

CURSO INTENSIVO

TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA

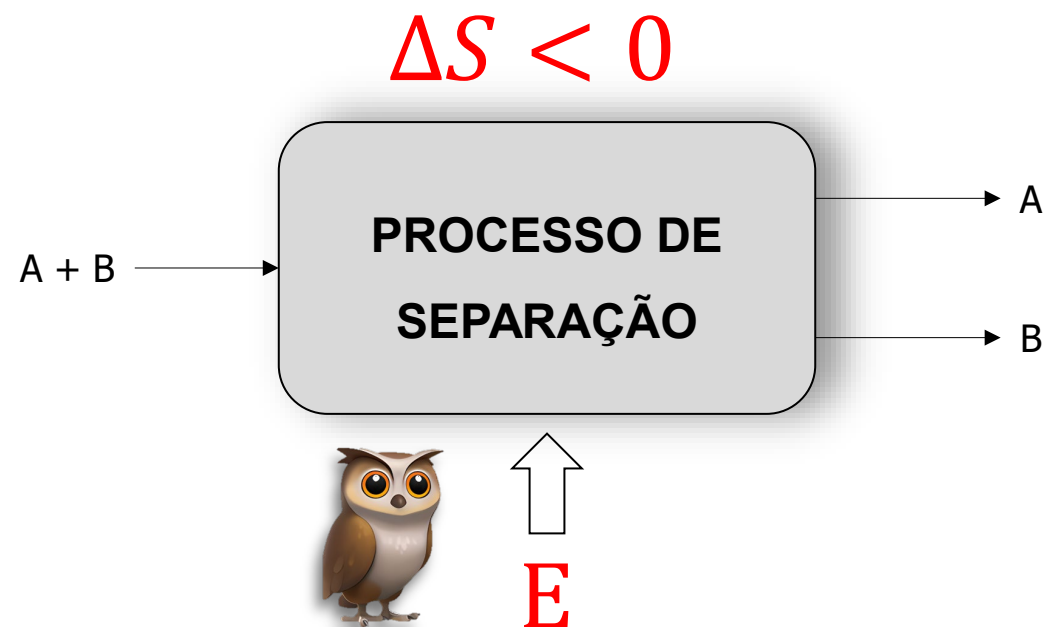
EXERGIA – Introdução e Conceitos Básicos

Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo

Attention to
Filler Words

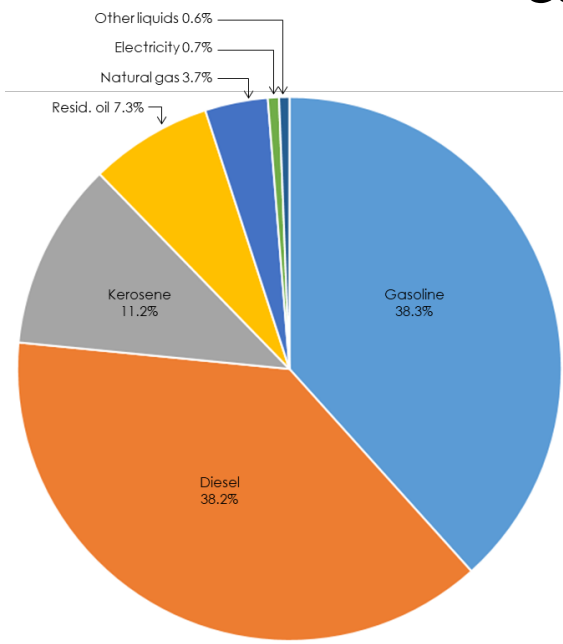
1. Como maximizar a eficiência de conversão de uma fonte primária de energia térmica ?
2. Como otimizar a utilização de insumos energéticos em um processo industrial ?

- Processos transformativos – matéria prima / produto...
- Processos de separação de misturas multicomponentes...

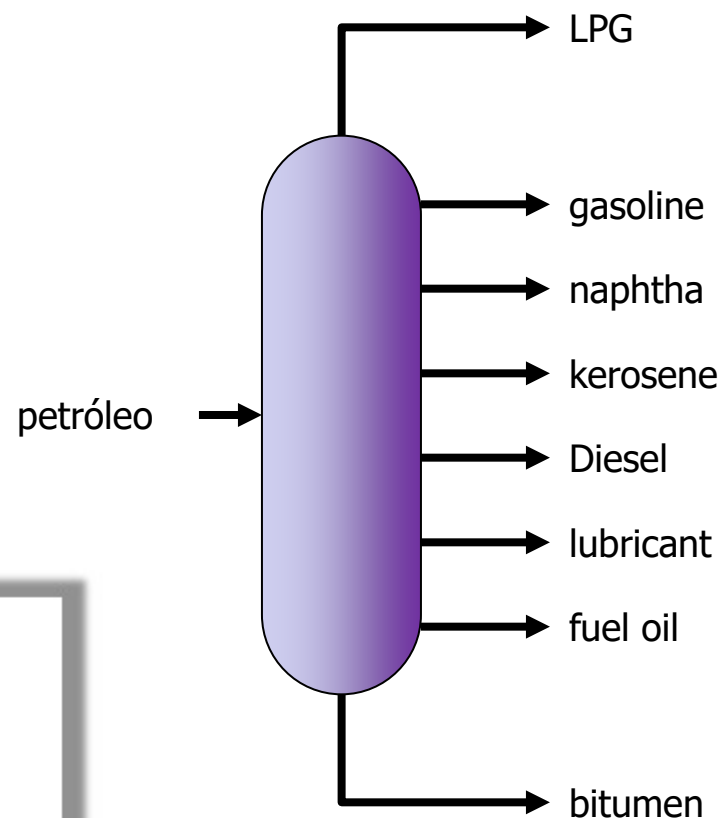


Operações de separação em processos industriais:

