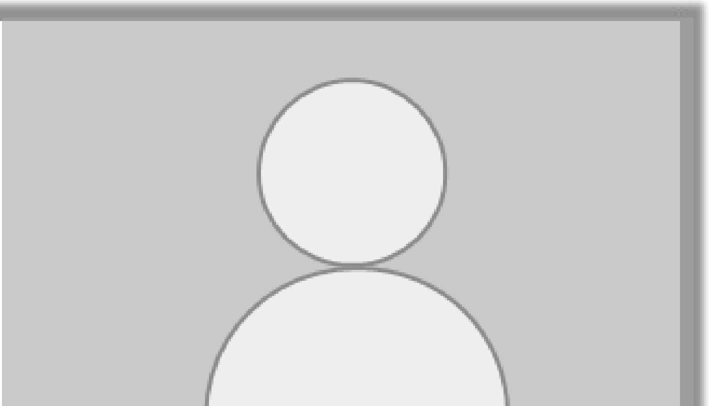
postulado de Carnot



A escala termodinâmica de temperatura

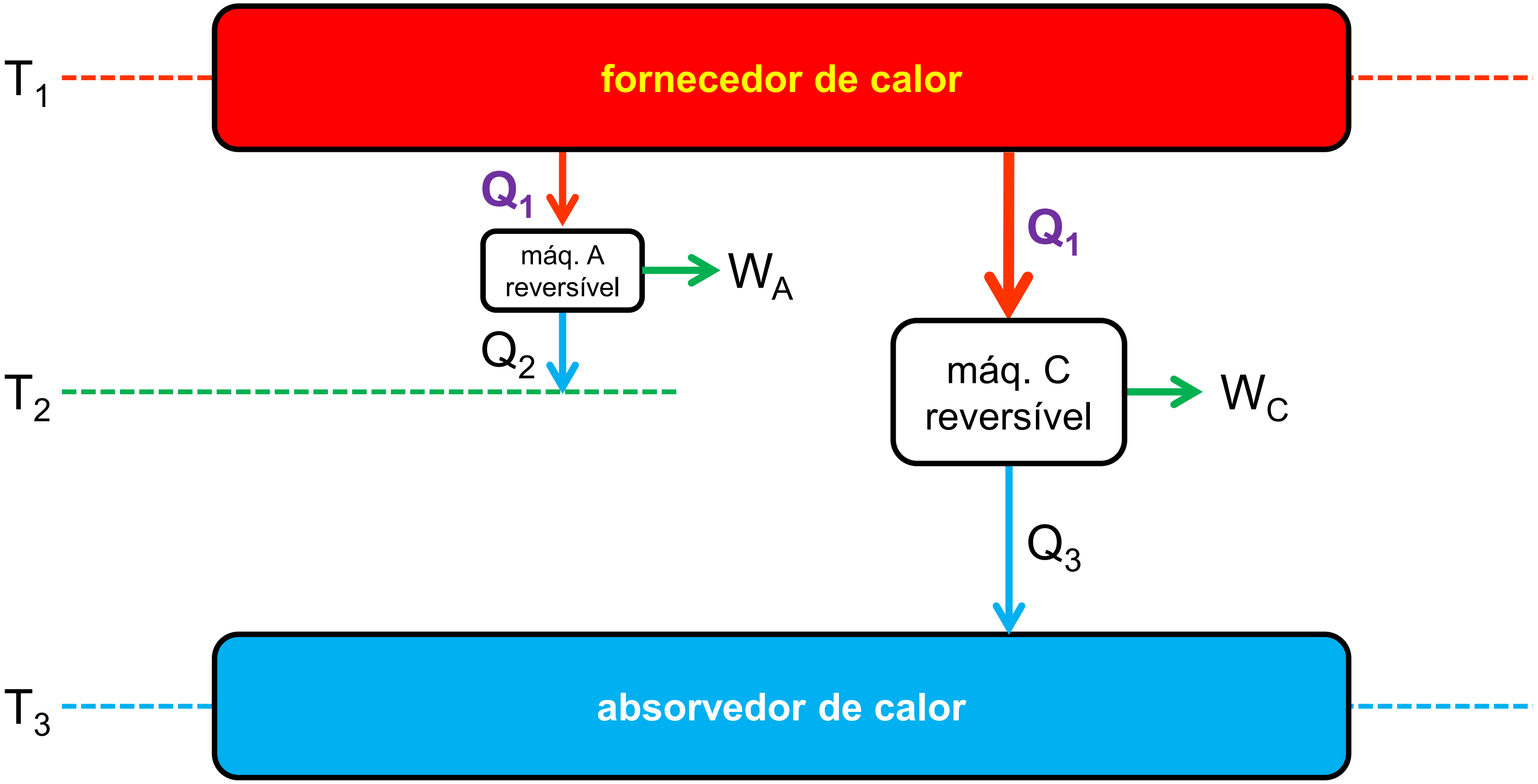
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

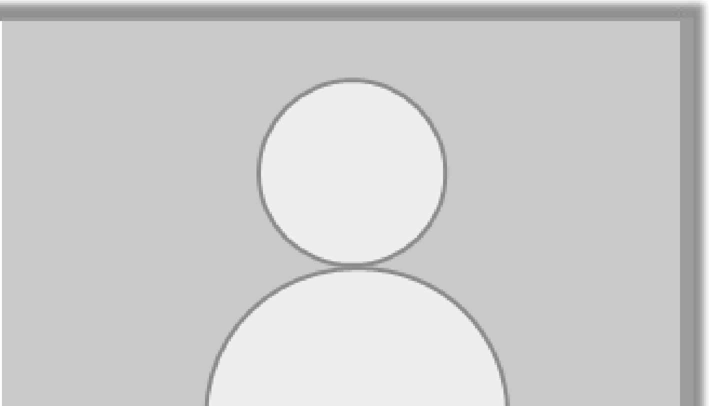




A escala termodinâmica de temperatura

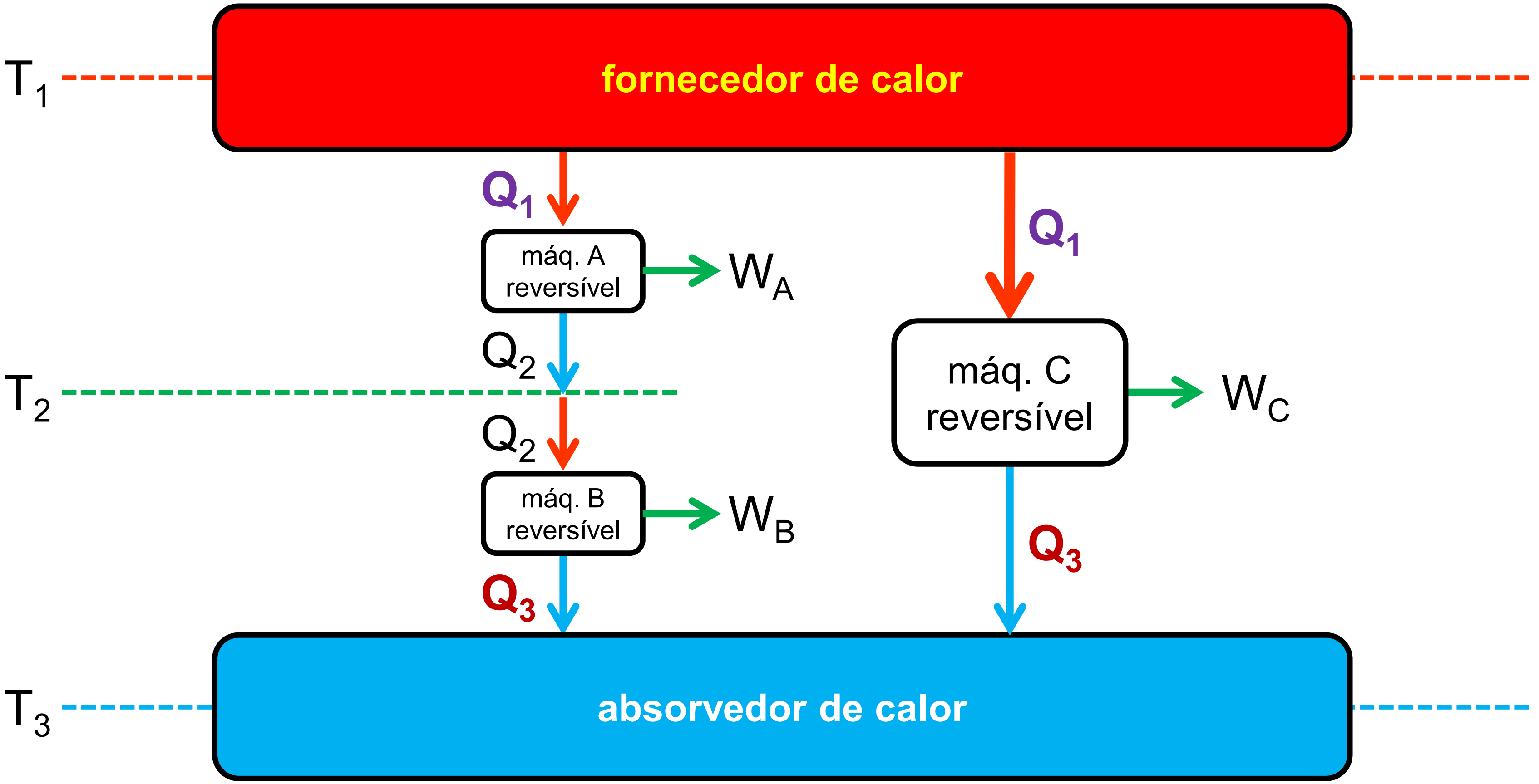
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

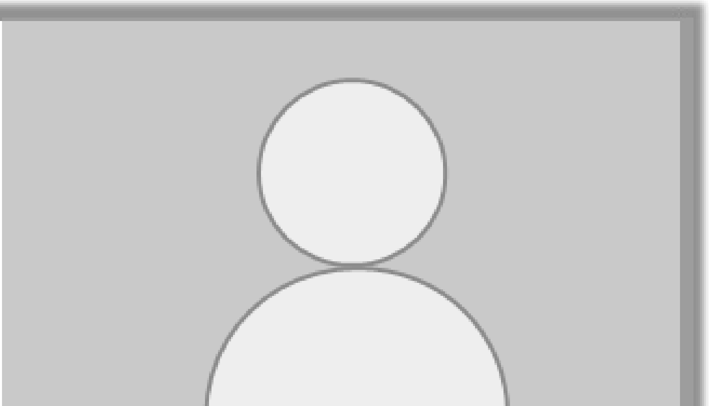




A escala termodinâmica de temperatura

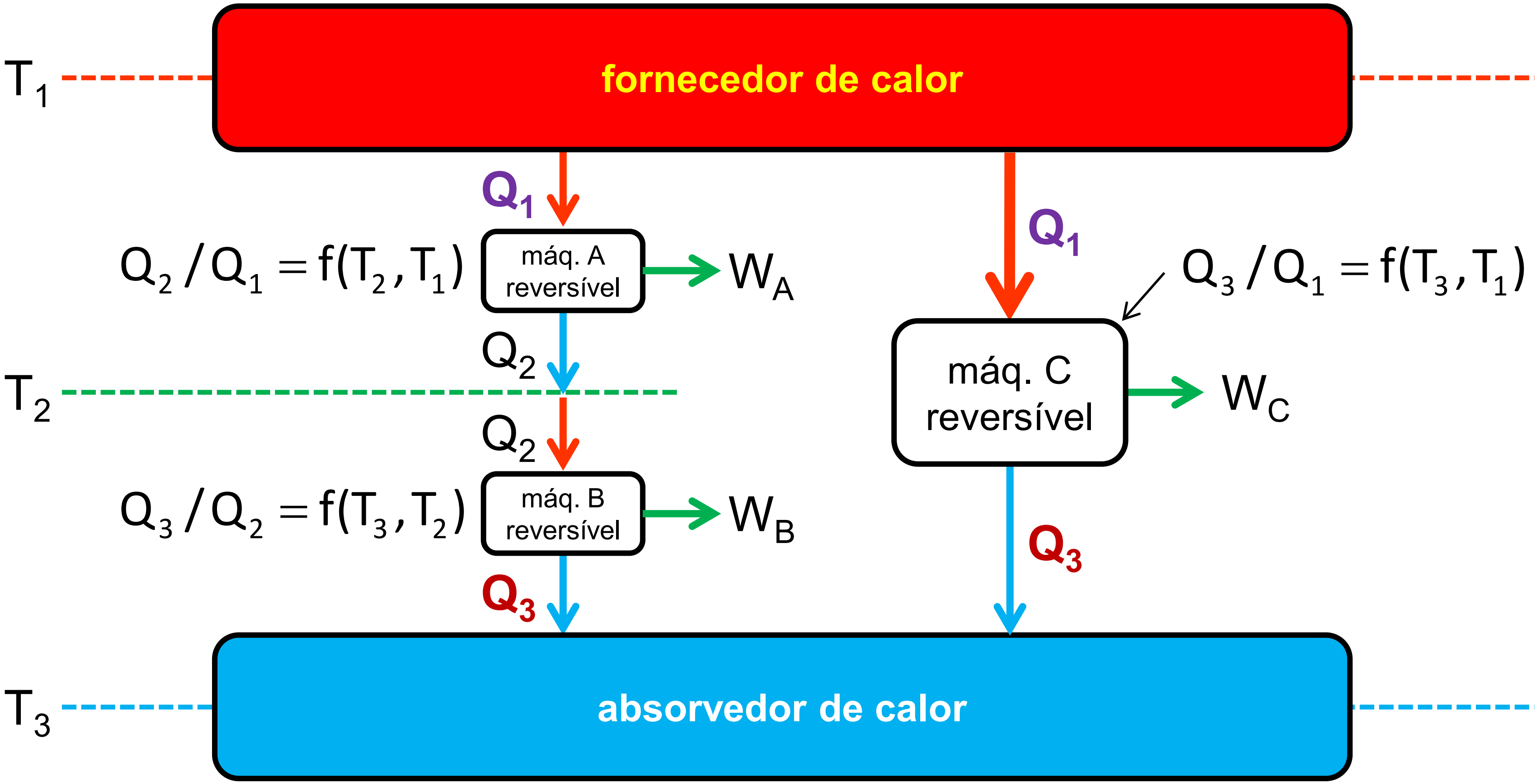
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

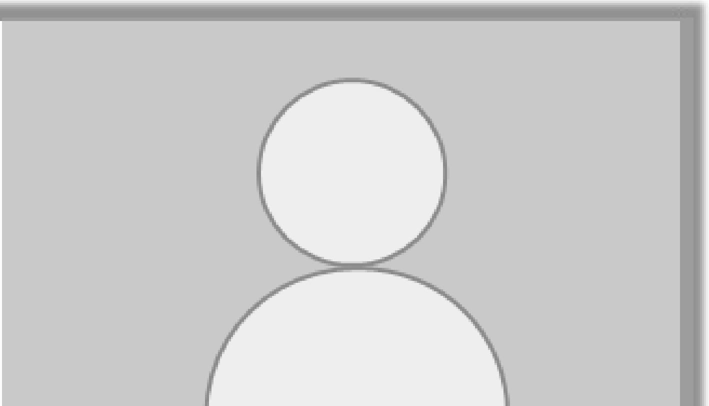




A escala termodinâmica de temperatura

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$





A escala termodinâmica de temperatura

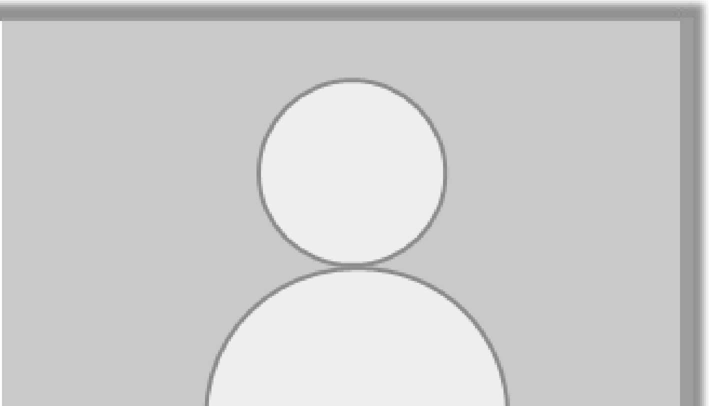
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