- correspondem a aproximadamente 40 – 90 % dos custos totais



International Energy Outlook 2017



Refinaria Duque de Caxias – RJ

Separação de um sólido dissolvido em um líquido

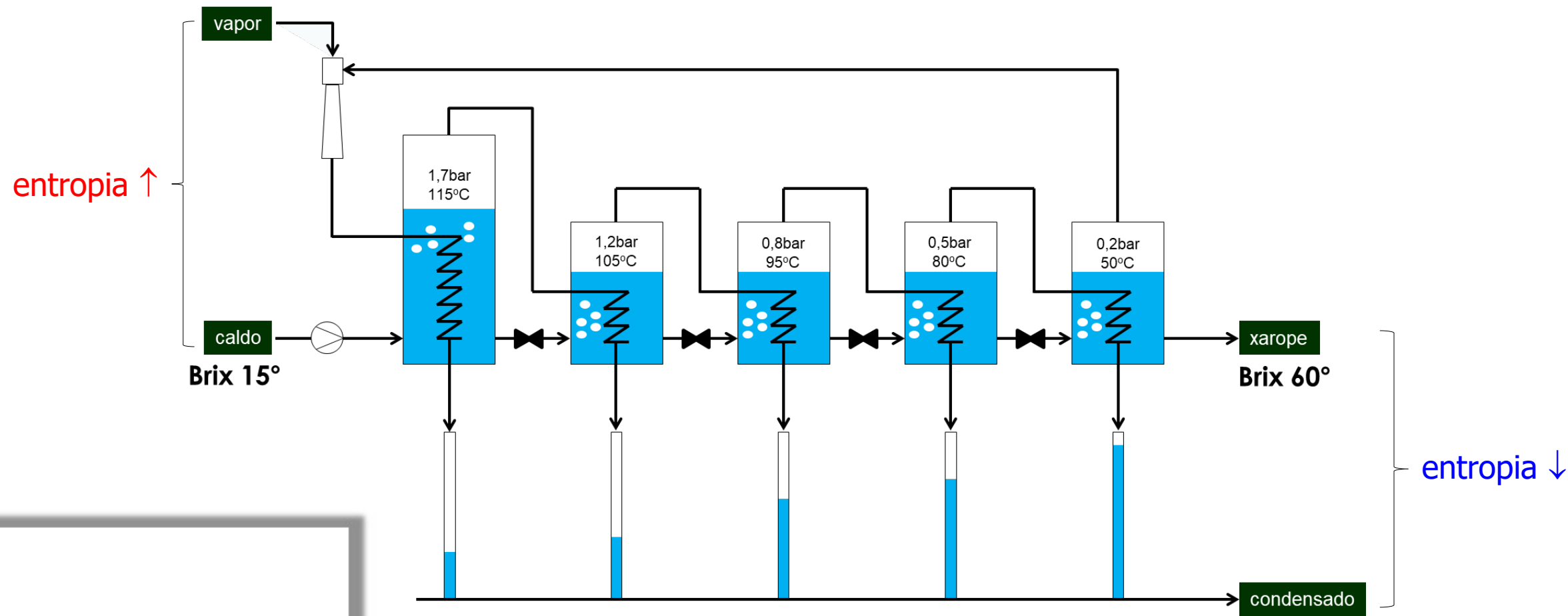


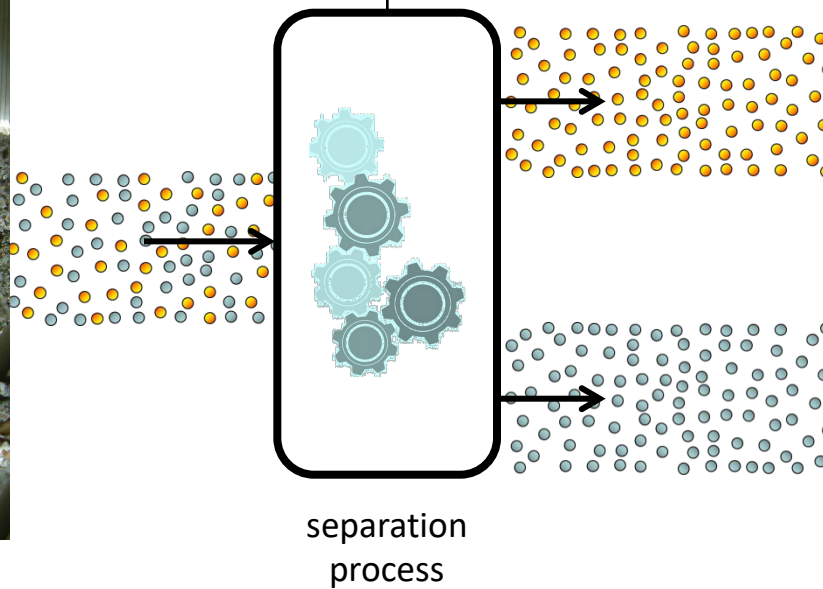
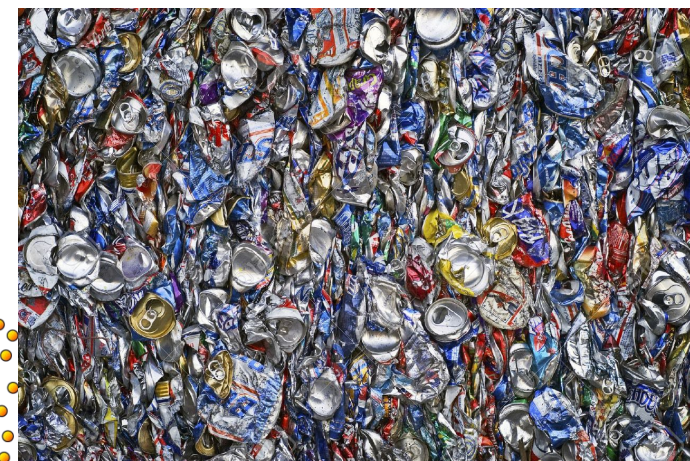
Plantas de dessalinização

Egito->



Concentrador de caldo / vinhaça / sistemas de dessalinização





alto nível de
desordem

baixo nível de
desordem

PERGUNTA RETÓRICA:

A PARTIR DE QUAL SISTEMA É POSSÍVEL
OBTER A MAIOR QUANTIDADE DE
ENERGIA MECÂNICA ?

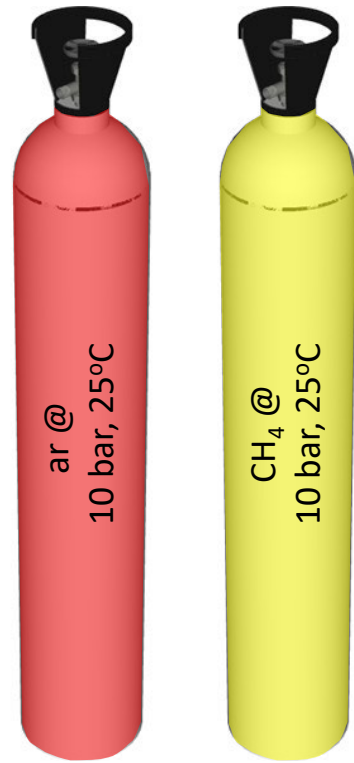
Attention to
Filler Words



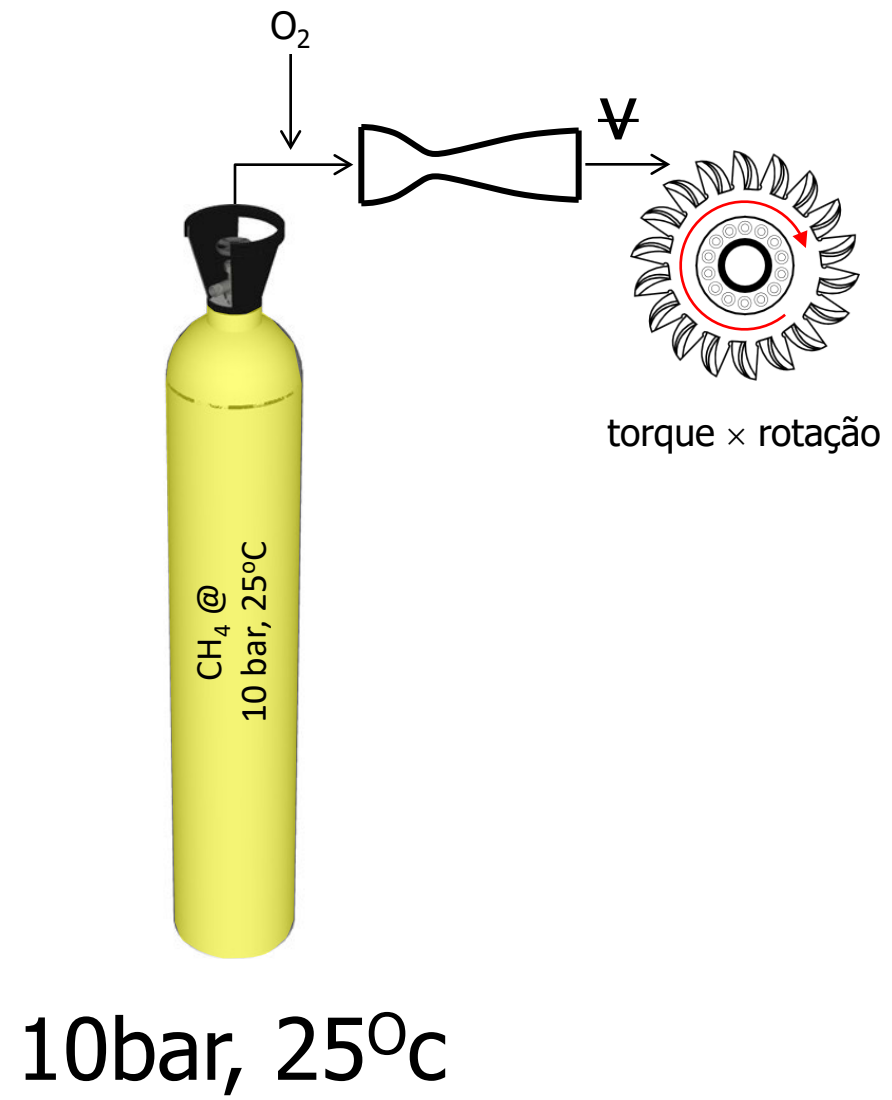


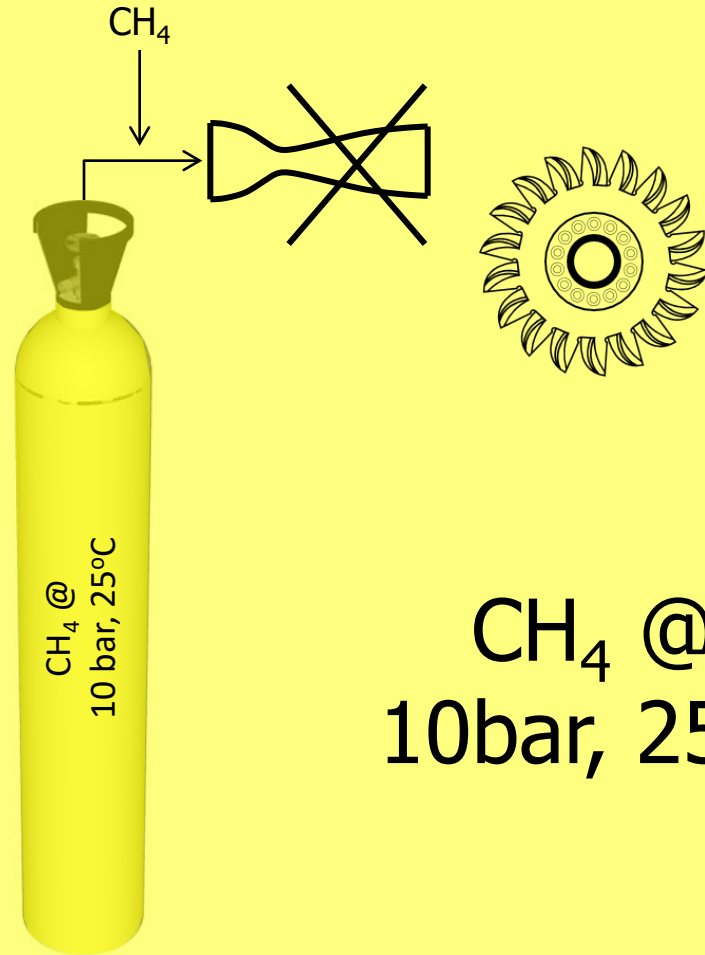


ar @
10bar, 25°C



10bar, 25^oc





CH_4 @
10bar, 25°C

10bar, 25°C

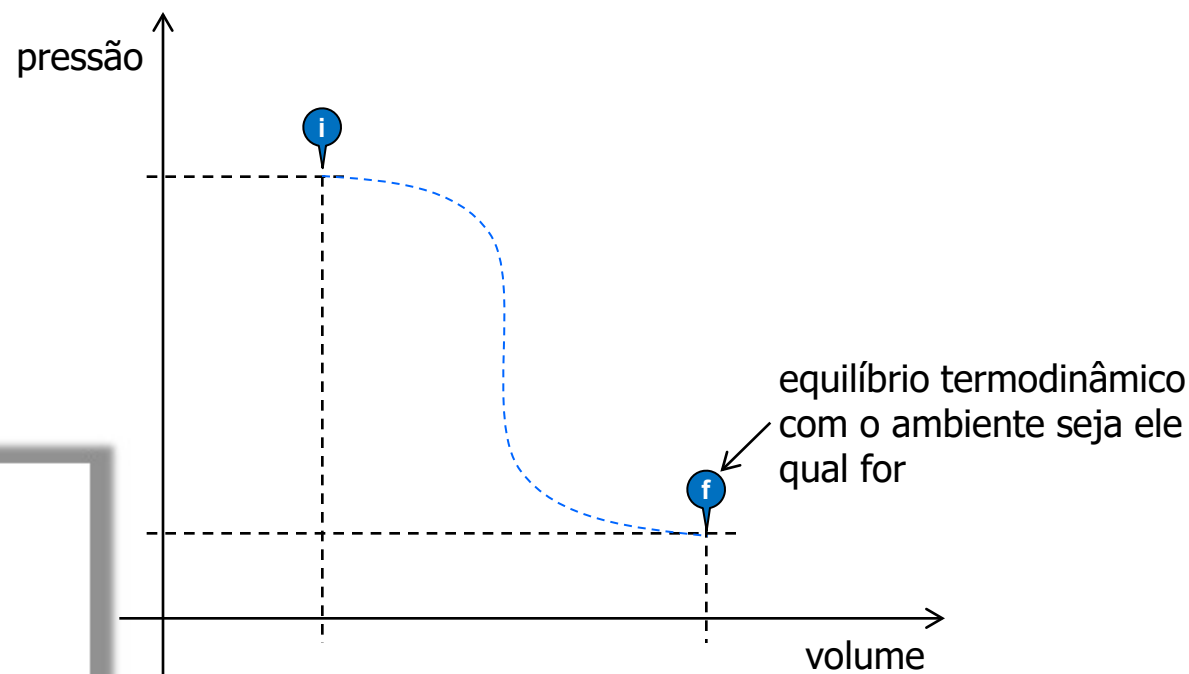
CONCLUSÃO:
a capacidade de geração de trabalho
mecânico é uma propriedade COMBINADA
estado/ambiente

Attention to
Filler Words



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

A máxima quantidade de trabalho mecânico que se pode obter de um sistema é gerada numa transformação reversível até que seja alcançado o equilíbrio com o ambiente...

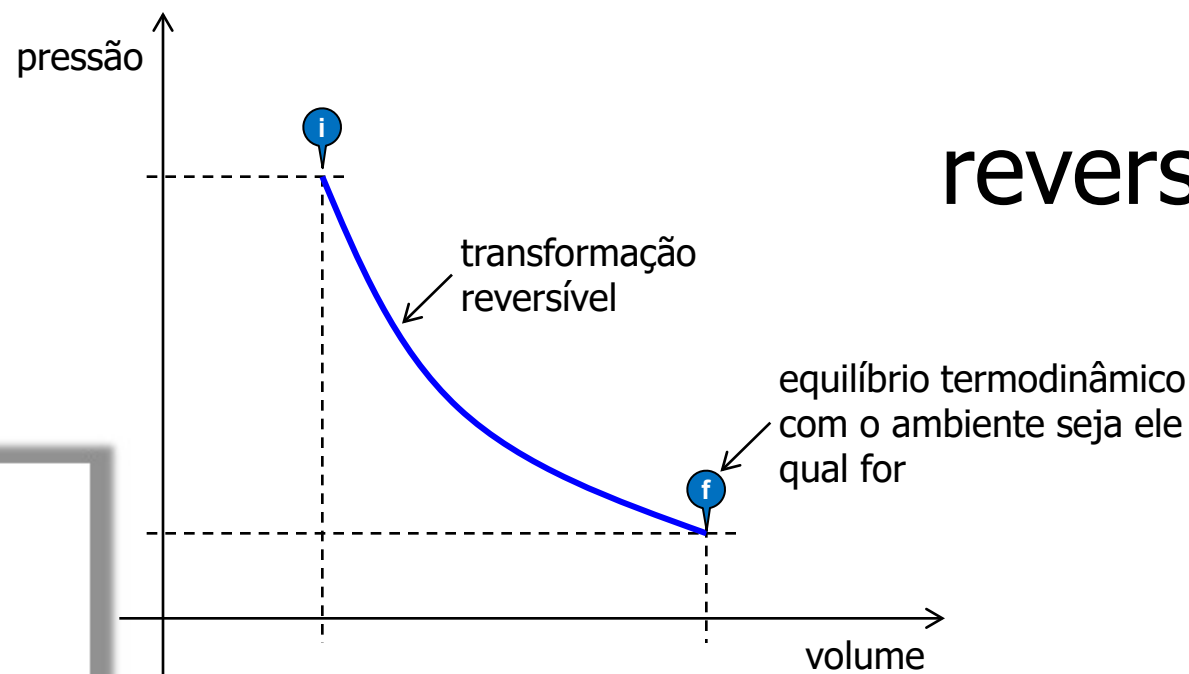


→ W_{\max} ???



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

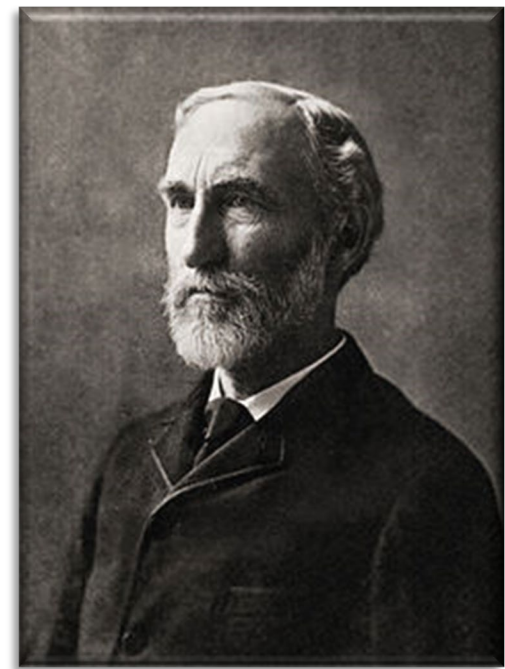
A máxima quantidade de trabalho mecânico que se pode obter de um sistema é gerada numa transformação reversível até que seja alcançado o equilíbrio com o ambiente...



reversível $\rightarrow W_{\max}$!!!!