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

$$Q_3 / Q_1 = f(T_3, T_1)$$
$$Q_2 / Q_1 = f(T_2, T_1)$$
$$Q_3 / Q_2 = f(T_3, T_2)$$

$$f(T_3, T_1) = \underbrace{f(T_3, T_2) \cdot f(T_2, T_1)}$$

não pode depender de T_2 pq arbitrária



A escala termodinâmica de temperatura

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

$$f(T_3, T_1) = f(T_3, T_2) \cdot f(T_2, T_1)$$

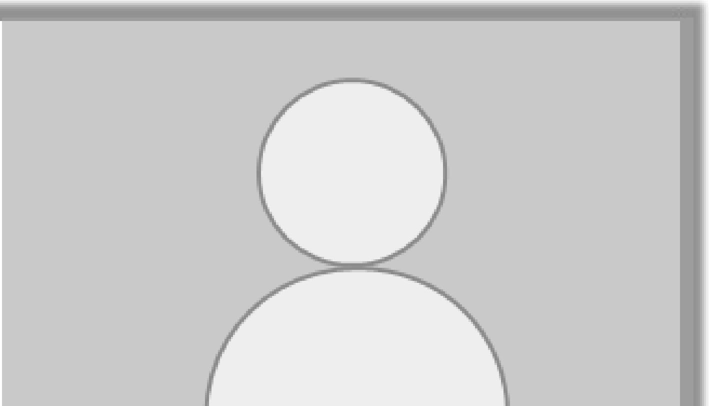
independe de T_2

só pode ser satisfeito se

$$f(T_x, T_y) = \frac{\phi(T_x)}{\phi(T_y)}$$

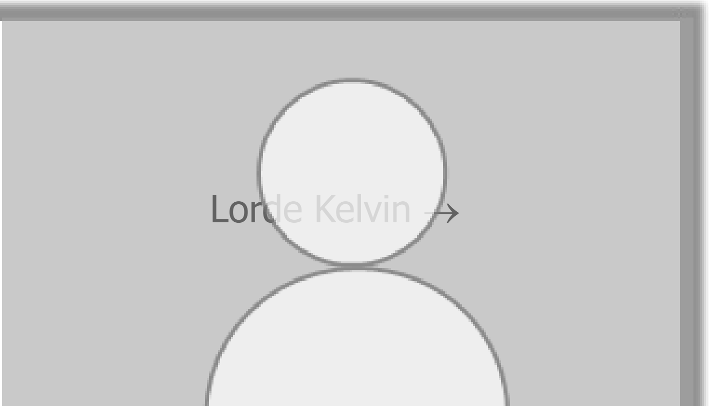
$$f(T_3, T_1) = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_1)} \qquad f(T_3, T_2) = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_2)} \qquad f(T_2, T_1) = \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_1)}$$

$$\frac{Q_3}{Q_1} = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_1)} \qquad \frac{Q_3}{Q_2} = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_2)} \qquad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_1)}$$



A escala termodinâmica de temperatura

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = f(T_f, T_q)$$

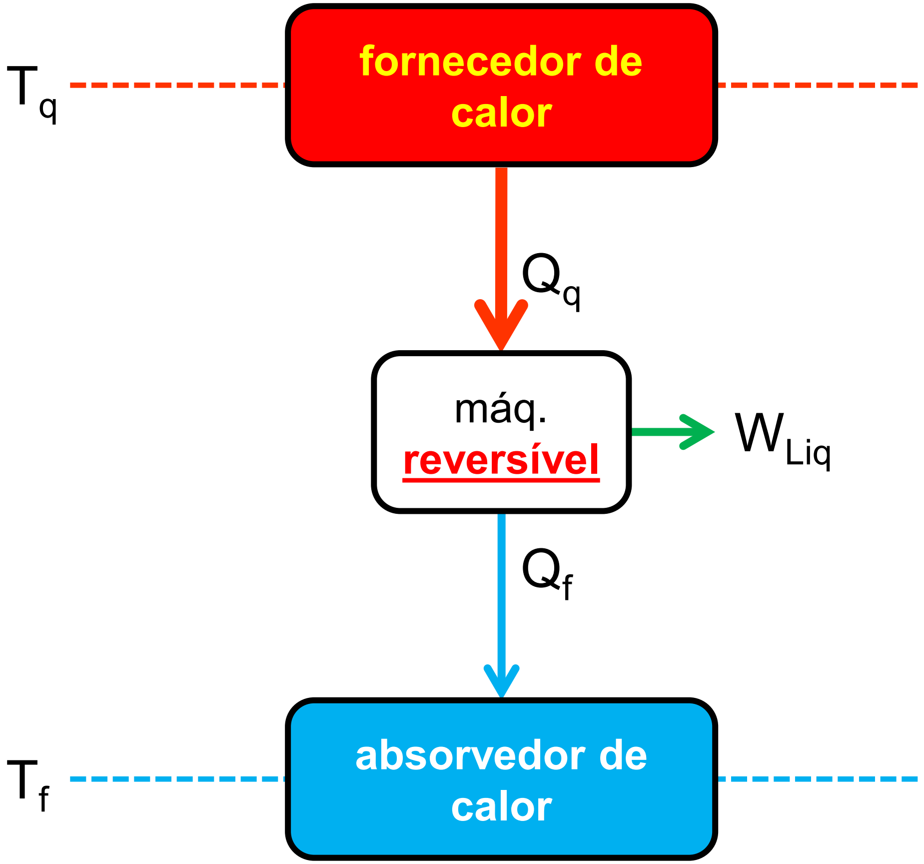


$$\left.\frac{Q_f}{Q_q}\right|_{rev} = \frac{\phi(T_f)}{\phi(T_q)}$$

$$\phi(T) \overset{def}{=} T$$

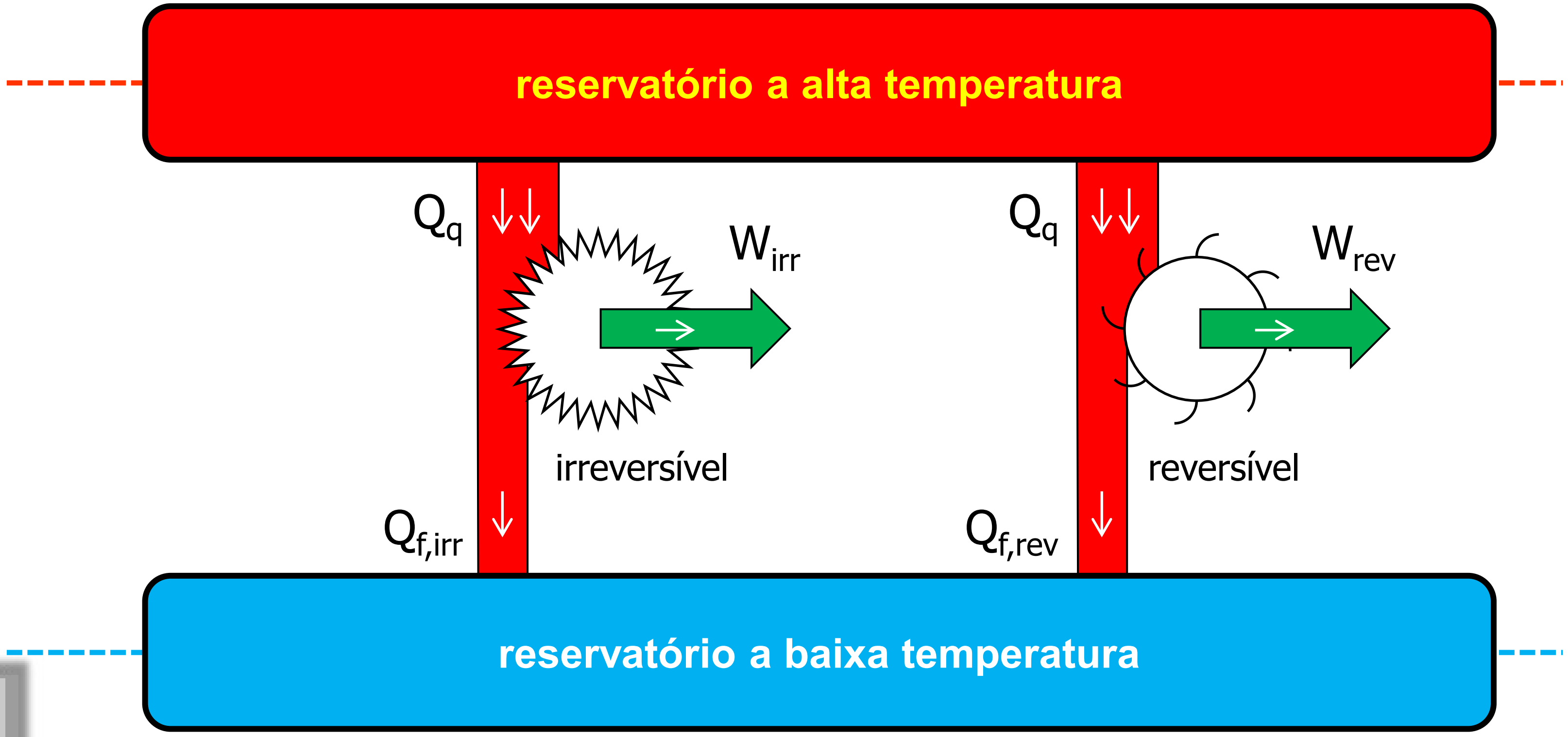
$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

escala absoluta de temperatura (→ T_q)

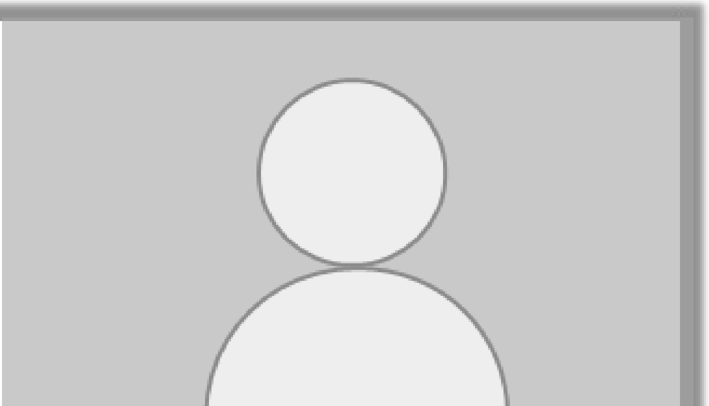


A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei da termodinâmica

Máxima eficiência de conversão: $\eta_{rev} > \eta_{irrev}$



$$\eta_{irr} = \frac{W_{irr}}{Q_q} = 1 - \frac{Q_{f,irr}}{Q_q} \qquad \eta_{rev} = \frac{W_{rev}}{Q_q} = 1 - \frac{Q_{f,rev}}{Q_q}$$

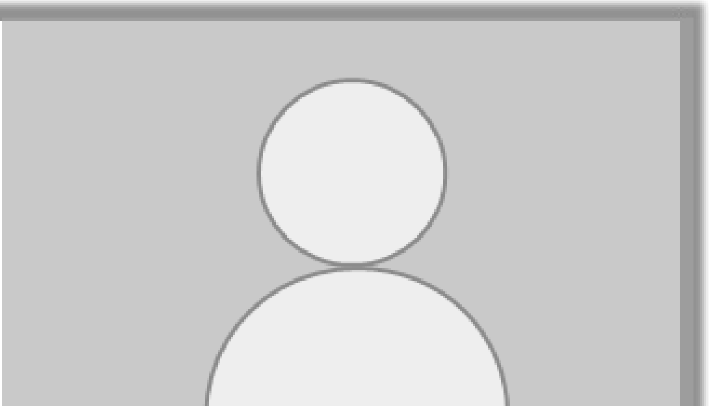


$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev}$$

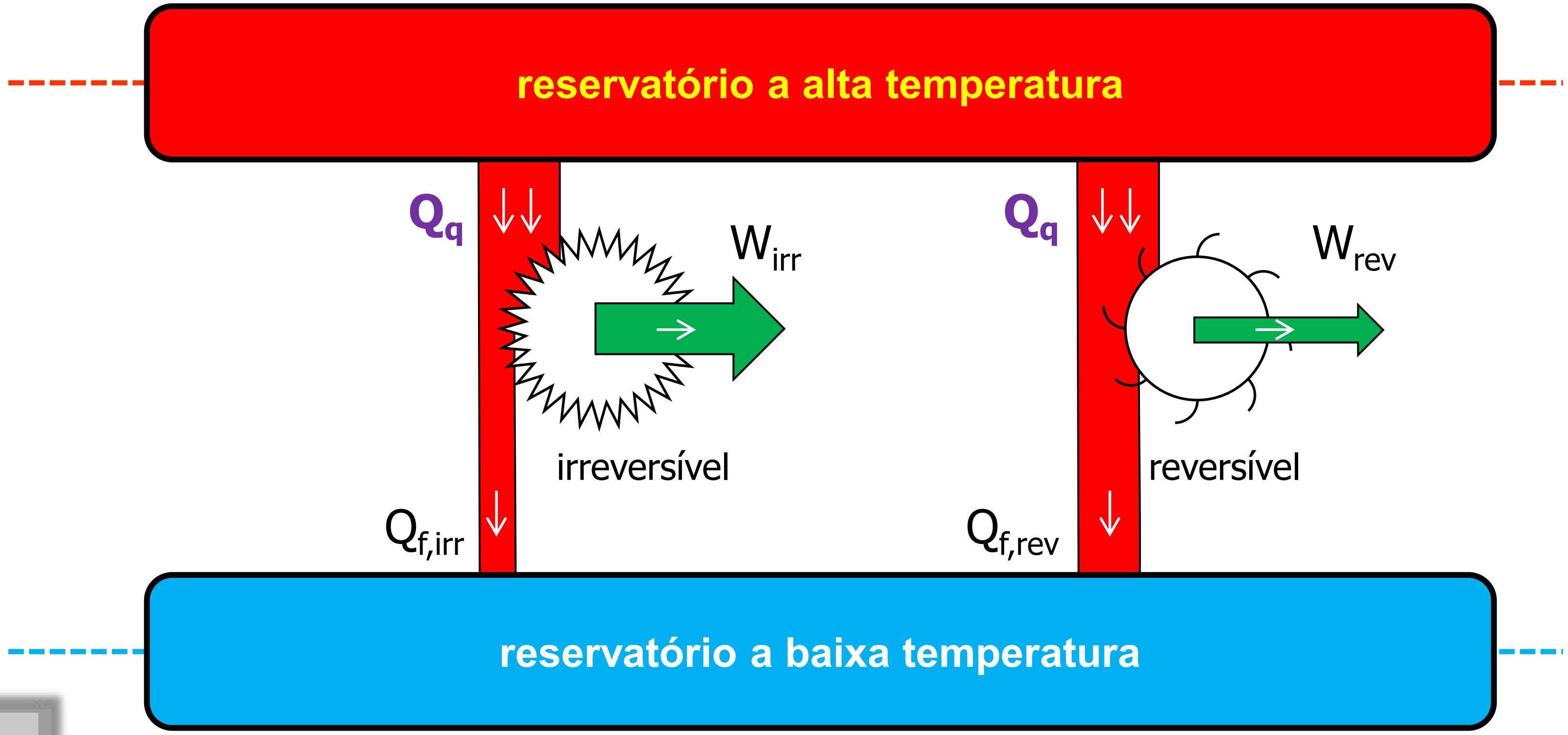
$$\eta_{irr} = \frac{W_{irr}}{Q_q} = 1 - \frac{Q_{f,irr}}{Q_q} > \eta_{rev} = \frac{W_{rev}}{Q_q} = 1 - \frac{Q_{f,rev}}{Q_q}$$