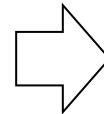
DEFINIÇÕES

Potencial de trabalho útil: é a máxima quantidade de energia mecânica útil que se poderia obter de um sistema, o restante sendo inevitavelmente perdido devido às implicações da 2ª lei



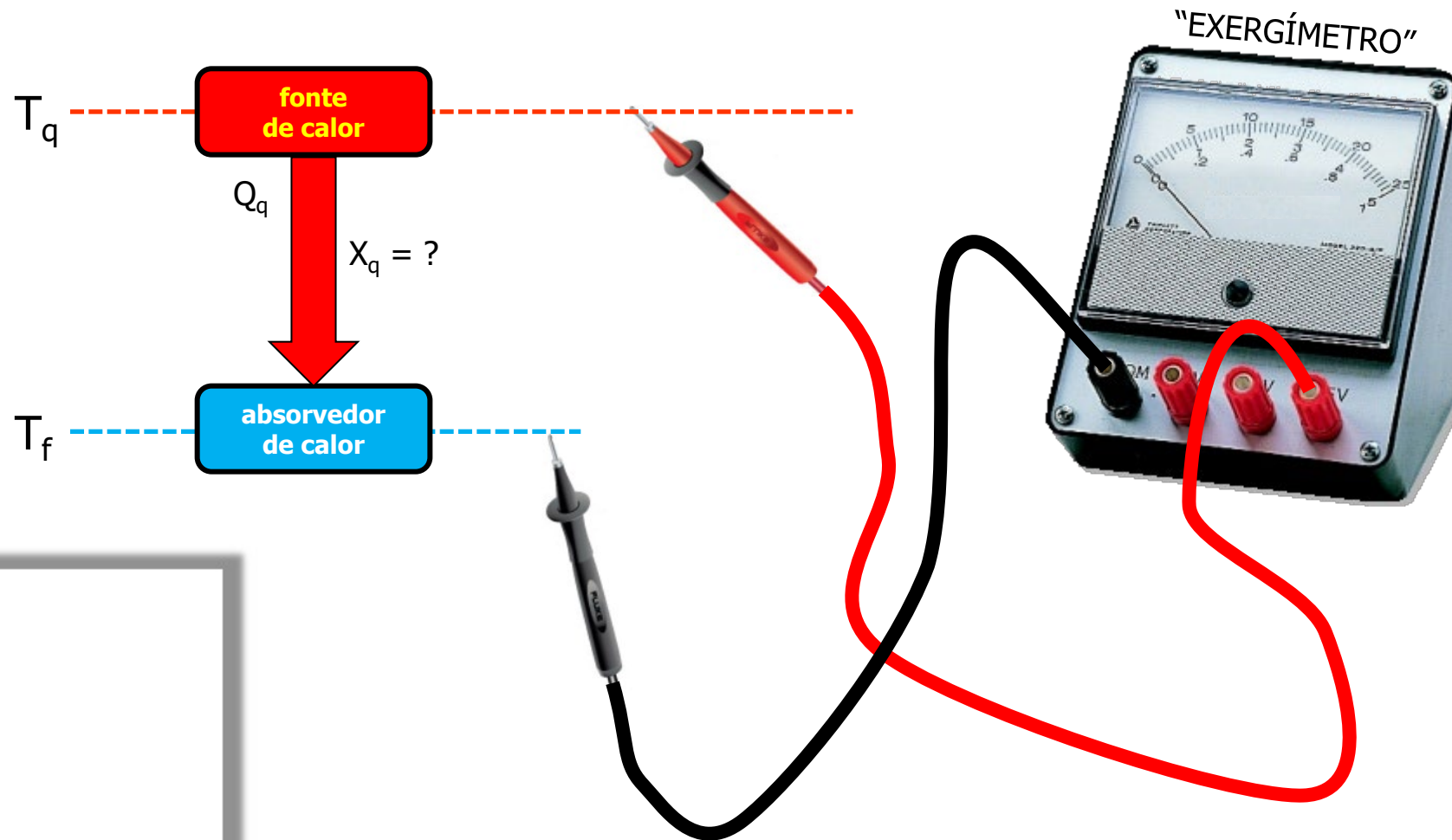
J. Willard Gibbs

EXERGIA

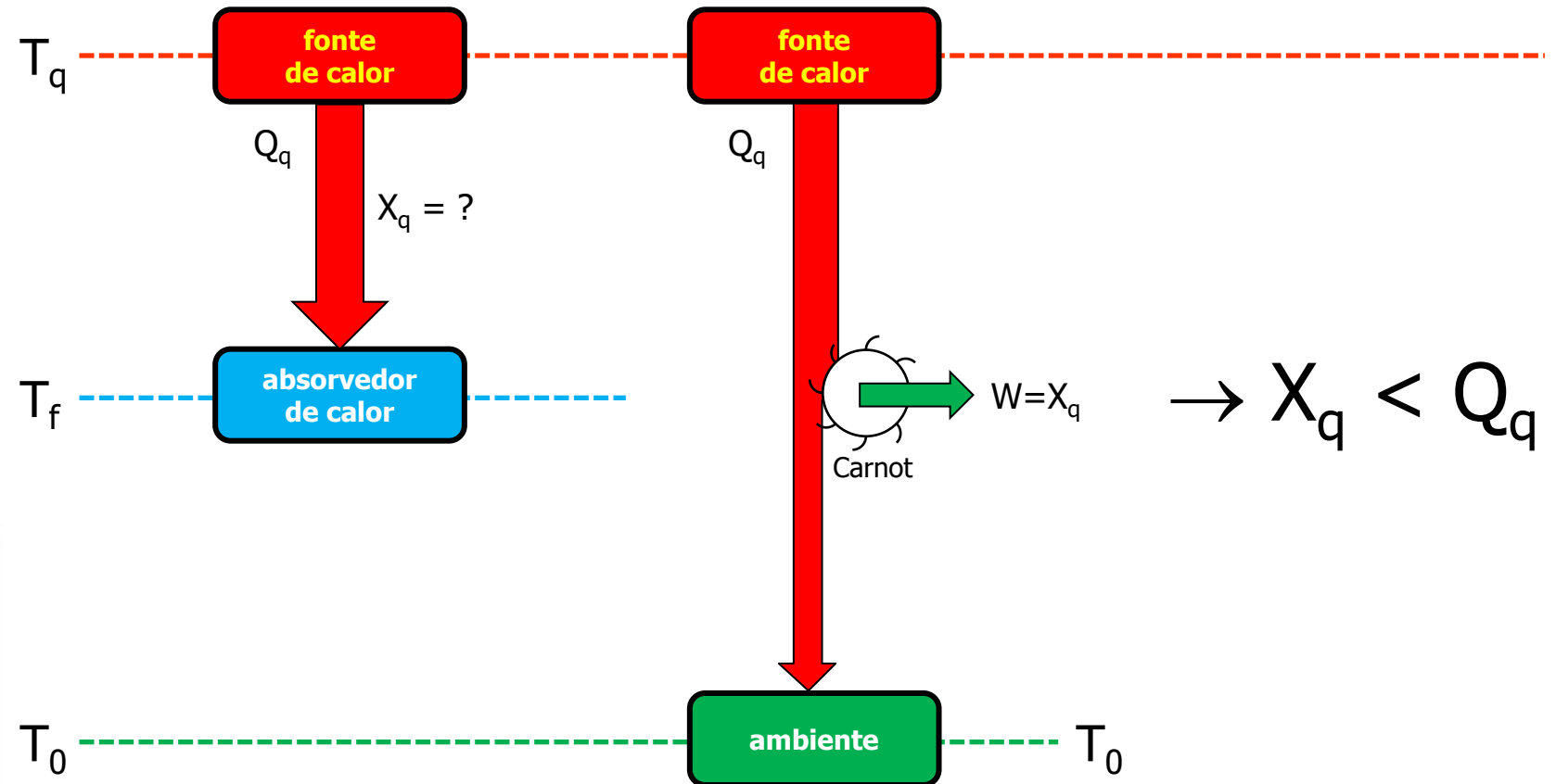


Energia disponível
Energia exergética
Disponibilidade
Trabalho reversível
Etc.

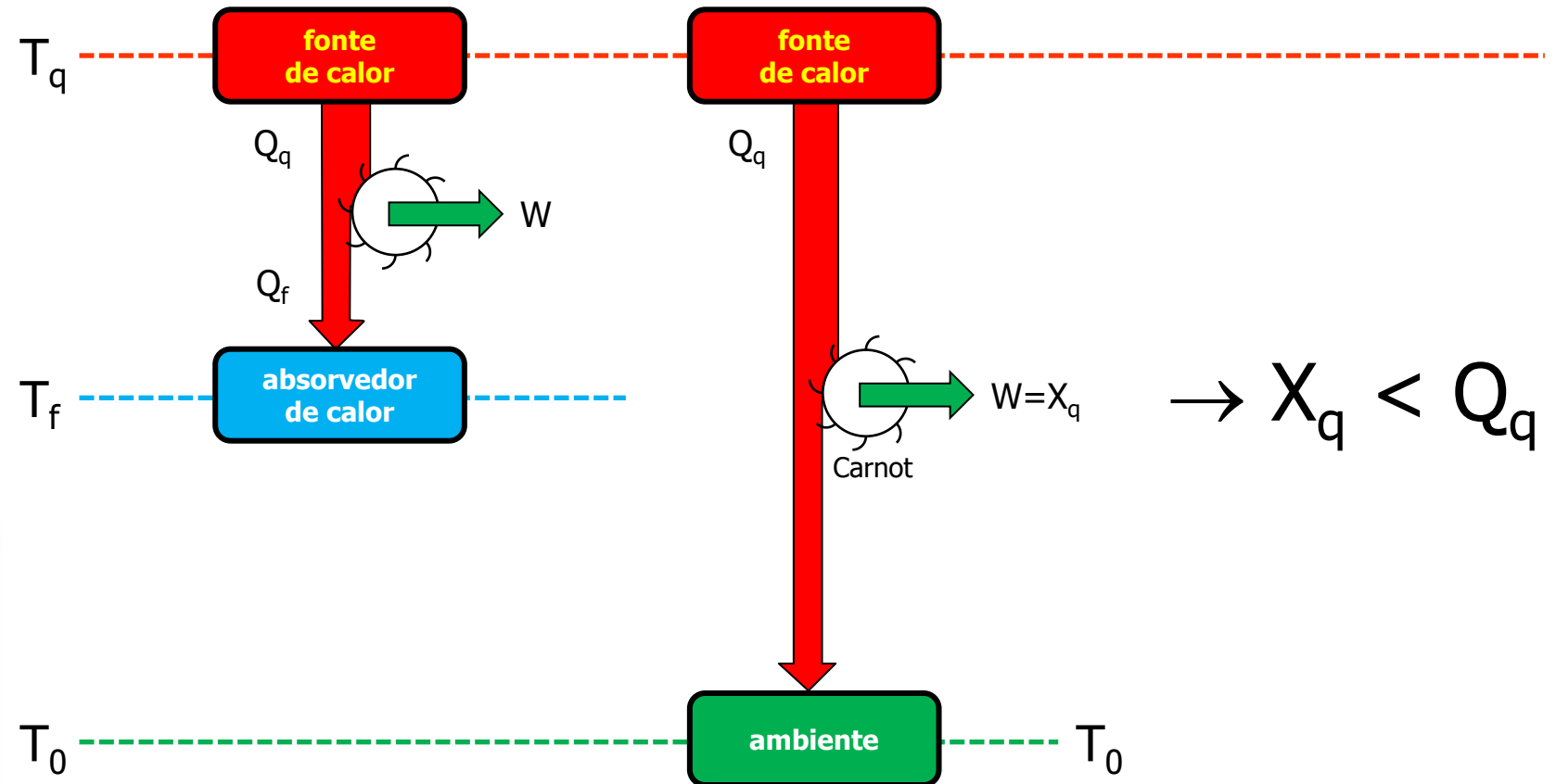
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



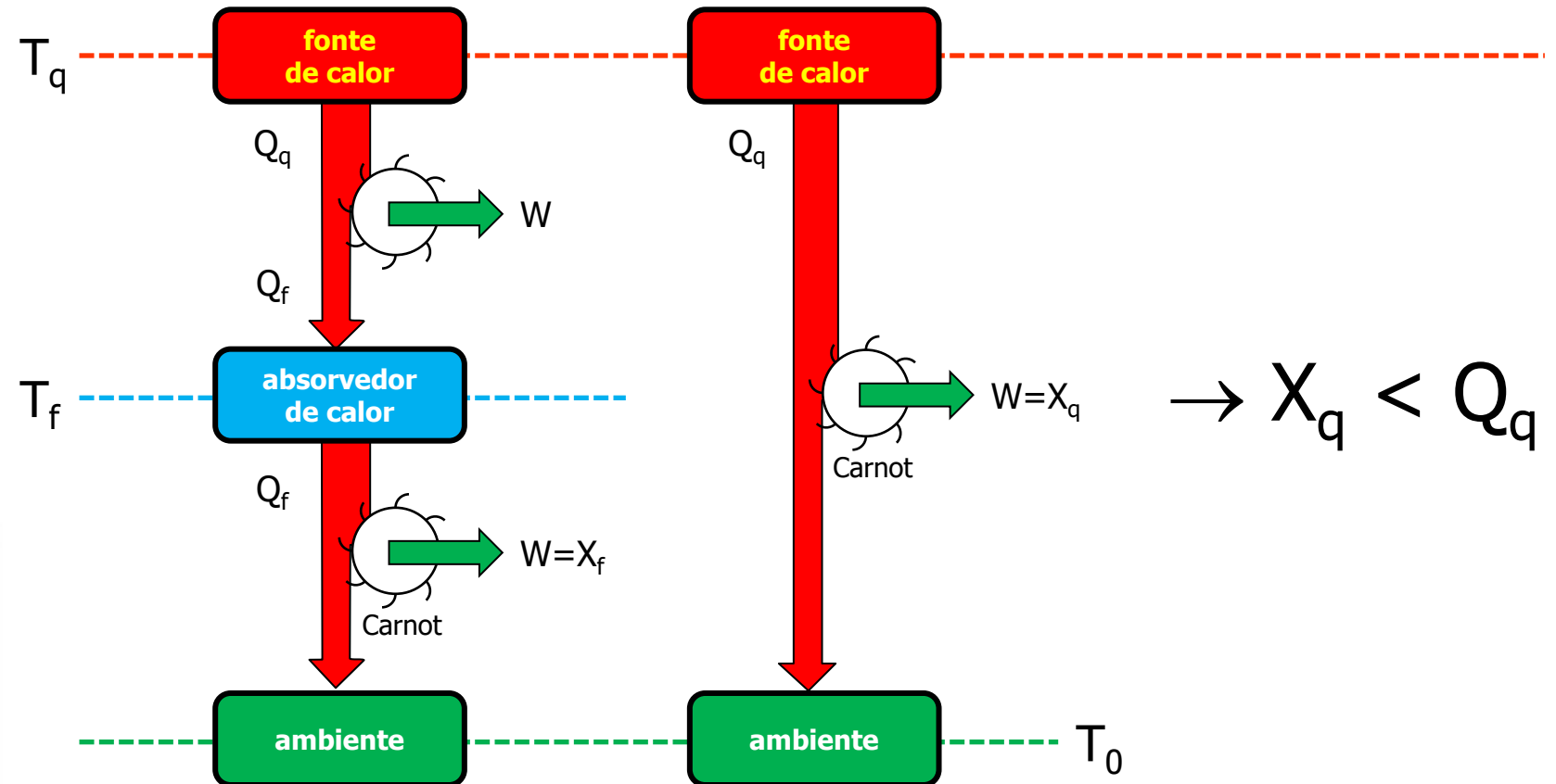
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