$$W_{irr} > W_{rev}$$

$$Q_{f,irr} < Q_{f,rev}$$

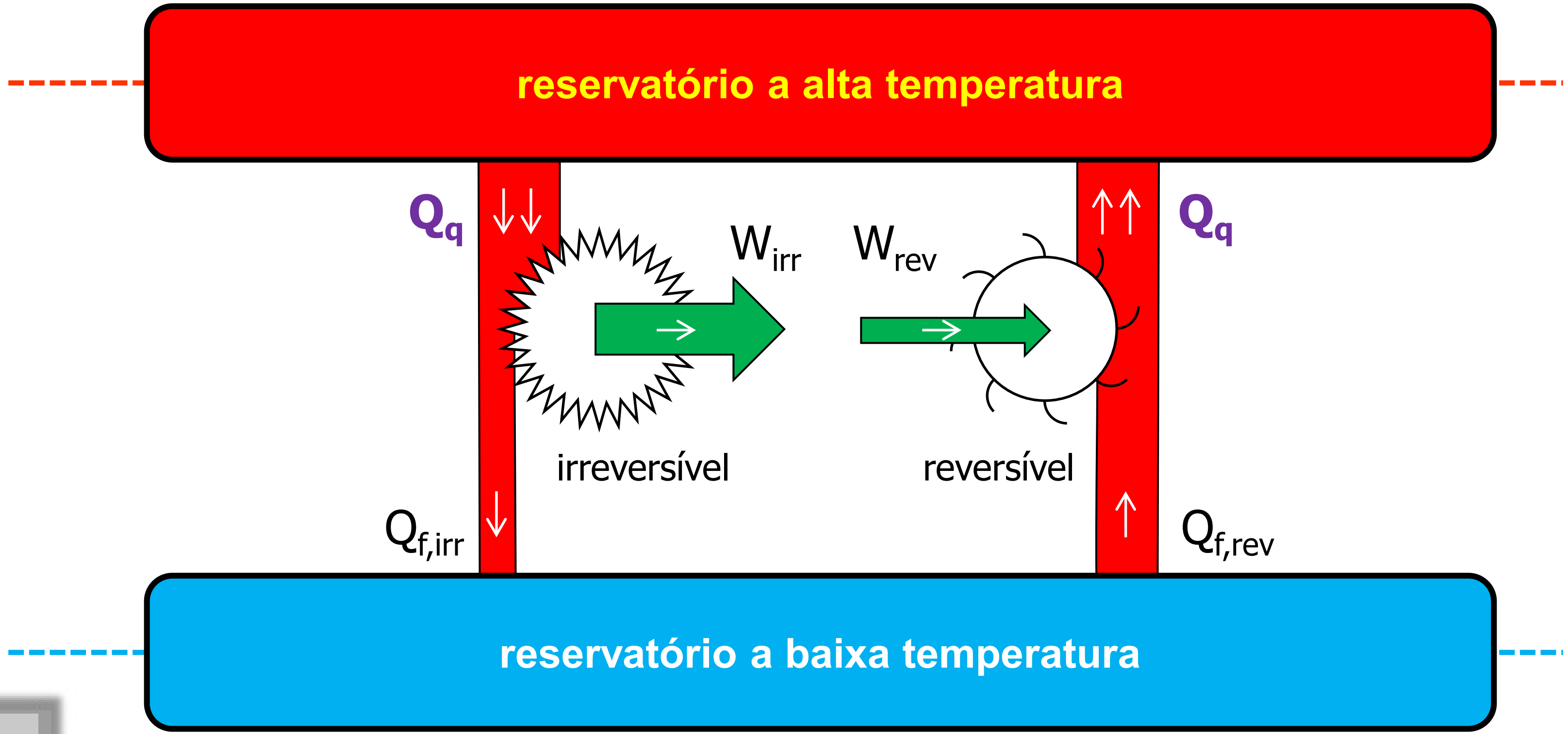


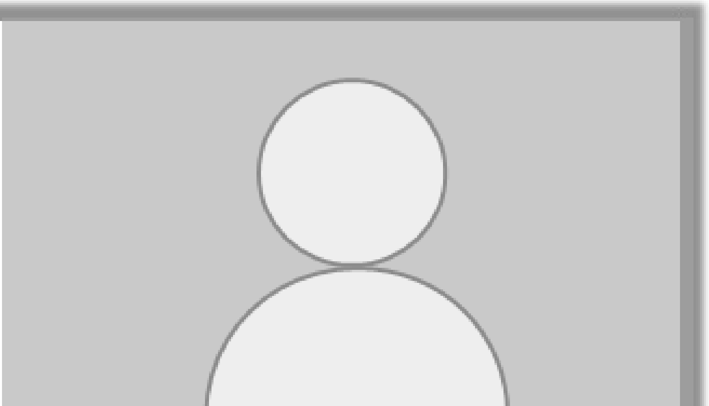
$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$



Colocando o calor e o trabalho em escala

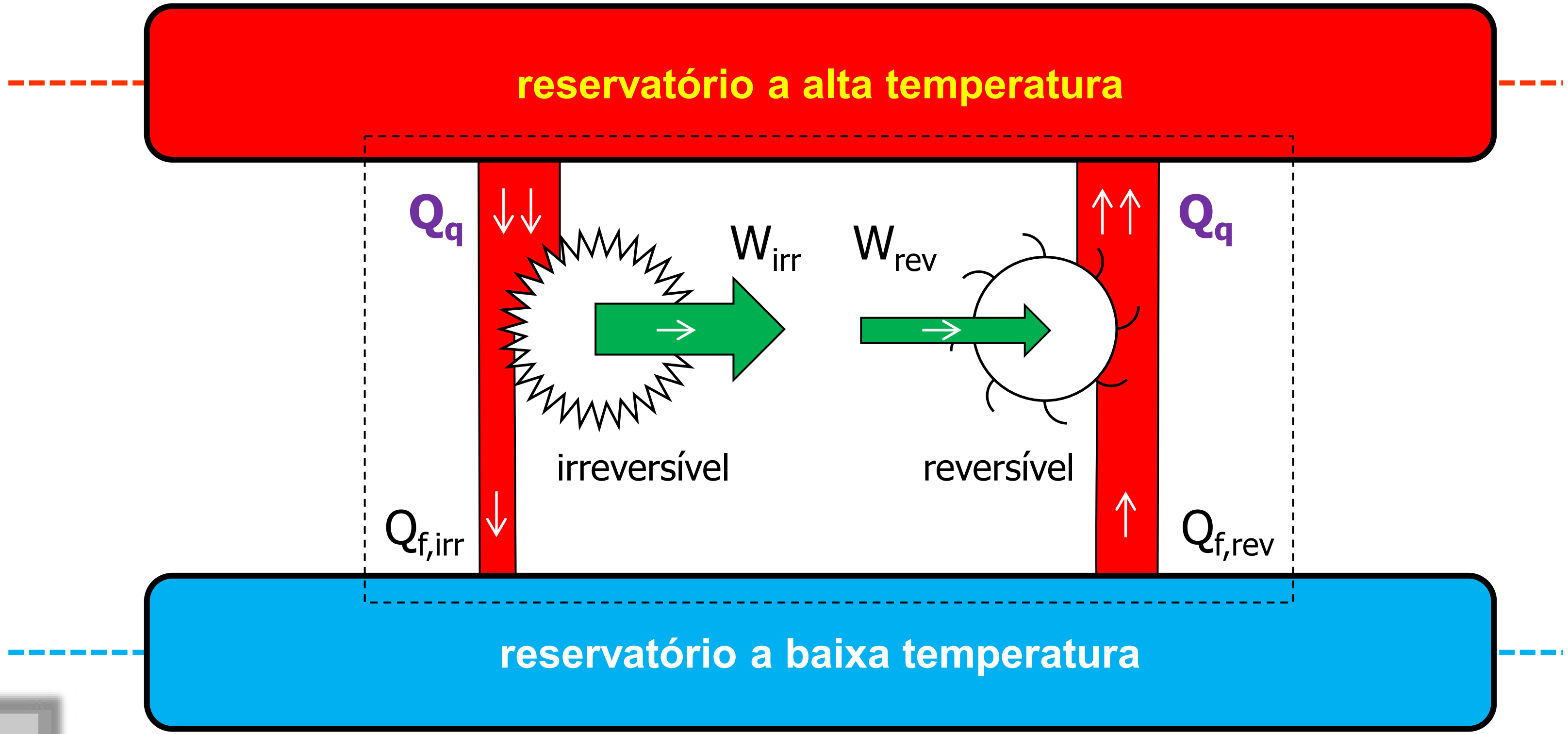
$$\eta_{irr} \overset{hip.}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$

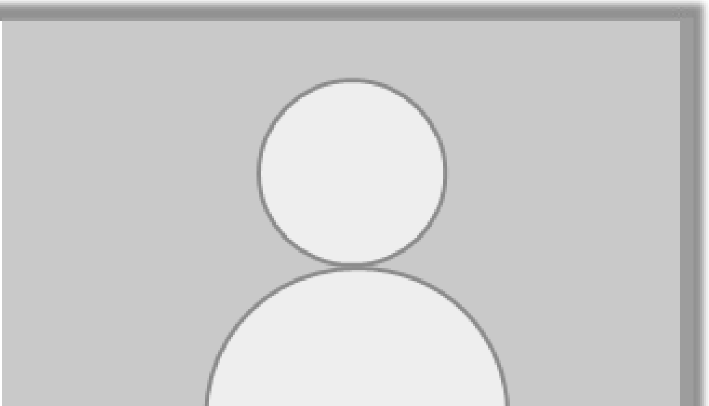




Invertendo o sentido do ciclo da máquina reversível

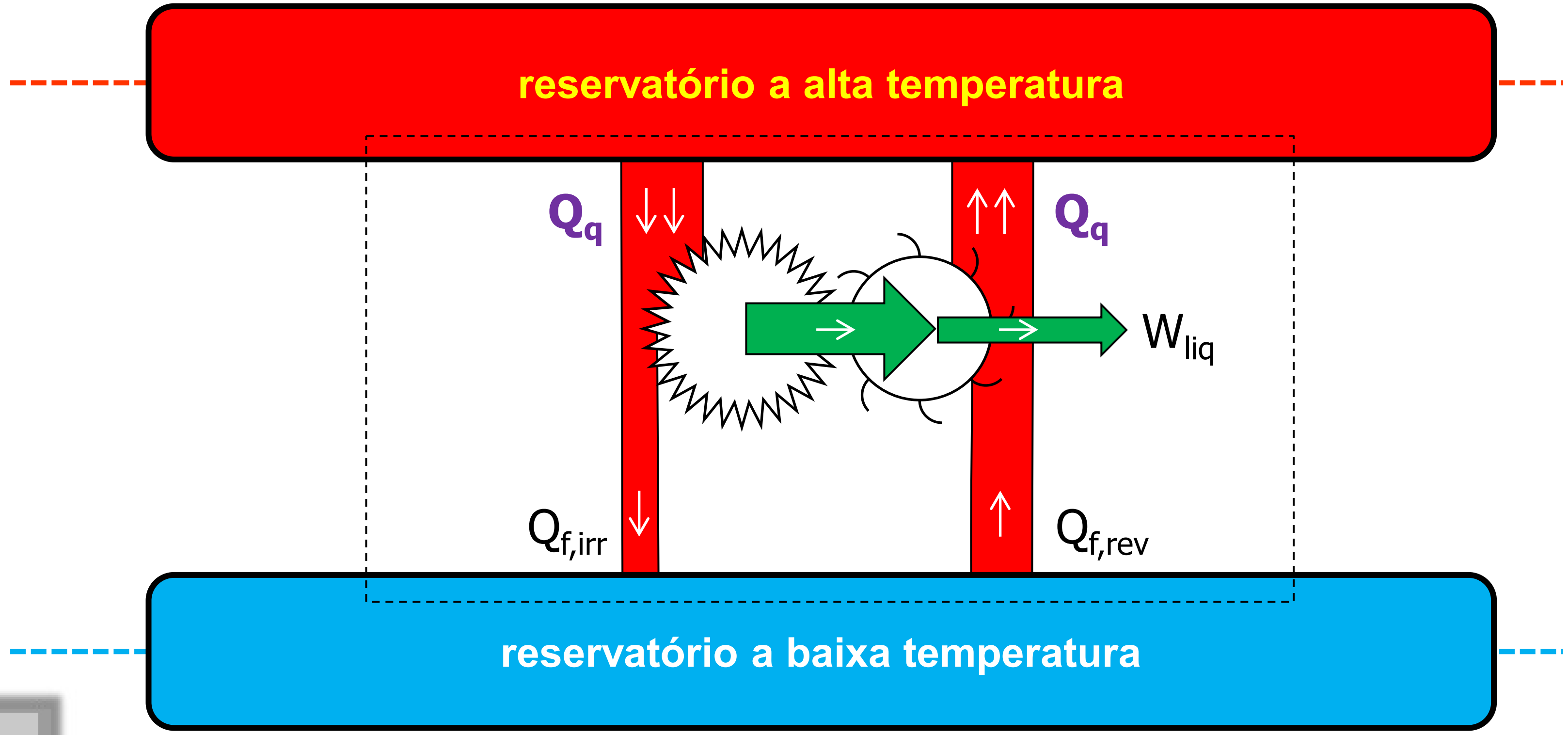
$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$

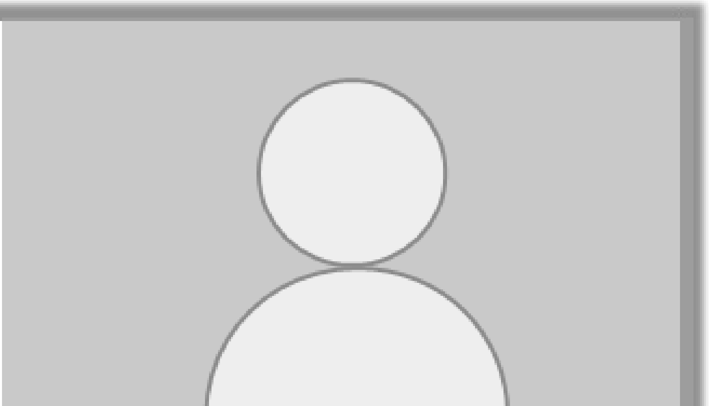




Analisando a máquina combinada

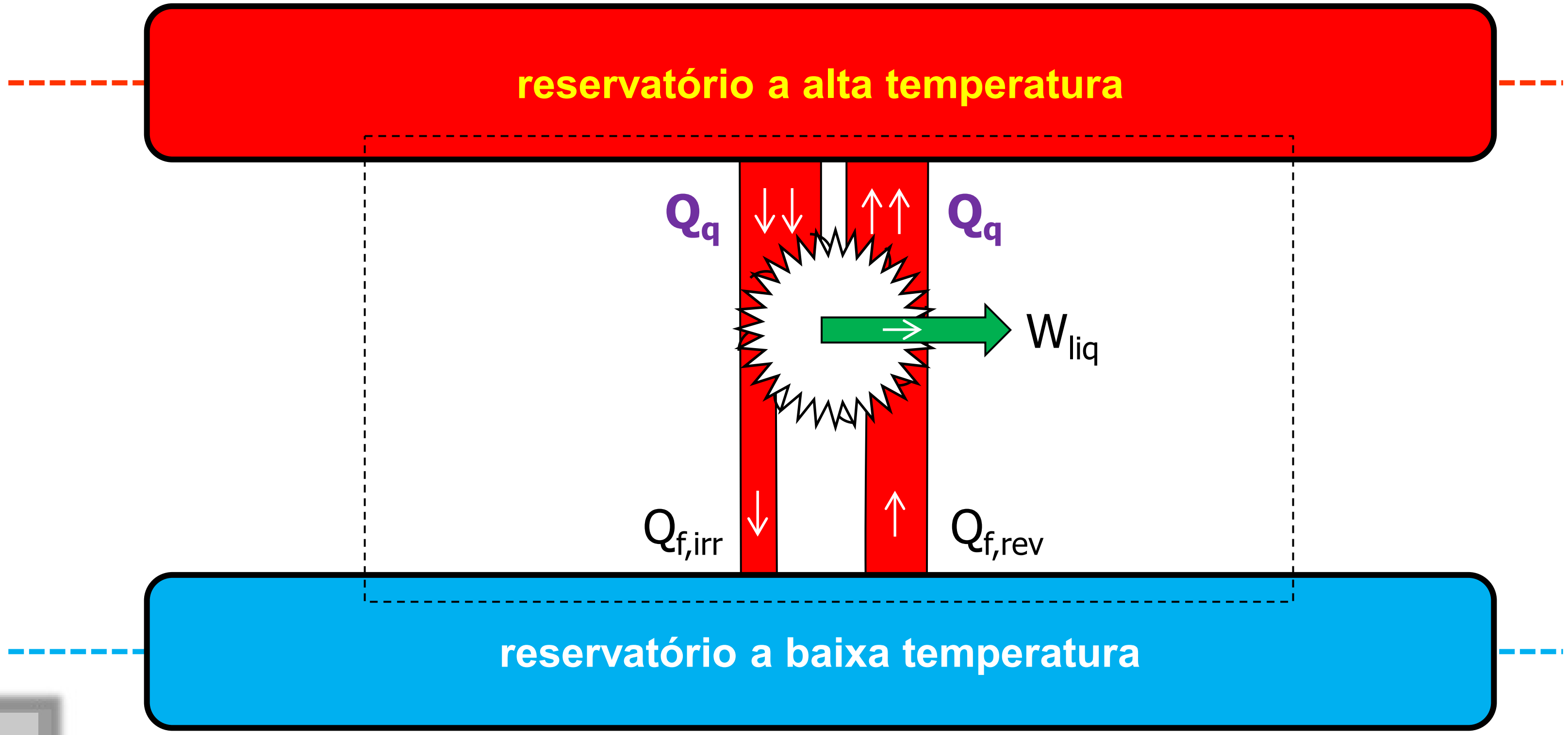
$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$