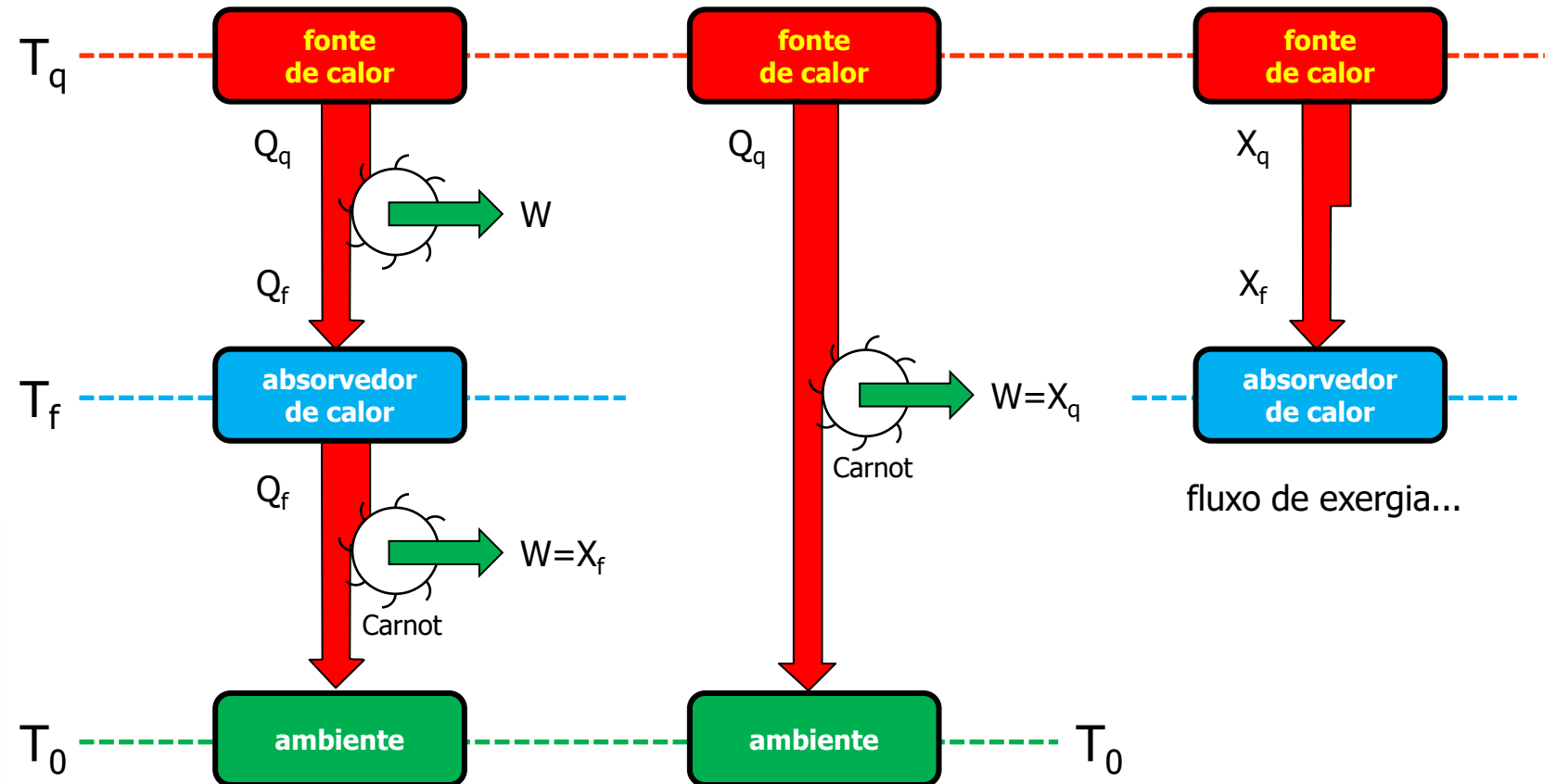
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



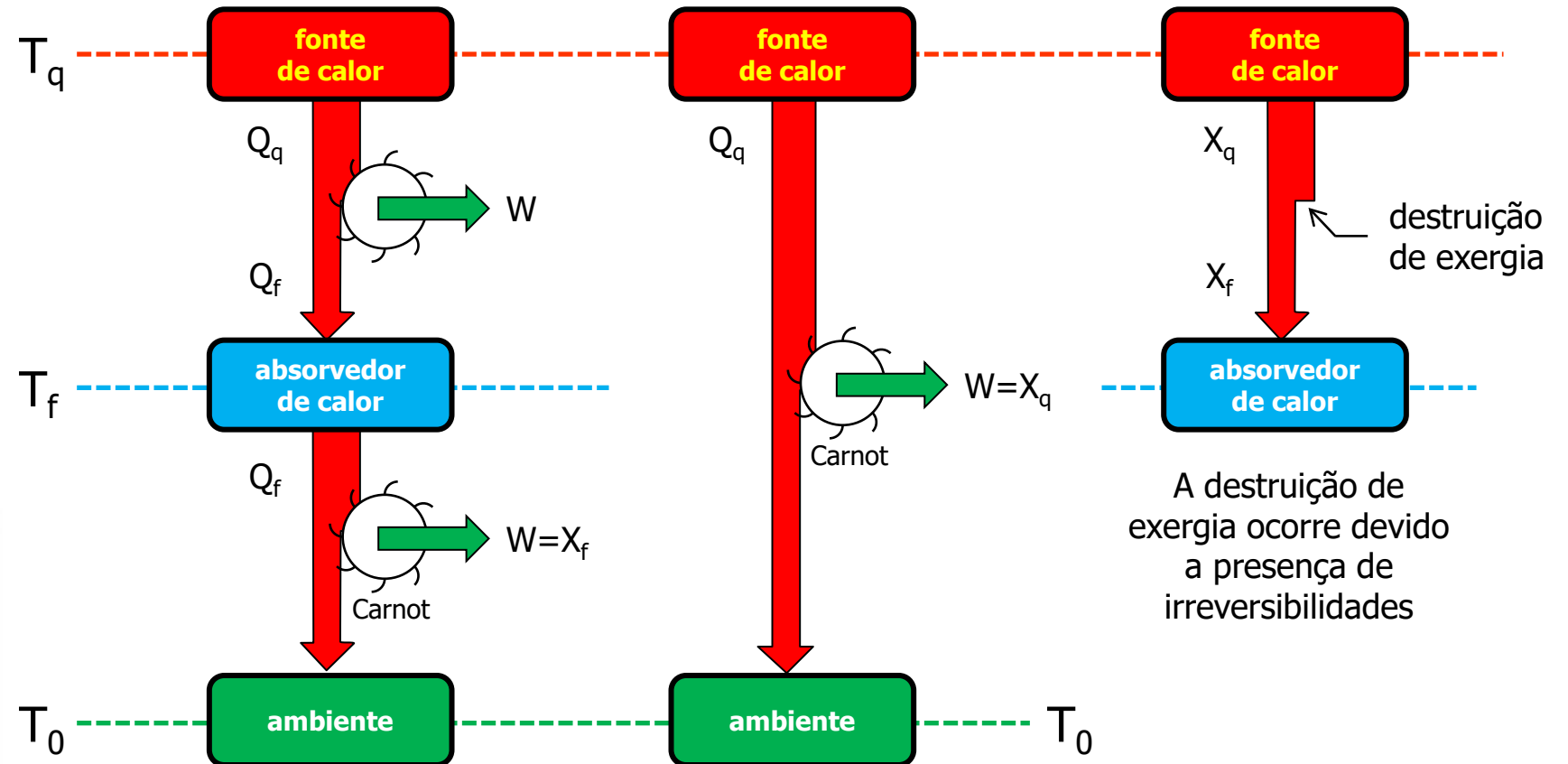
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



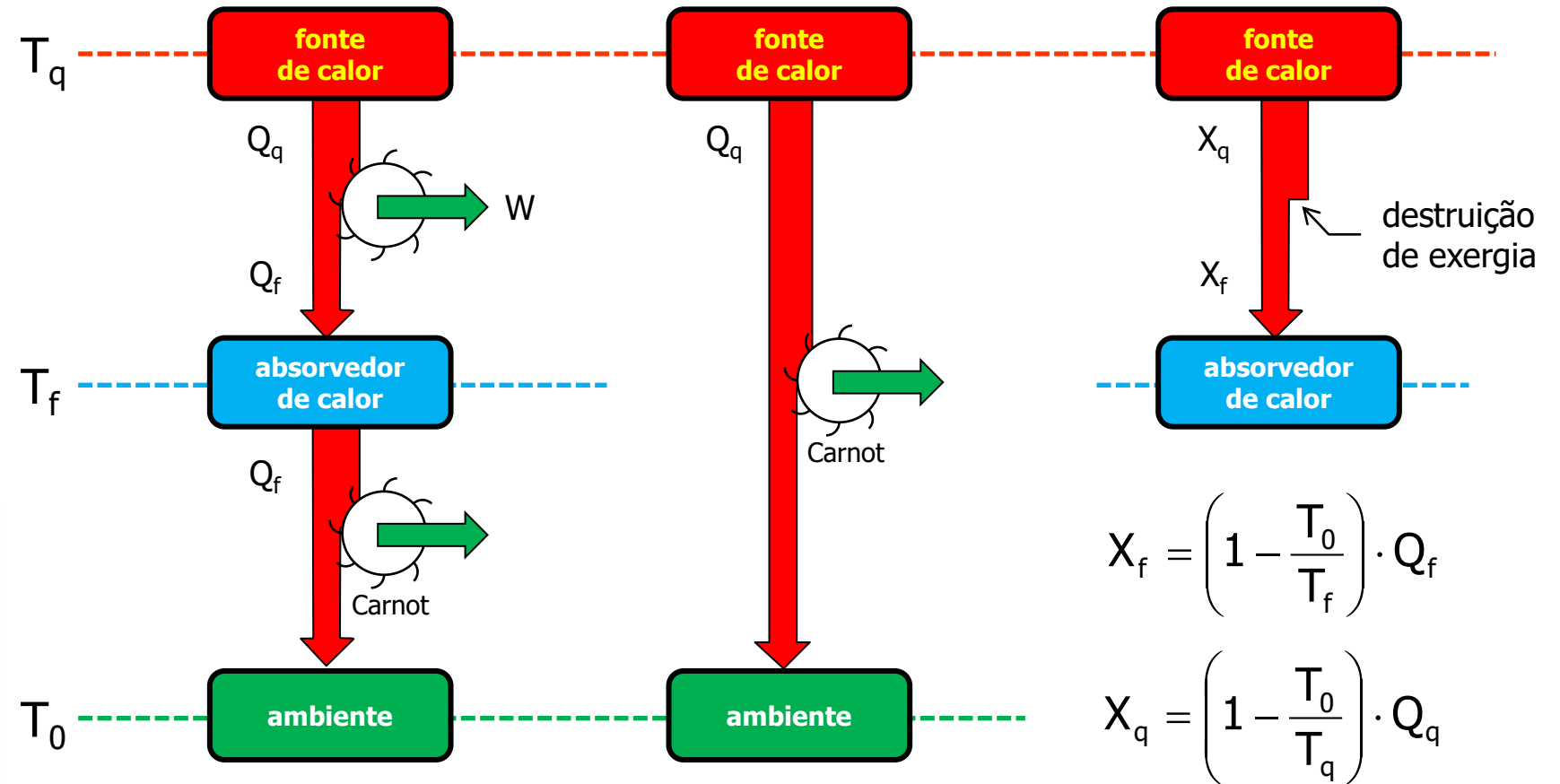
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



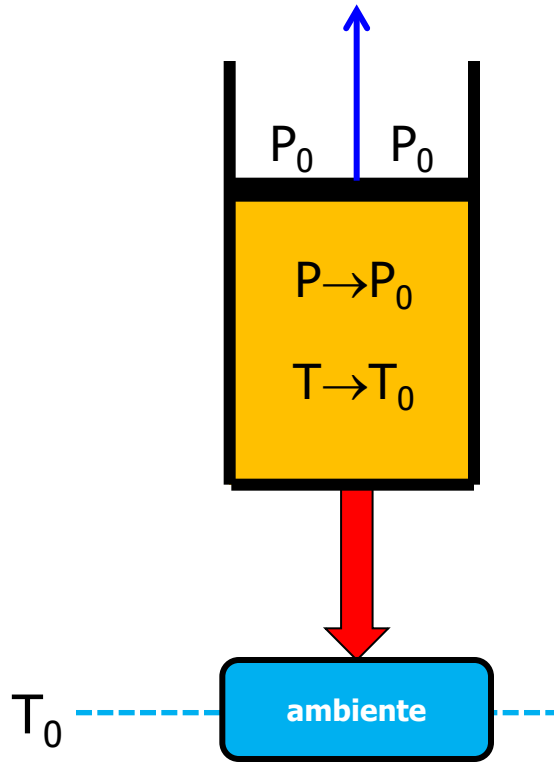
O conteúdo exergético de uma fonte de calor é igual ao trabalho produzido por uma máquina reversível operando entre a fonte e o ambiente.



Análise de um sistema fechado...

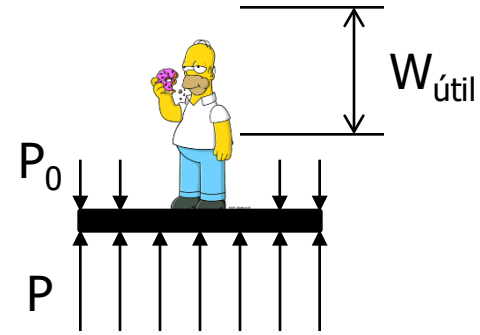
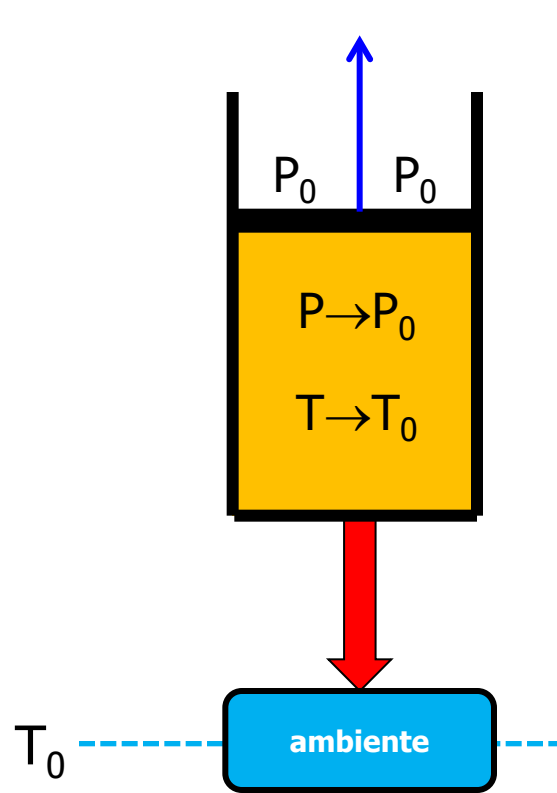
Attention to
Filler Words

Variação de exergia de um sistema fechado



Expansão do sistema com exportação de trabalho até alcançar o equilíbrio com o ambiente...

Variação de exergia de um sistema fechado



$$W = W_{\text{útil}} + W_{\text{ambiente}}$$

$$\delta W = P \cdot dV$$

trabalho que sai do sistema

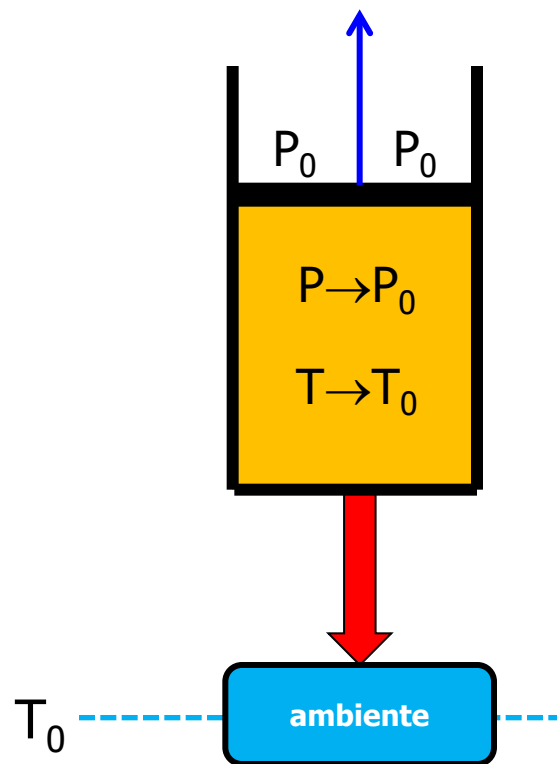
$$\delta W = (P - P_0) \cdot dV + P_0 \cdot dV$$

$$\delta W = \delta W_{\text{útil}} + P_0 \cdot dV$$

$$W = W_{\text{útil}} + \int P_0 \cdot dV$$

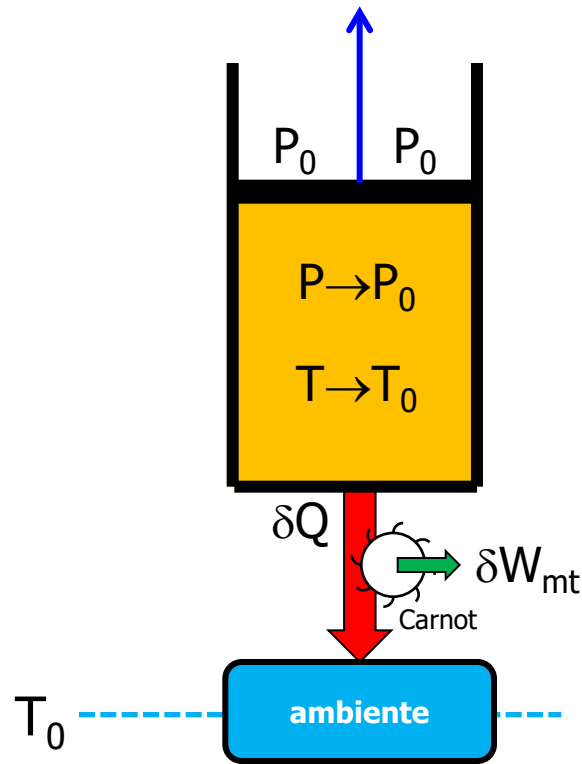
$$W = W_{\text{útil}} + P_0 \cdot (V_2 - V_1)$$

Variação de exergia de um sistema fechado



$$\delta W = \delta W_{\text{útil}} + P_0 \cdot dV$$

Variação de exergia de um sistema fechado



$$\delta W = \delta W_{\text{útil}} + P_0 \cdot dV$$

$$\delta Q^{\text{rev}} = T \cdot dS$$

$$\delta W_{\text{mt}} = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \cdot \delta Q$$