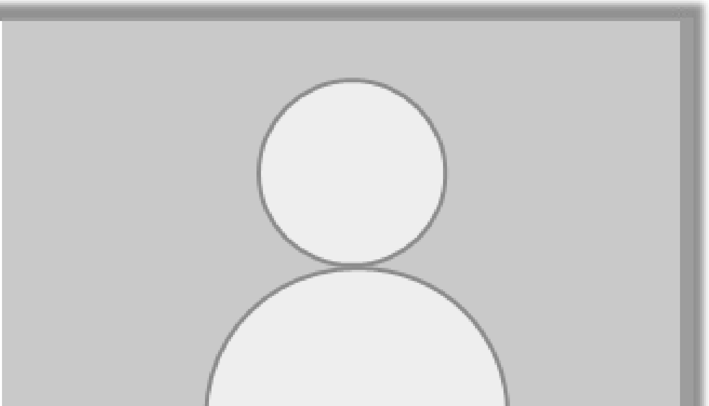




O trabalho total é positivo (exportado)

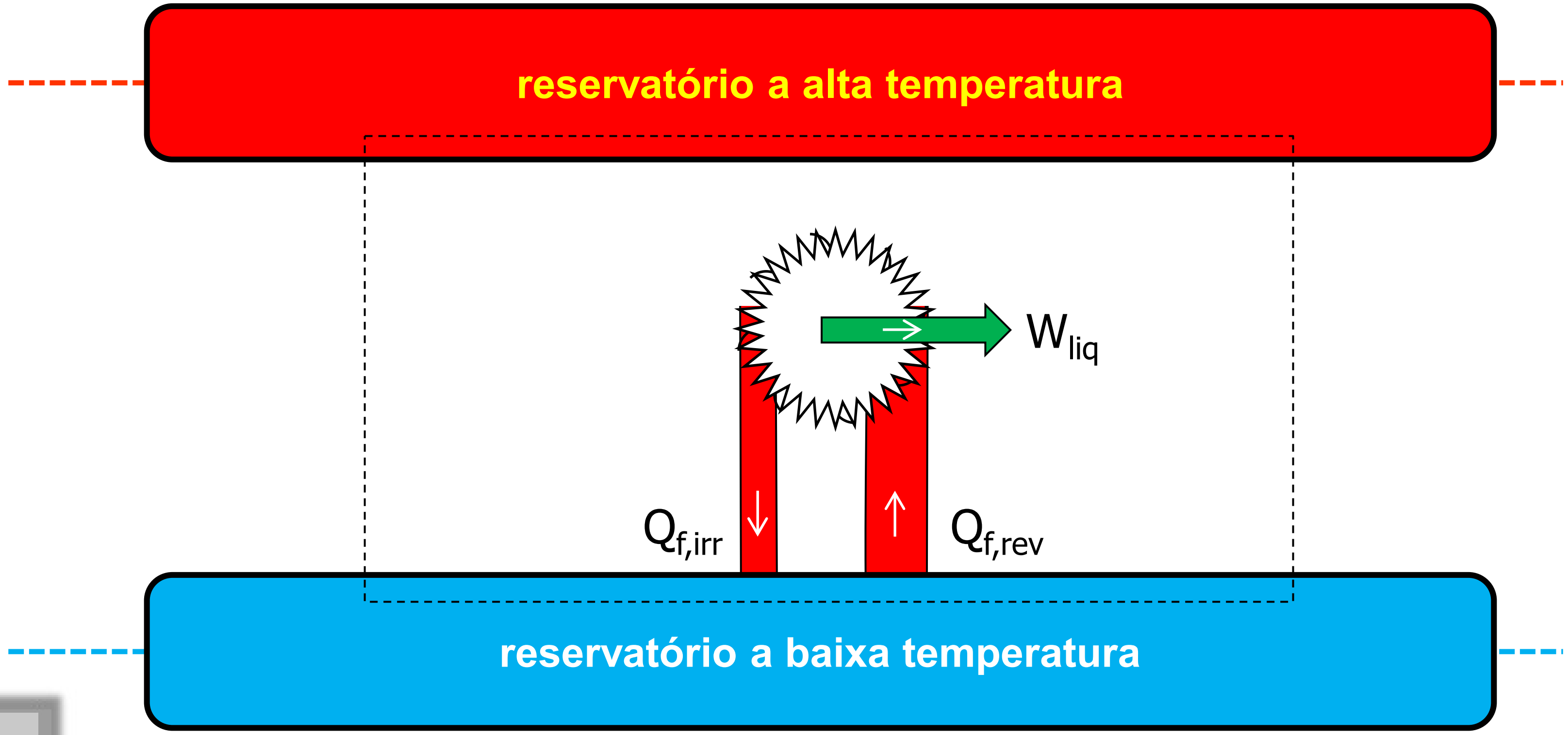
$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$

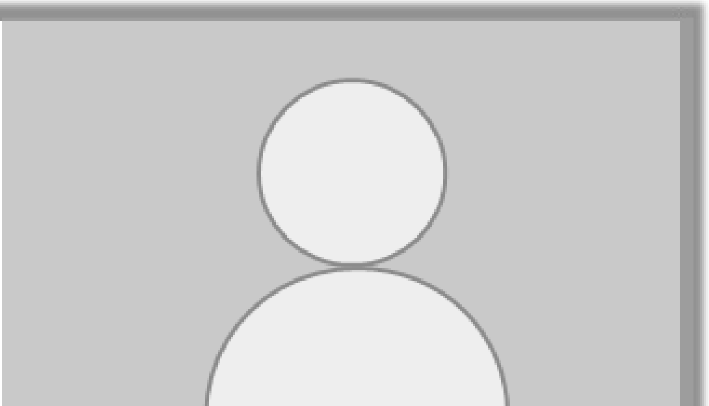




O calor trocado com a fonte quente é cancelado

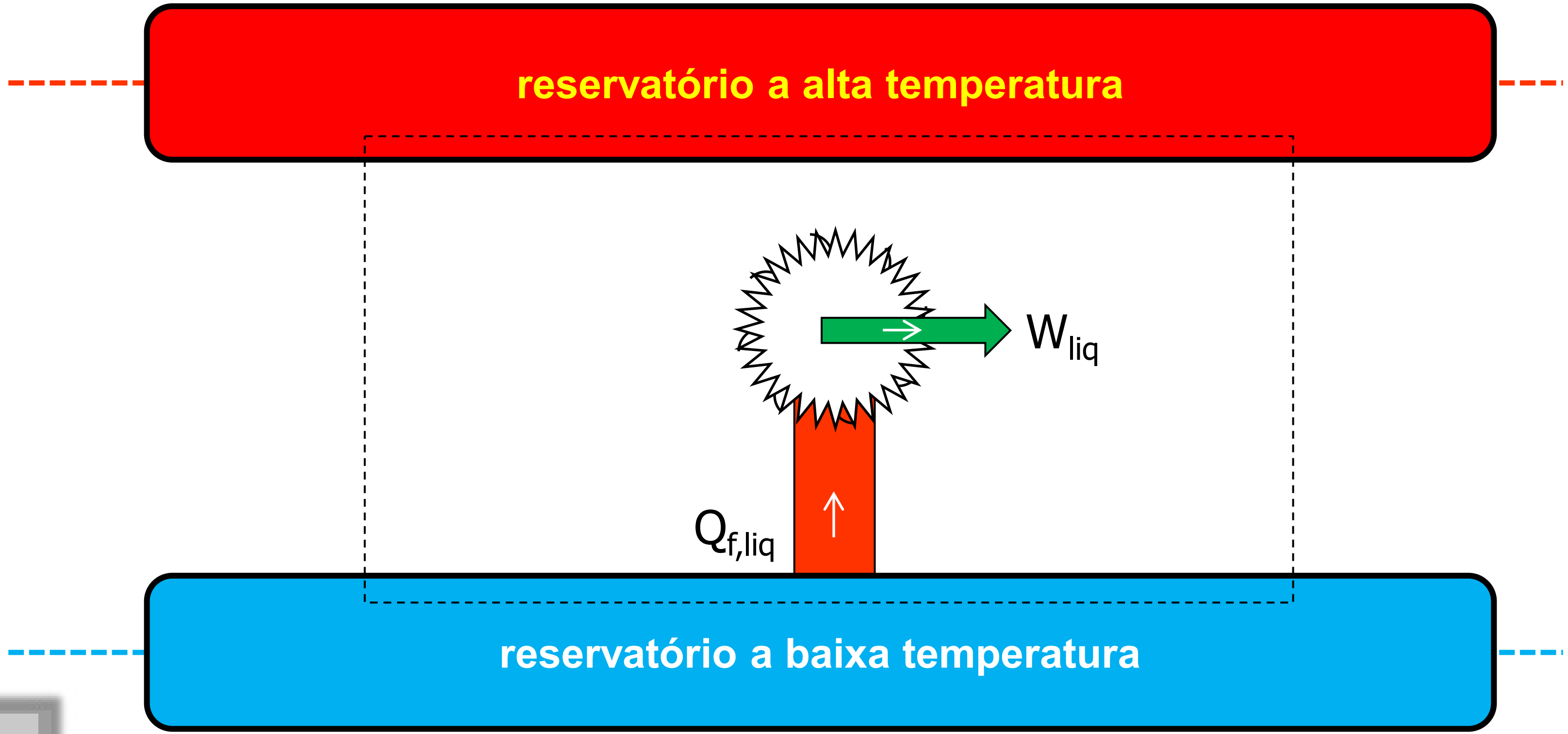
$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$

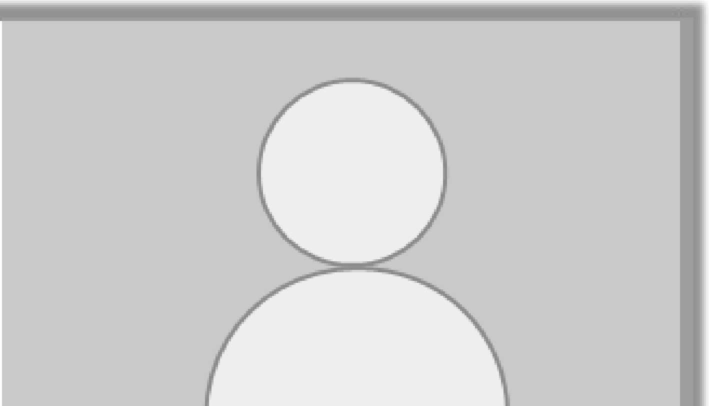




O calor absorvido da fonte fria é positivo

$$\eta_{irr} \overset{\text{hip.}}{>} \eta_{rev} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,irr} < Q_{f,rev} \\ W_{irr} > W_{rev} \end{cases}$$





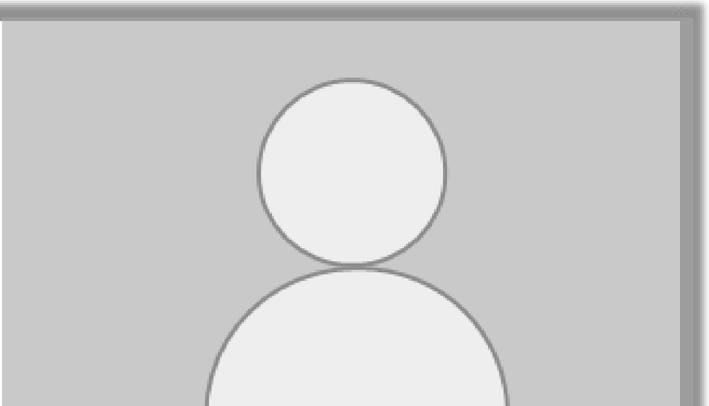
ABSURDO !

Portanto a hipótese não pode ser verdadeira.

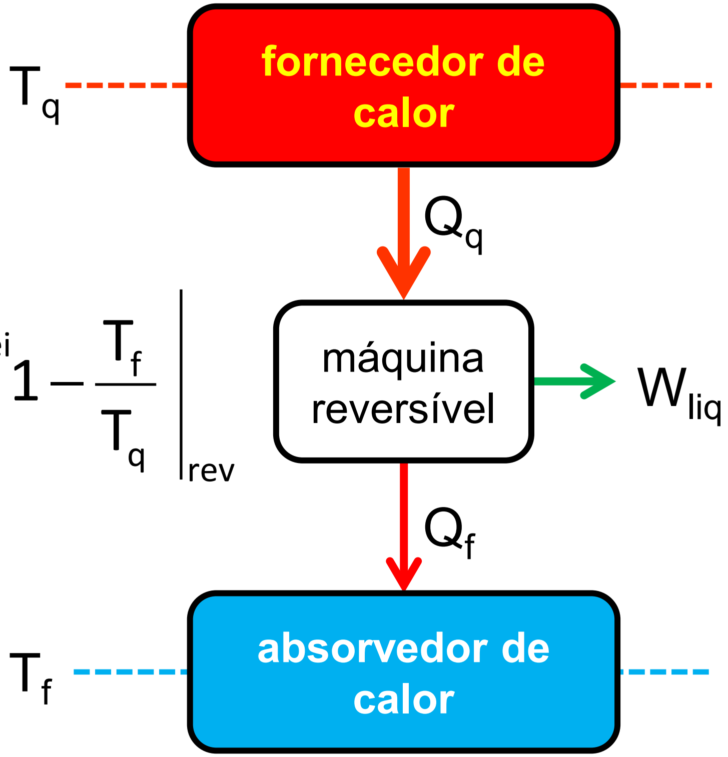
A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad \begin{cases} \oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \\ \oint_{irrev} \frac{\delta Q}{T} < 0 \end{cases}$$

Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



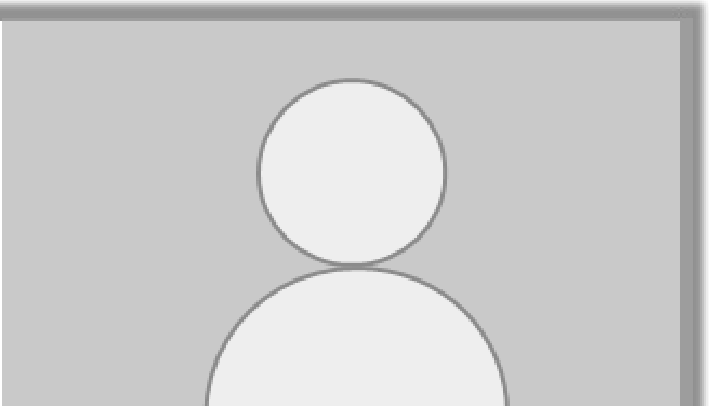
A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



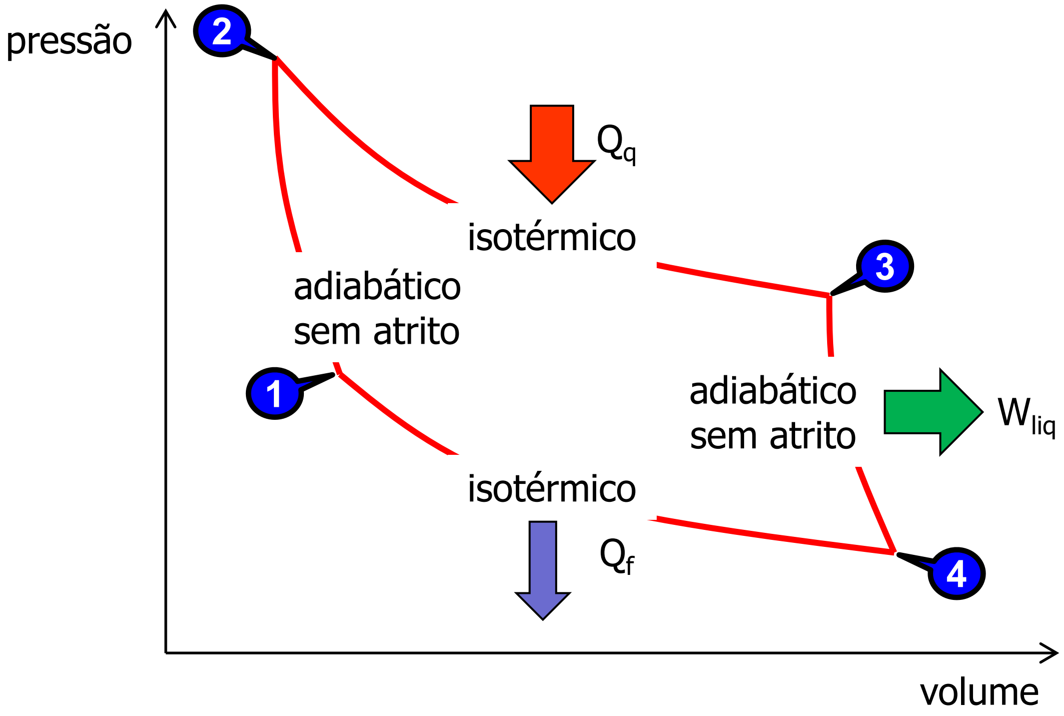
$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q} \overset{2^{a}lei}{=} 1 - \frac{T_f}{T_q}\Bigg|_{rev}$$

Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

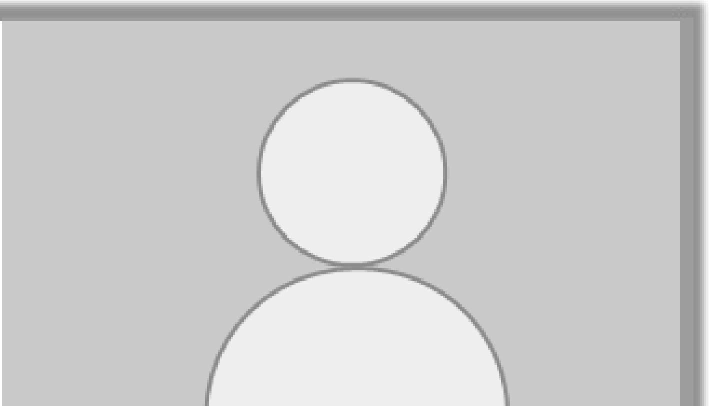
$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_q} \overset{1^{a}lei}{=} 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \overset{2^{a}lei}{=} 1 - \frac{T_f}{T_q} \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} = \frac{Q_q}{T_q}$$



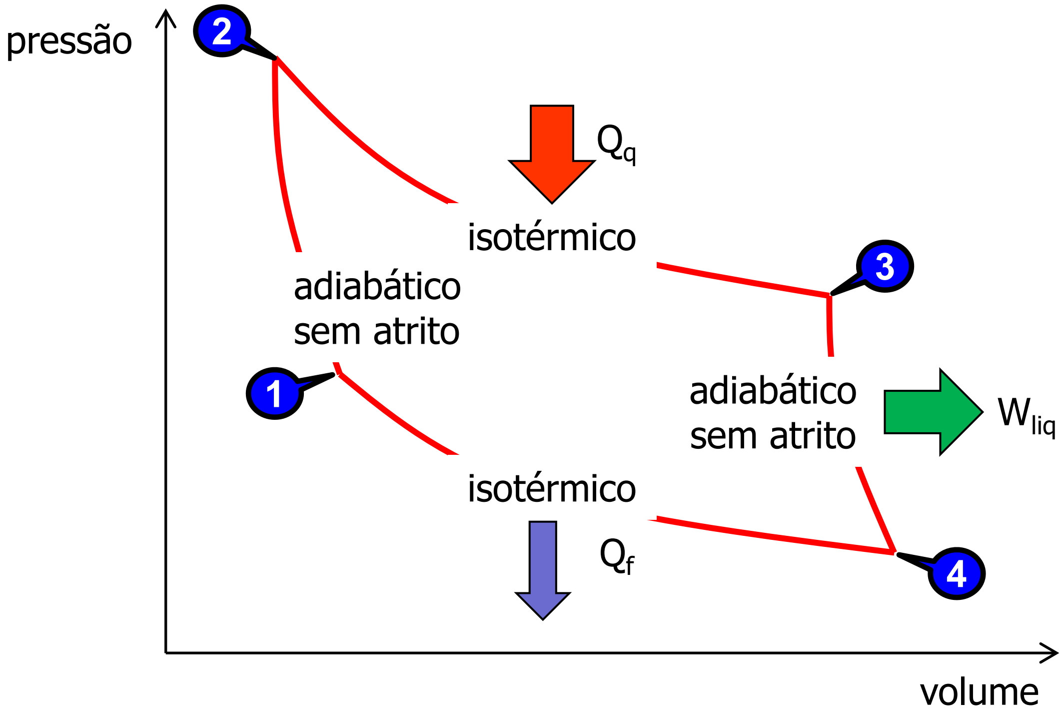
A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



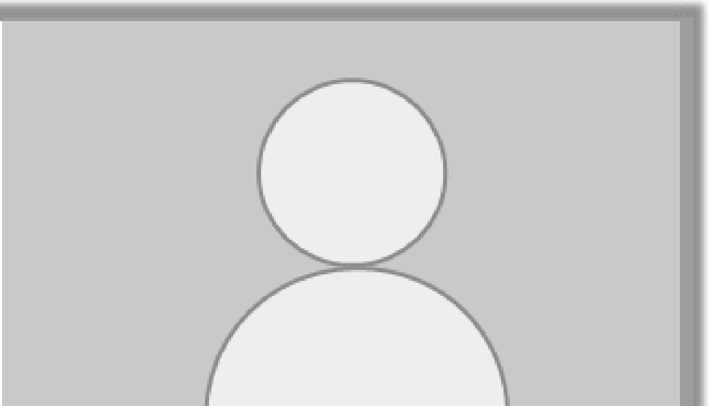
Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...

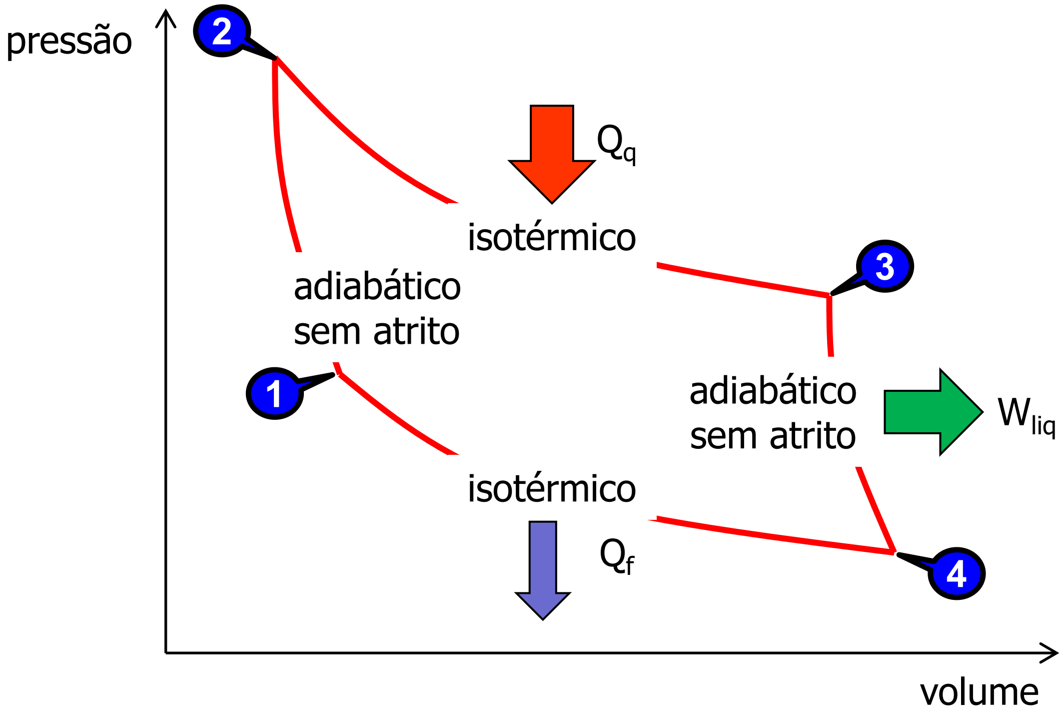


Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

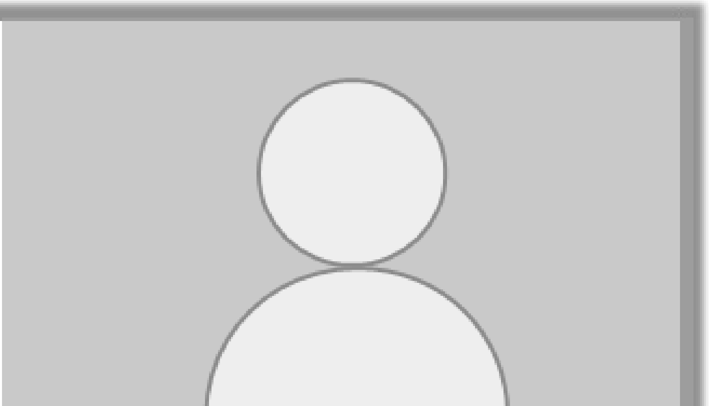


$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \int_3^4 \frac{\delta Q}{T} + \int_4^1 \frac{\delta Q}{T}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...

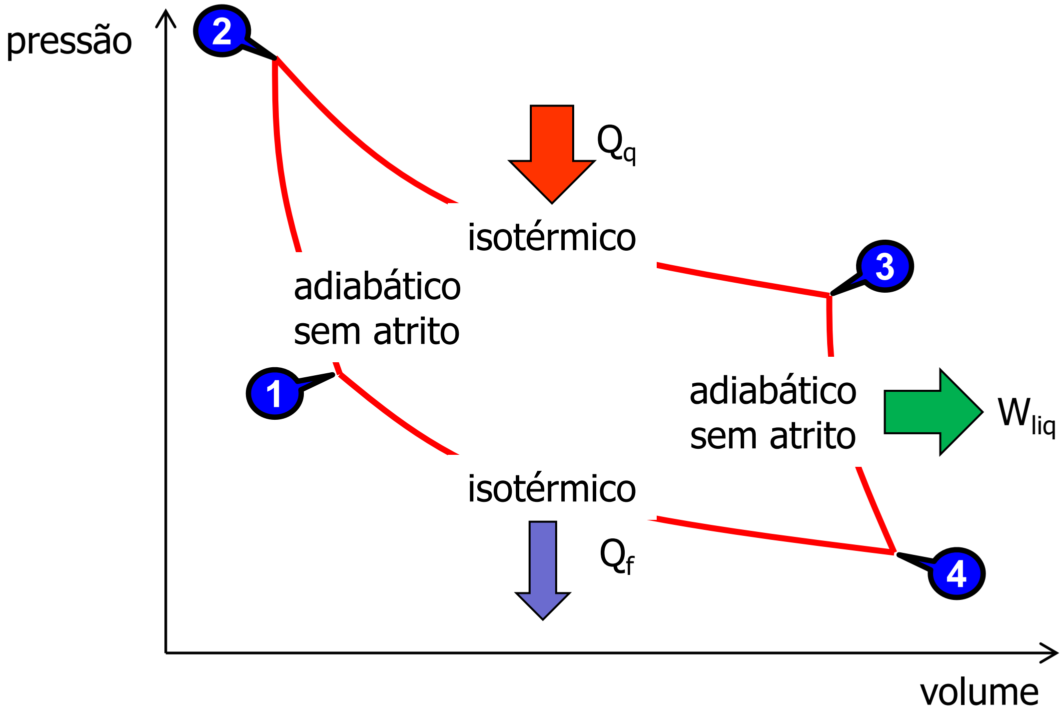


Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

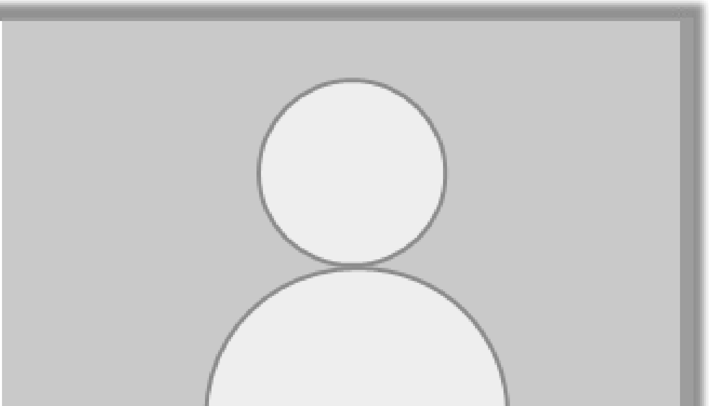


$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = \cancel{\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}} + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \cancel{\int_3^4 \frac{\delta Q}{T}} + \int_4^1 \frac{\delta Q}{T}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...

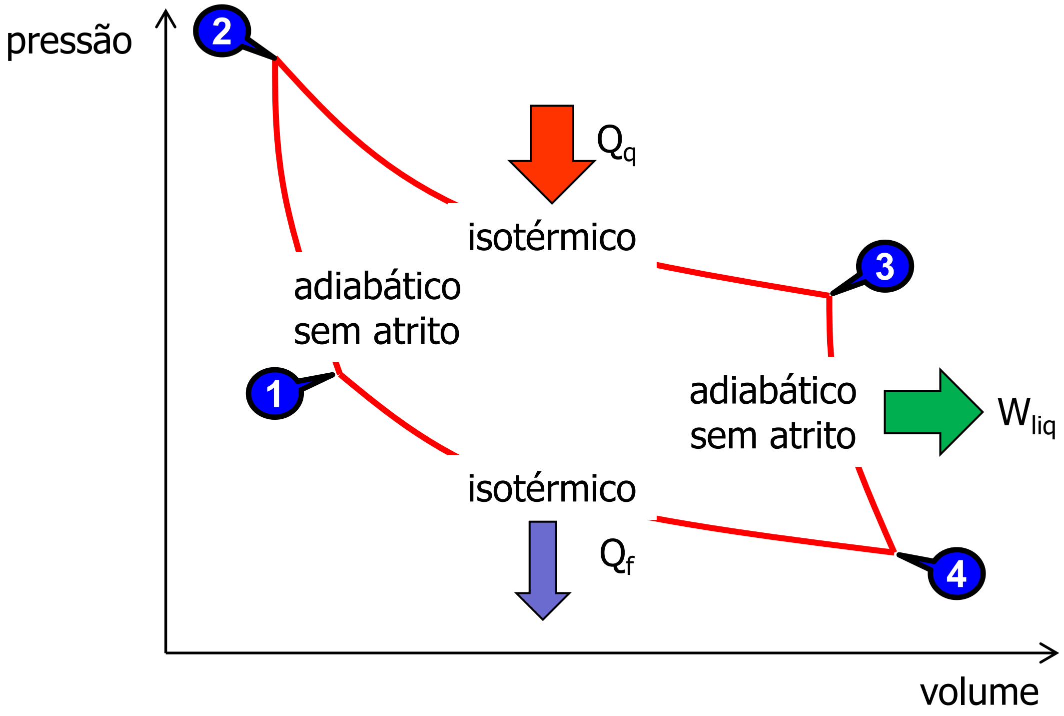


Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

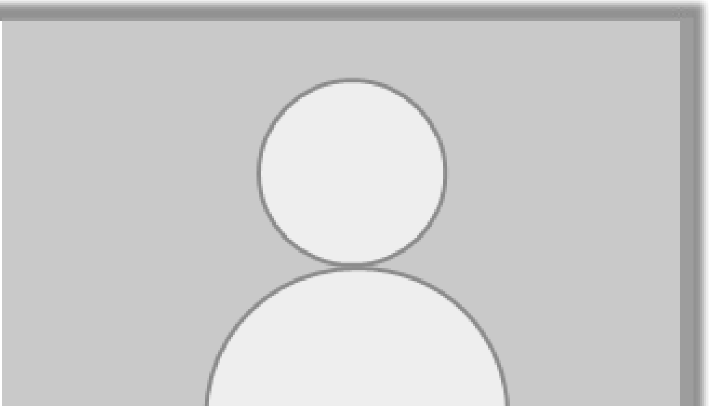


$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = \qquad + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} \qquad + \int_4^1 \frac{\delta Q}{T}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...

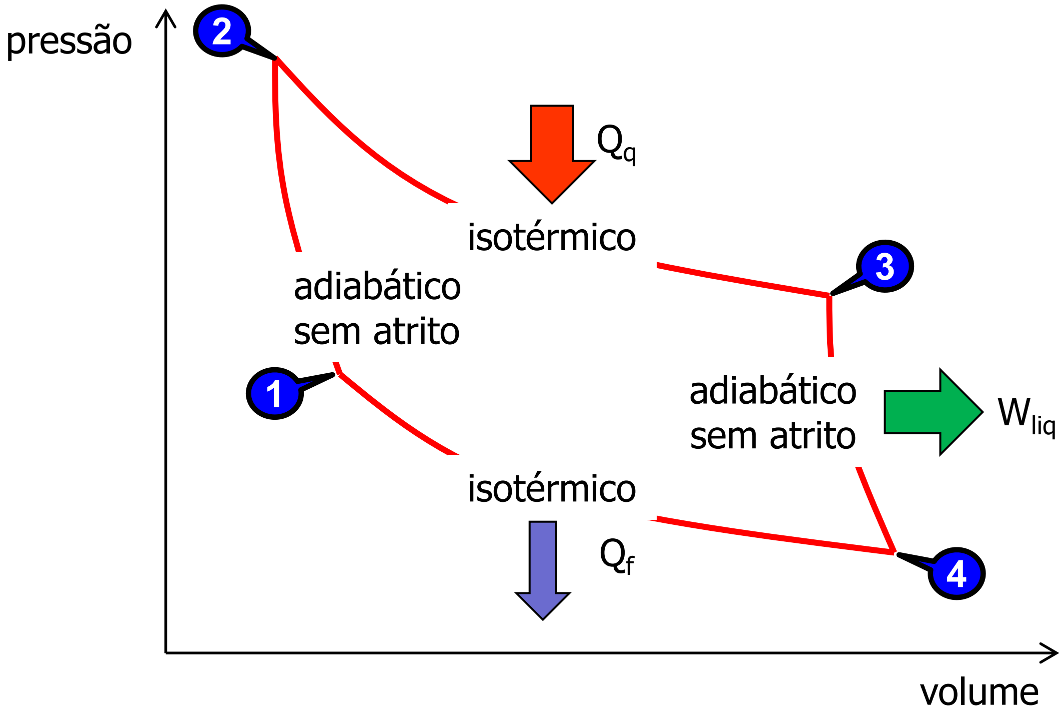


Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

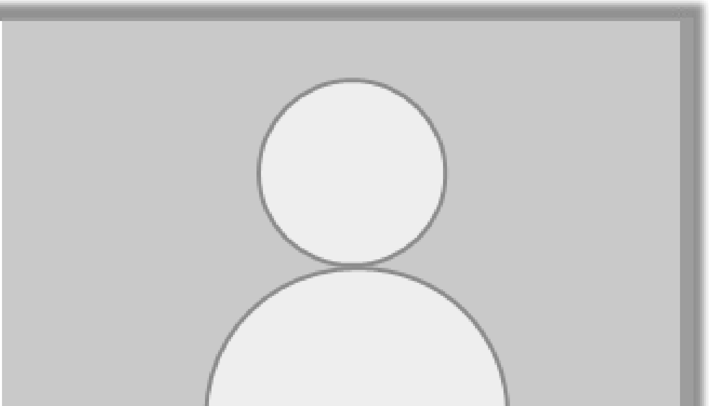


$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \int_4^1 \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_q}{T_q} - \frac{Q_f}{T_f} \qquad \frac{Q_f}{T_f} \overset{rev}{=} \frac{Q_q}{T_q}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



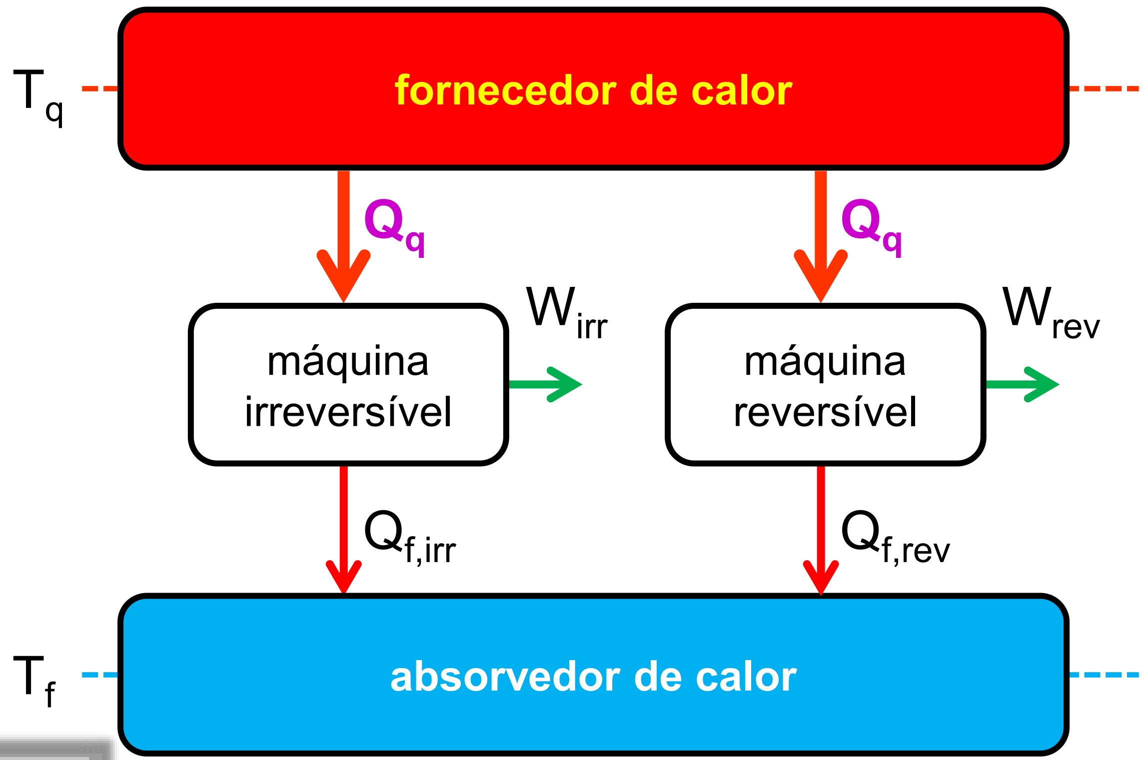
Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



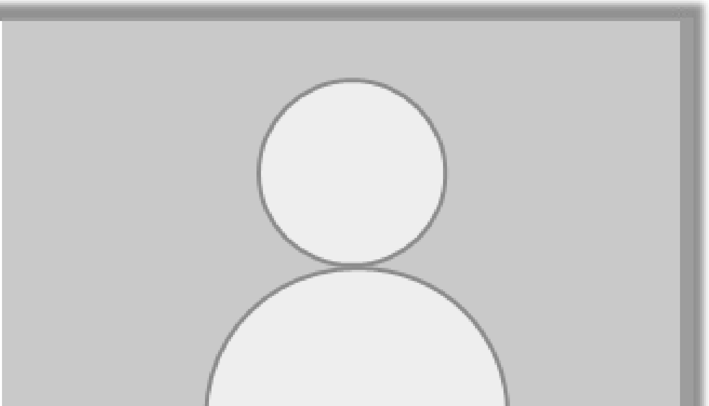
$$\Rightarrow \oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$\frac{Q_f}{T_f} \overset{rev}{=} \frac{Q_q}{T_q}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



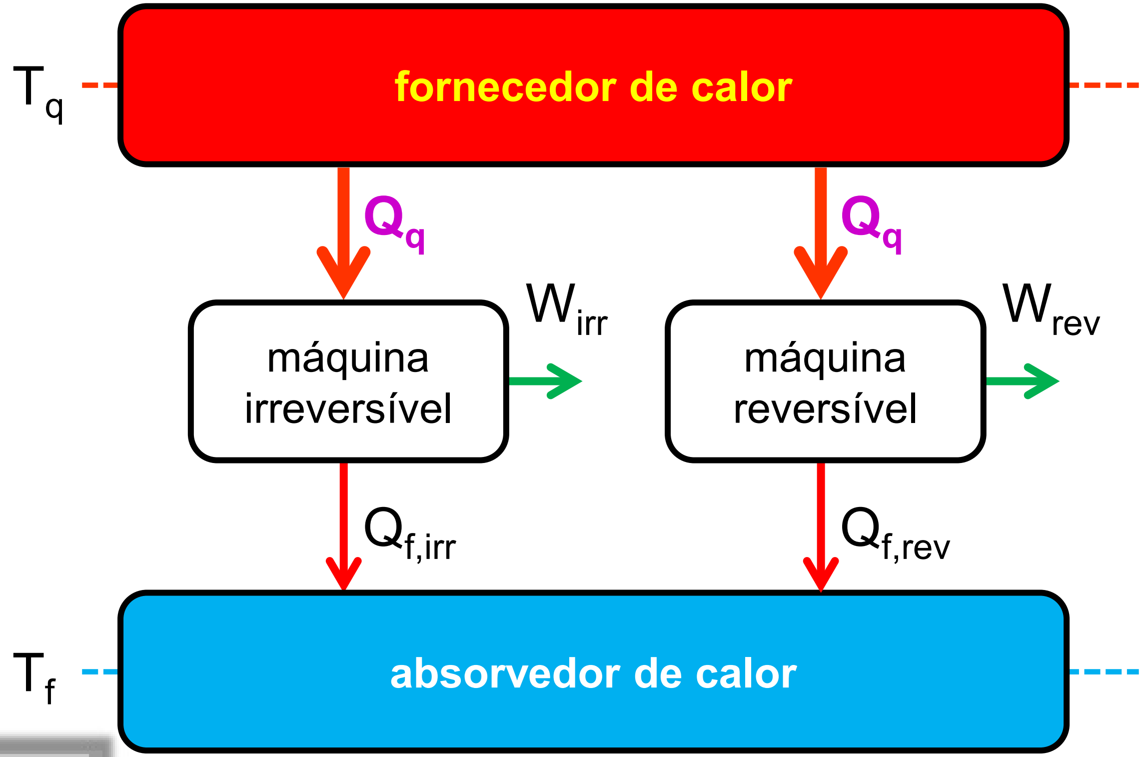
Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



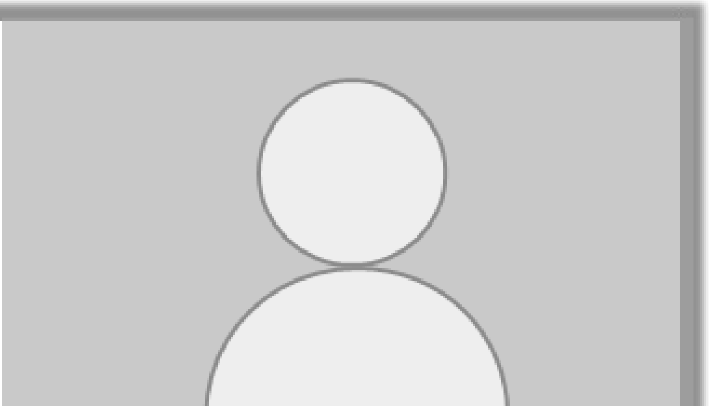
$$\eta_{rev} \overset{2^a\,\text{lei}}{>} \eta_{irr} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,rev} < Q_{f,irr} \\ W_{rev} > W_{irr} \end{cases}$$

$$\frac{Q_f}{T_f} \overset{rev}{=} \frac{Q_q}{T_q}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



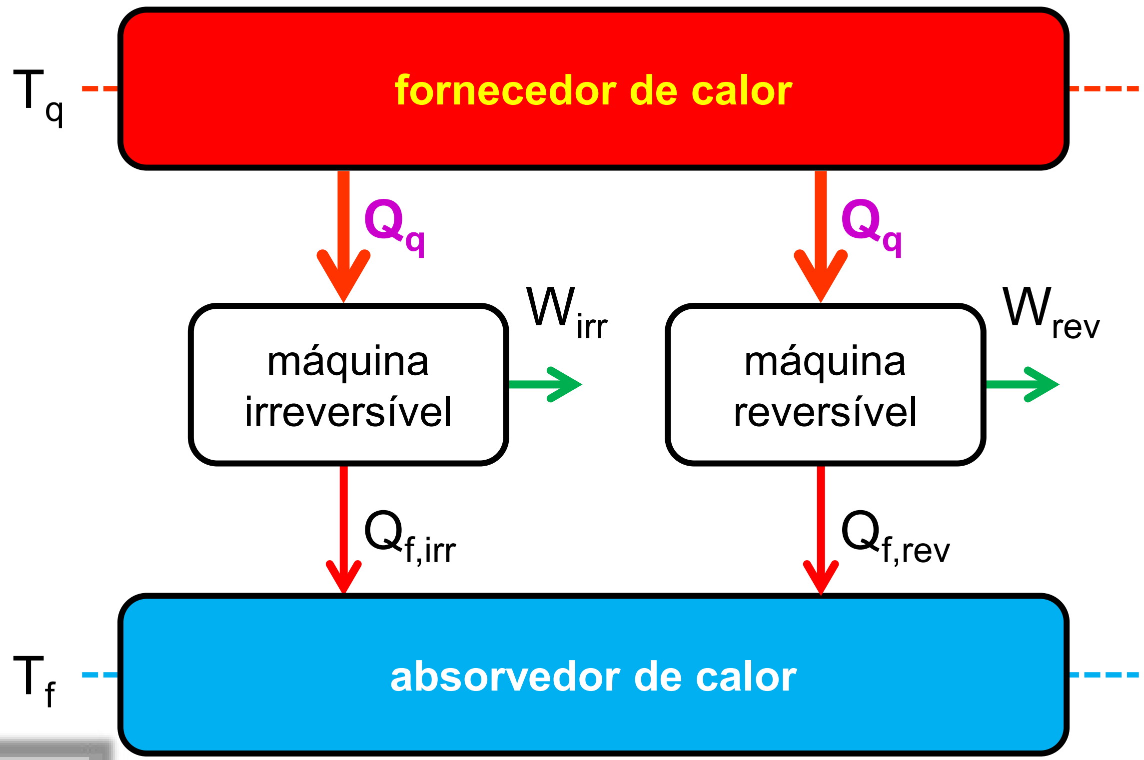
Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)



$$\oint_{irrev} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_q}{T_q} - \frac{Q_{f,irr}}{T_f} < \frac{Q_q}{T_q} - \frac{Q_{f,rev}}{T_f} = 0$$

$$\eta_{rev} \overset{2^{a}\,\text{lei}}{>} \eta_{irr} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,rev} < Q_{f,irr} \\ W_{rev} > W_{irr} \end{cases}$$

A desigualdade de Clausius: uma outra manifestação da 2ª lei...



Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822 –1888)

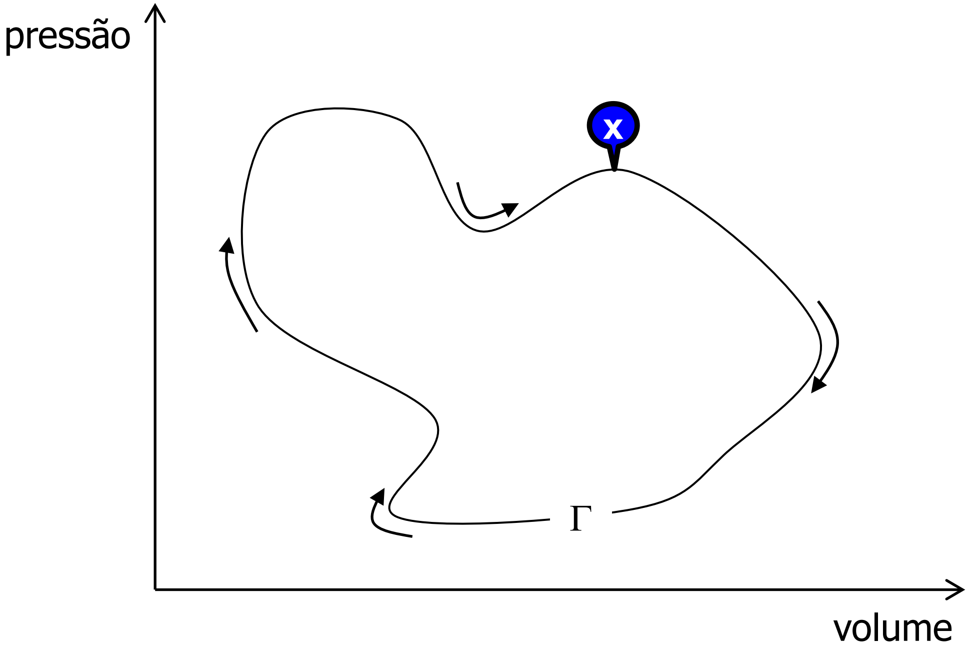
$$\Rightarrow \oint_{irrev} \frac{\delta Q}{T} < 0$$

$$\eta_{rev} \overset{2^a \text{ lei}}{>} \eta_{irr} \Rightarrow \begin{cases} Q_{f,rev} < Q_{f,irr} \\ W_{rev} > W_{irr} \end{cases}$$

ENTROPIA:

uma propriedade de estado...

Definição termodinâmica clássica de entropia (estatística, informacional)



x ⇒ propriedade termodinâmica

$$\oint_{\Gamma} dx = 0$$

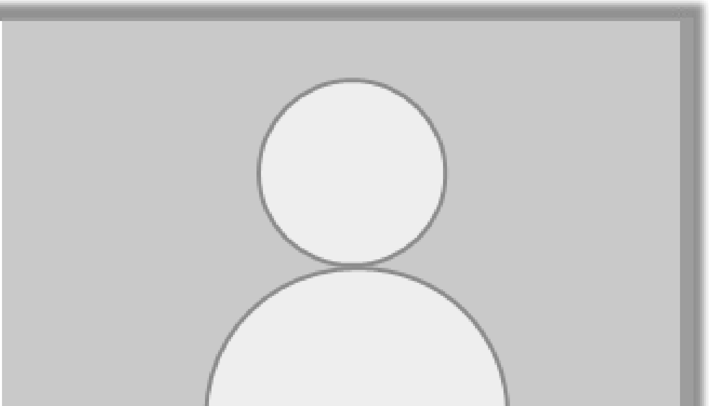
qualquer que seja a trajetória Γ

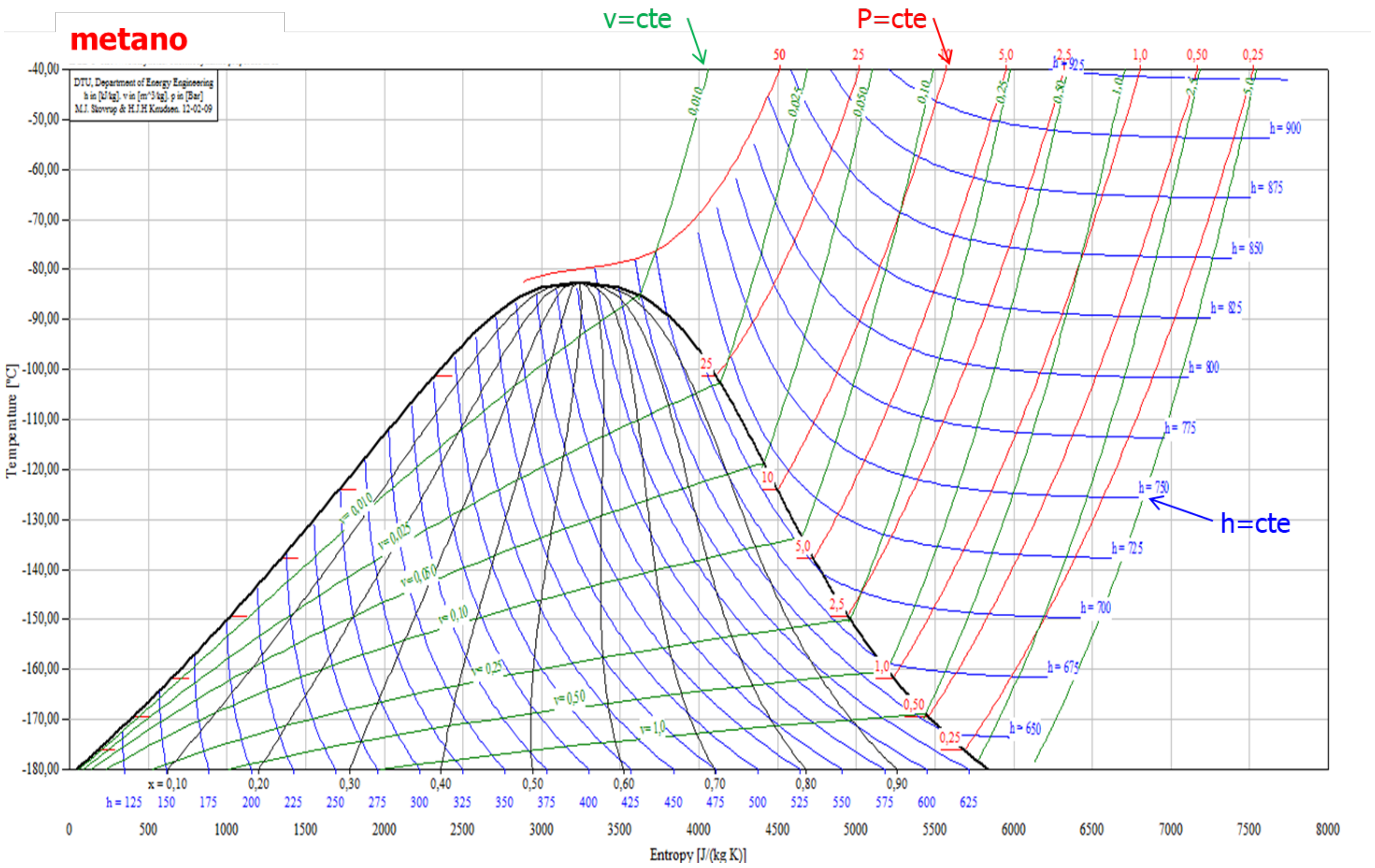
$$\oint \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{rev} = 0 \quad \Rightarrow$$

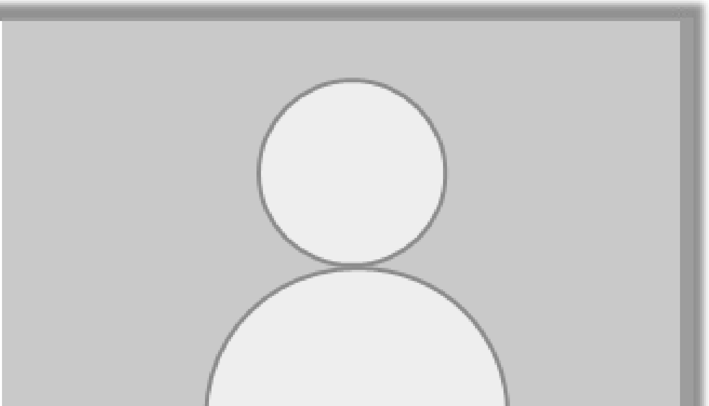
$$dS \overset{def}{=} \frac{\delta Q}{T}$$

$$[S] = \frac{kJ}{K} \text{ ou } \frac{kJ}{kgK}$$

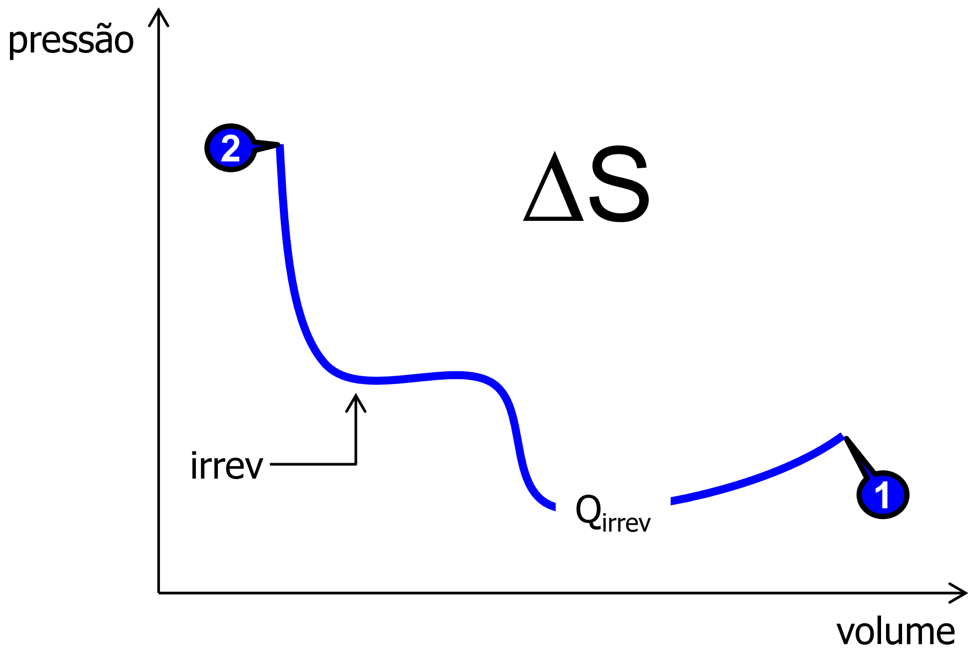
$$S_x - S_0 = \int_0^x \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{rev}$$

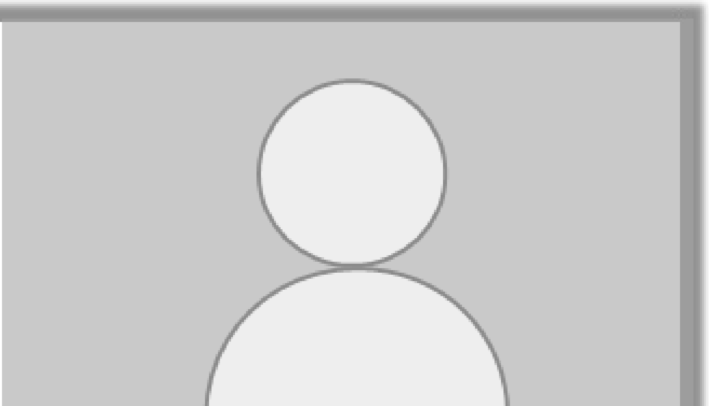



metano
v=cte
P=cte
h=cte
DTU, Department of Energy Engineering
h in [kJ/kg], v in [m^3/kg], p in [Bar]
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen. 12-02-09
Temperature [°C]
Entropy [J/(kg K)]
-40,00
-50,00
-60,00
-70,00
-80,00
-90,00
-100,00
-110,00
-120,00
-130,00
-140,00
-150,00
-160,00
-170,00
-180,00
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
5000
5500
6000
6500
7000
7500
8000
x = 0,10
0,20
0,30
0,40
0,50
0,60
0,70
0,80
0,90
h = 125
150
175
200
225
250
275
300
325
350
375
400
425
450
475
500
525
550
575
600
625
h= 650
h= 675
h= 700
h= 725
h= 750
h= 775
h= 800
h= 825
h= 850
h= 875
h= 900
50
25
10
5,0
2,5
1,0
0,50
0,25
v= 0,010
v= 0,025
v=0,050
v= 0,10
v= 0,25
v= 0,50
v= 1,0

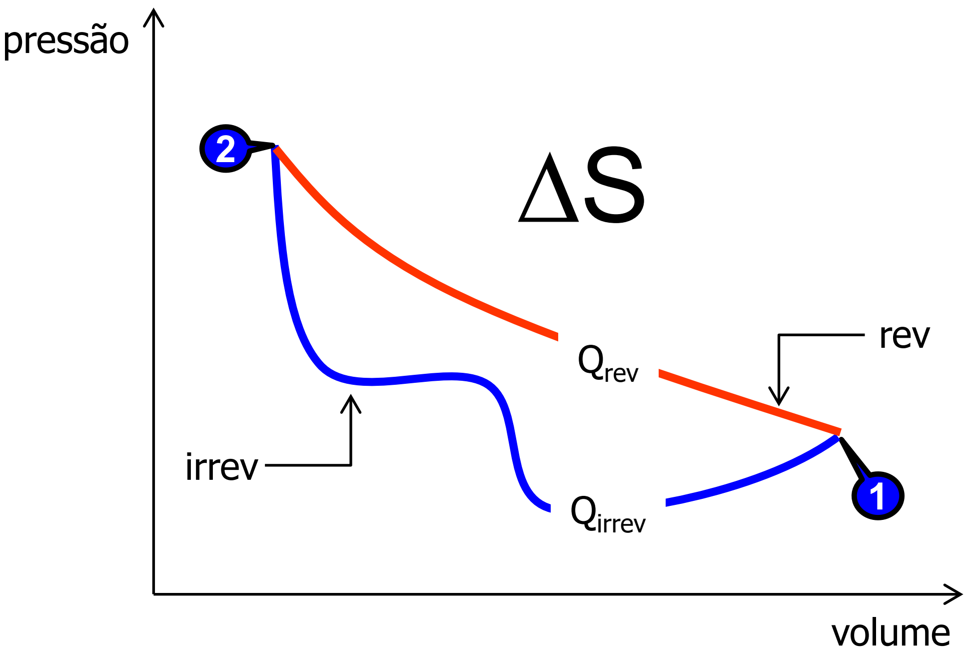


ΔS é sempre calculada por uma trajetória reversível



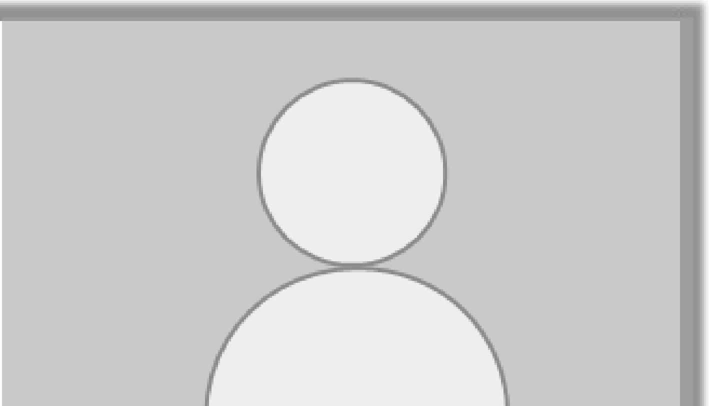


ΔS é sempre calculada por uma trajetória reversível

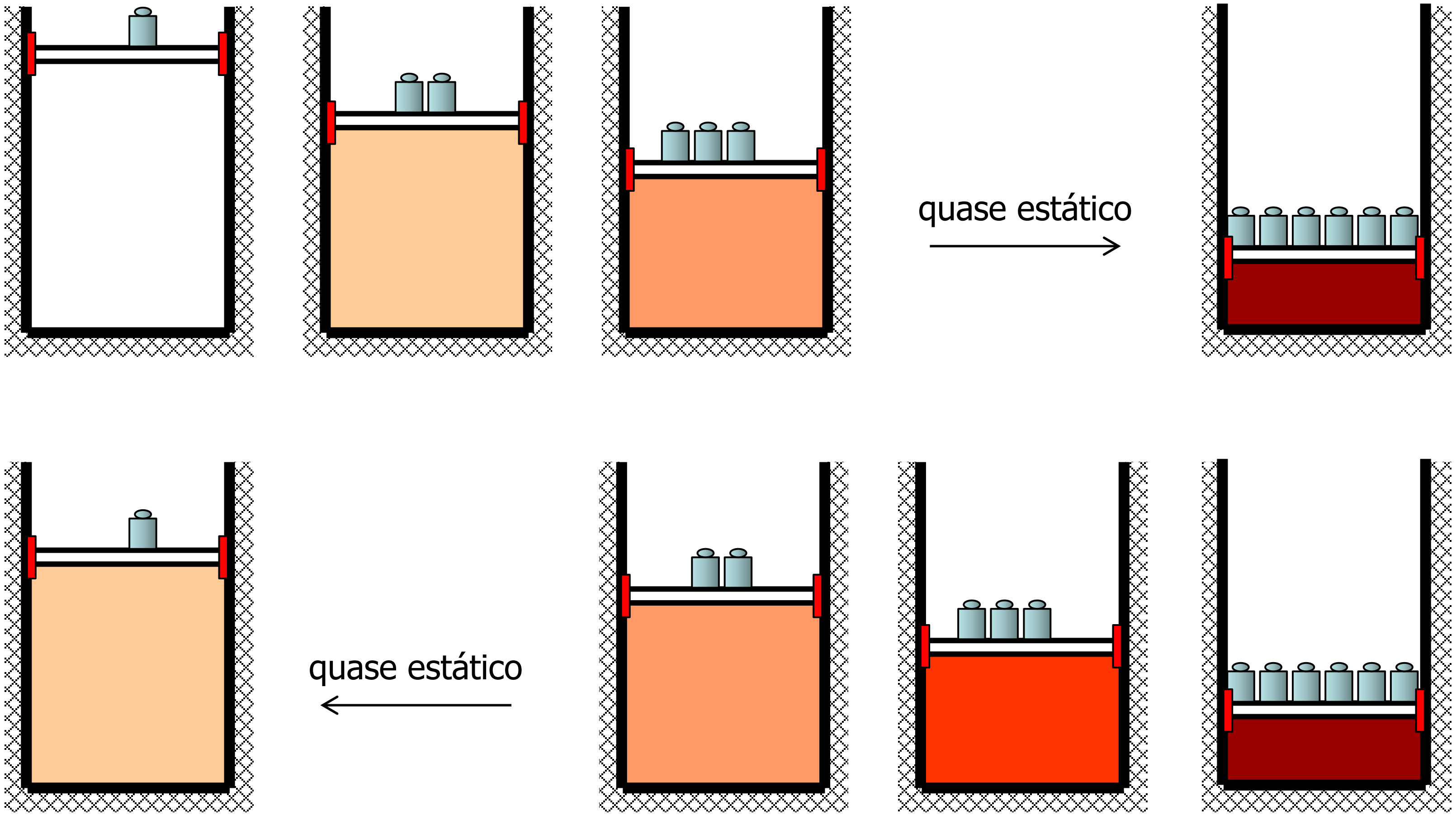


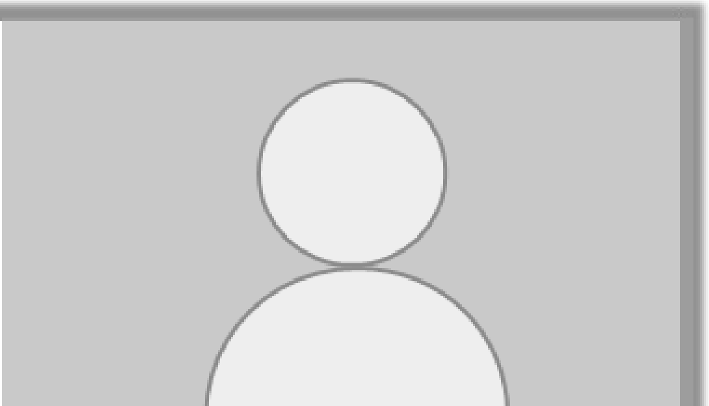
Fontes de irreversibilidades:

- Transferência de calor ΔT finito
- Atritos internos
- Compressão/expansão não resistida
- Mistura de substâncias diferentes
- Reações químicas espontâneas
- Passagem de corrente elétrica por uma resistência finita
- Deformação inelástica de sólidos



$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{rev} \neq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{irrev}$$





O calor gerado pela pelo fricção do êmbolo com a camisa é sempre aditivo, portanto não é possível inverter perfeitamente a transformação !

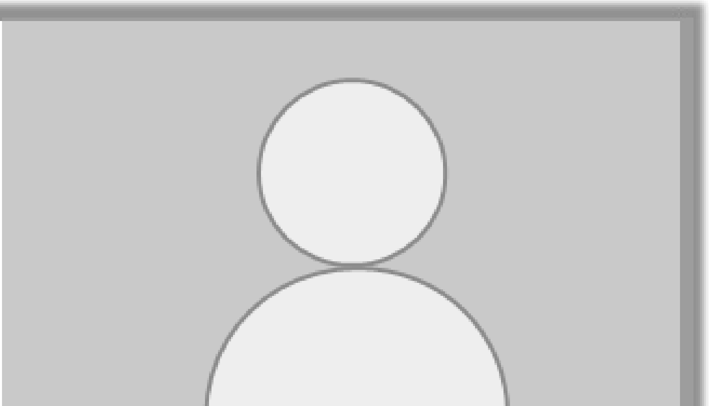
Processos de geração e de transferência de entropia

Clausius: $$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\oint_{\Gamma} \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{irrev} + \int_2^1 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{rev} \leq 0$$

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{irrev} + (S_1 - S_2) \leq 0$$

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}\bigg|_{irrev} \quad \Rightarrow \quad dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$



Processos de geração e de transferência de entropia

$$dS \geq \delta Q / T$$

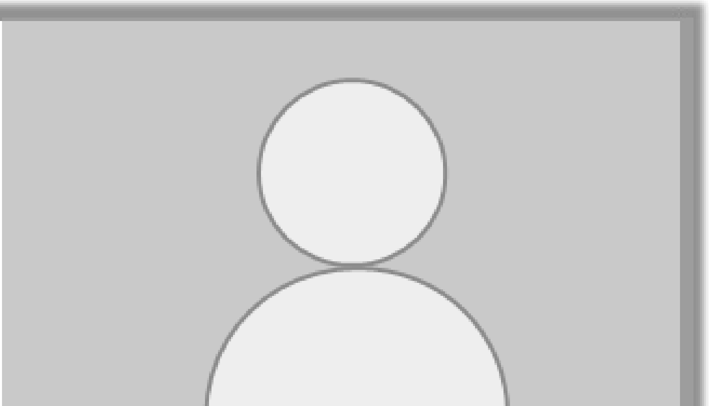
Variação da entropia de um sistema fechado durante processo irreversível

Transferência de entropia via transferência de calor

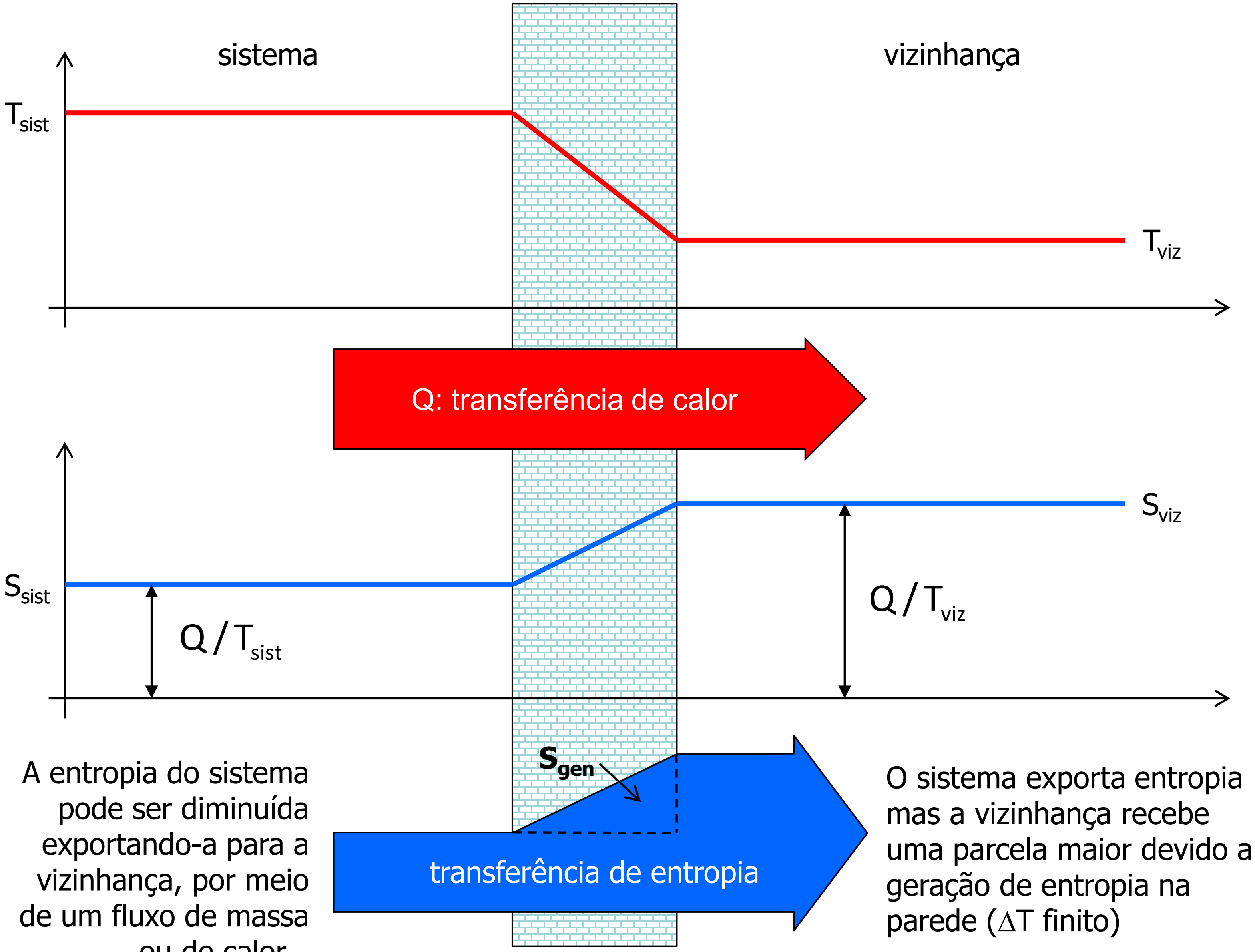
$$\Delta S_{sistema} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

Entropia gerada durante o processo irreversível

$$S_{gen} \begin{cases} > 0 \text{ proc. irreversível} \\ = 0 \text{ proc. reversível} \\ < 0 \text{ proc. impossível} \end{cases}$$

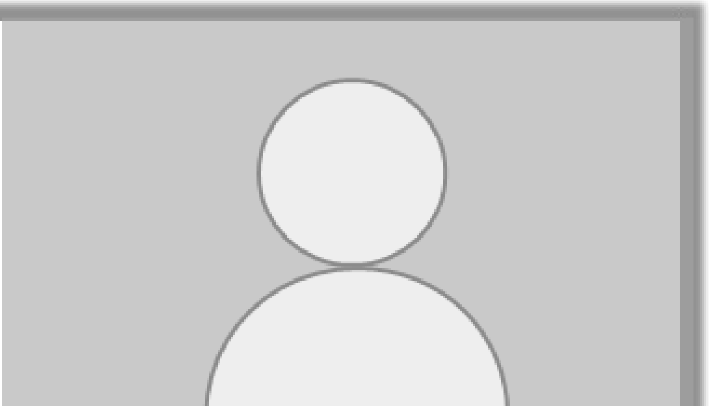


Processos de geração e de transferência de entropia



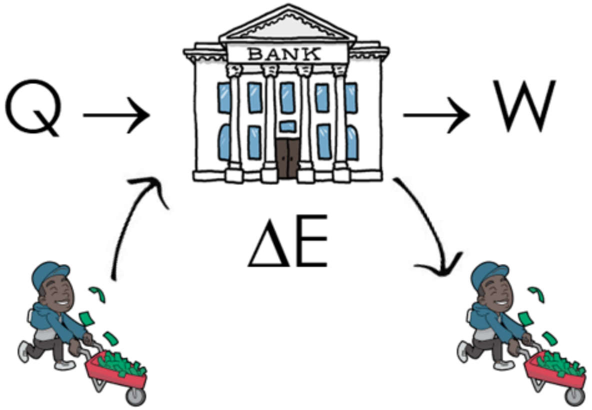
A entropia do sistema pode ser diminuída exportando-a para a vizinhança, por meio de um fluxo de massa ou de calor...

O sistema exporta entropia mas a vizinhança recebe uma parcela maior devido a geração de entropia na parede (ΔT finito)



INVENTÁRIO DE ENTROPIA...

1ra Lei TD: conservação da energia



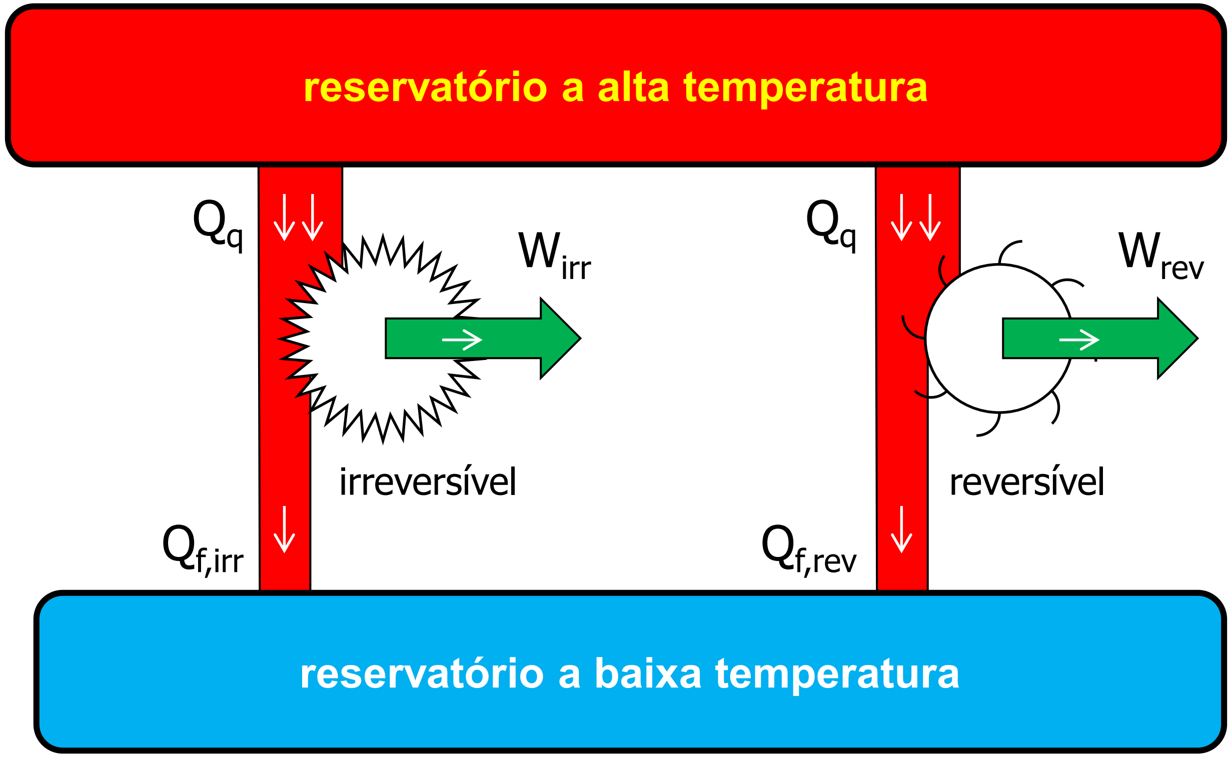
$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} - \sum_{sai} \dot{m}_k \theta_k + \sum_{entra} \dot{m}_k \theta_k$$

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e + \dot{\sigma}_{cv}$$

rate of entropy change | rates of entropy transfer | rate of entropy production

$$\frac{dS_{CV}}{dt} = \sum_{i=0}^{n} \frac{Q_i}{T_i} + \sum_{i=0}^{n} \dot{m}_{i,in} s_{i,in} - \sum_{i=0}^{n} \dot{m}_{i,out} s_{i,out} + \dot{\sigma}_{CV}$$

ENTROPIA



reservatório a alta temperatura
Q_q
W_{irr}
irreversível
$Q_{f,irr}$
Q_q
W_{rev}
reversível
$Q_{f,rev}$
reservatório a baixa temperatura