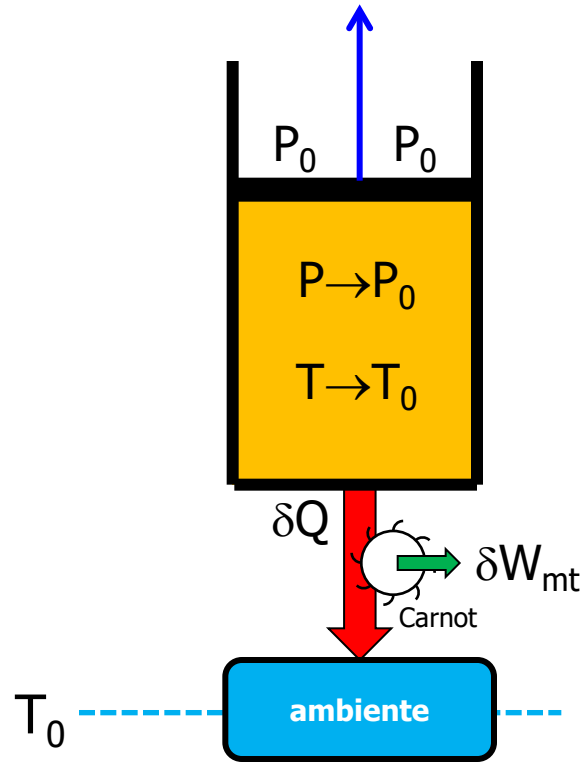
$$\delta Q = \delta W_{\text{mt}} + T_0 \cdot ds$$

$$dU = -\delta Q - \delta W$$

Obs.: calor saindo do sistema

$$dU = -(\delta W_{\text{mt}} + T_0 dS) - (\delta W_{\text{útil}} + P_0 dV)$$

Variação de exergia de um sistema fechado



$$\Rightarrow dU = -(\delta W_{mt} + T_0 dS) - (\delta W_{\acute{u}til} + P_0 dV)$$

$$\delta W_{\acute{u}til total} = \delta W_{mt} + \delta W_{\acute{u}til}$$

$$\delta W_{\acute{u}til total} = -dU - P_0 dV - T_0 dS$$

$$\int_{inicial}^0 \delta W_{\acute{u}til total} = \dots$$

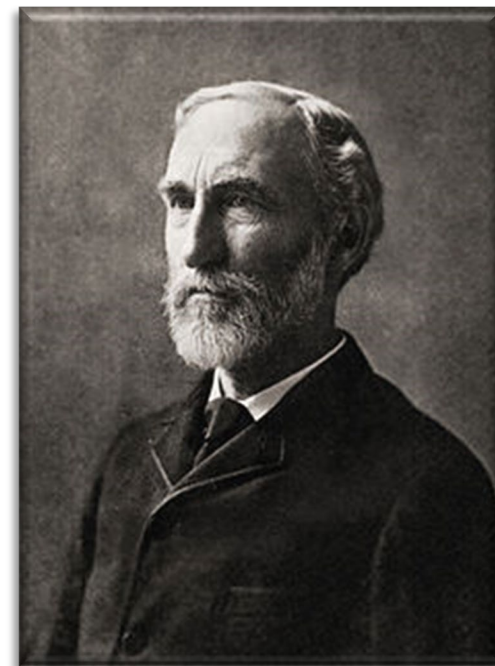
$$\Rightarrow W_{\acute{u}til total} = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0)$$

DEFINIÇÕES

Exergia...

$$X^{\text{def}} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$

energia disponível
energia exergética
disponibilidade
trabalho reversível
etc.



J. Willard Gibbs

DEFINIÇÕES

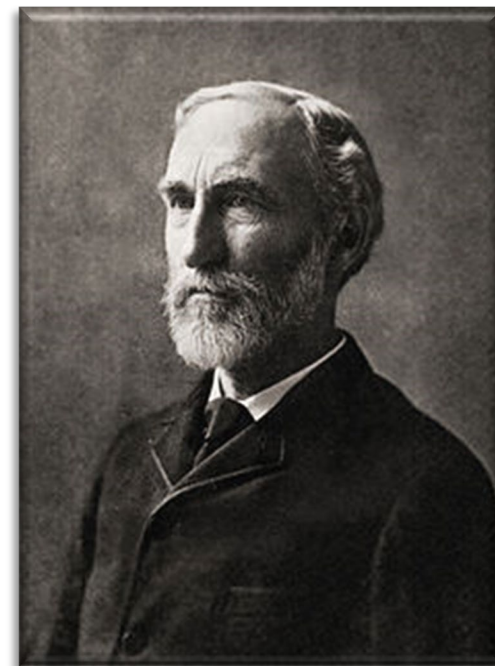
Exergia...

$$X^{\text{def}} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$

efeito do ambiente

propriedades do sistema
quando em equilíbrio com
o ambiente

energia disponível
energia exergética
disponibilidade
trabalho reversível
etc.



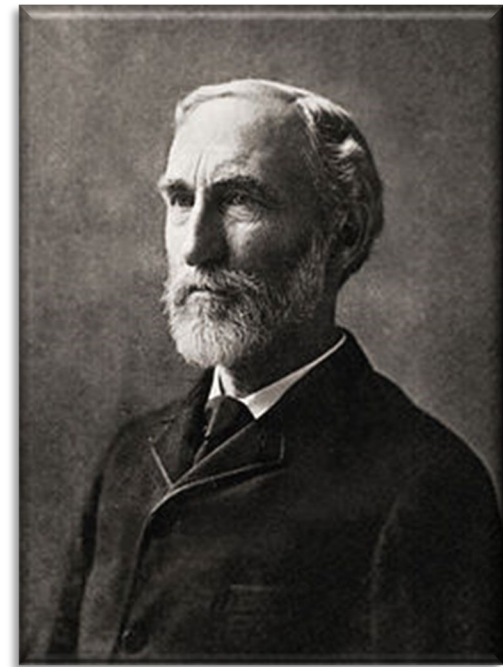
J. Willard Gibbs

DEFINIÇÕES

Exergia...

$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}}$$

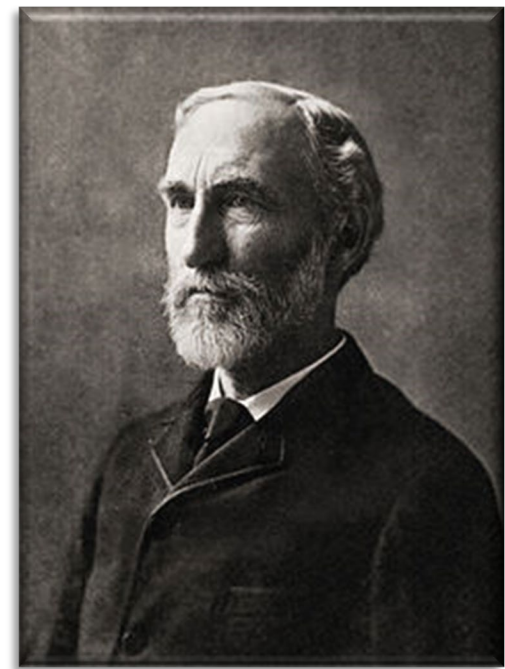
energia disponível
energia exergética
disponibilidade
trabalho reversível
etc.



J. Willard Gibbs

DEFINIÇÕES

energia disponível
energia exergética
disponibilidade
trabalho reversível
etc.



J. Willard Gibbs

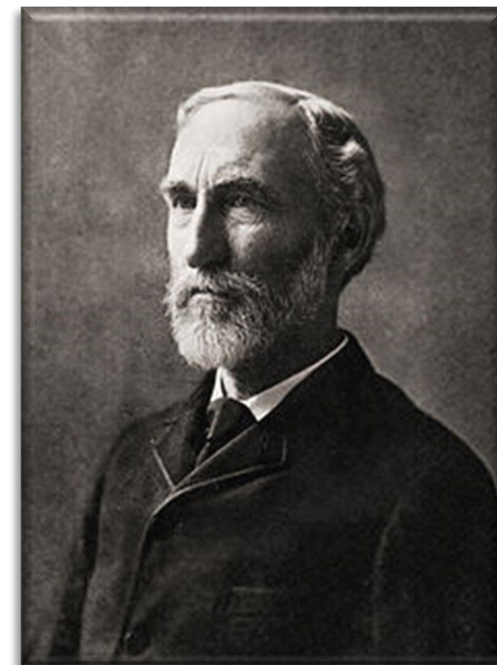
Exergia...

$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}}$$

$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}} + \underbrace{EP + EC}_{\text{exergia mecânica}}$$

DEFINIÇÕES

energia disponível
energia exergética
disponibilidade
trabalho reversível
etc.



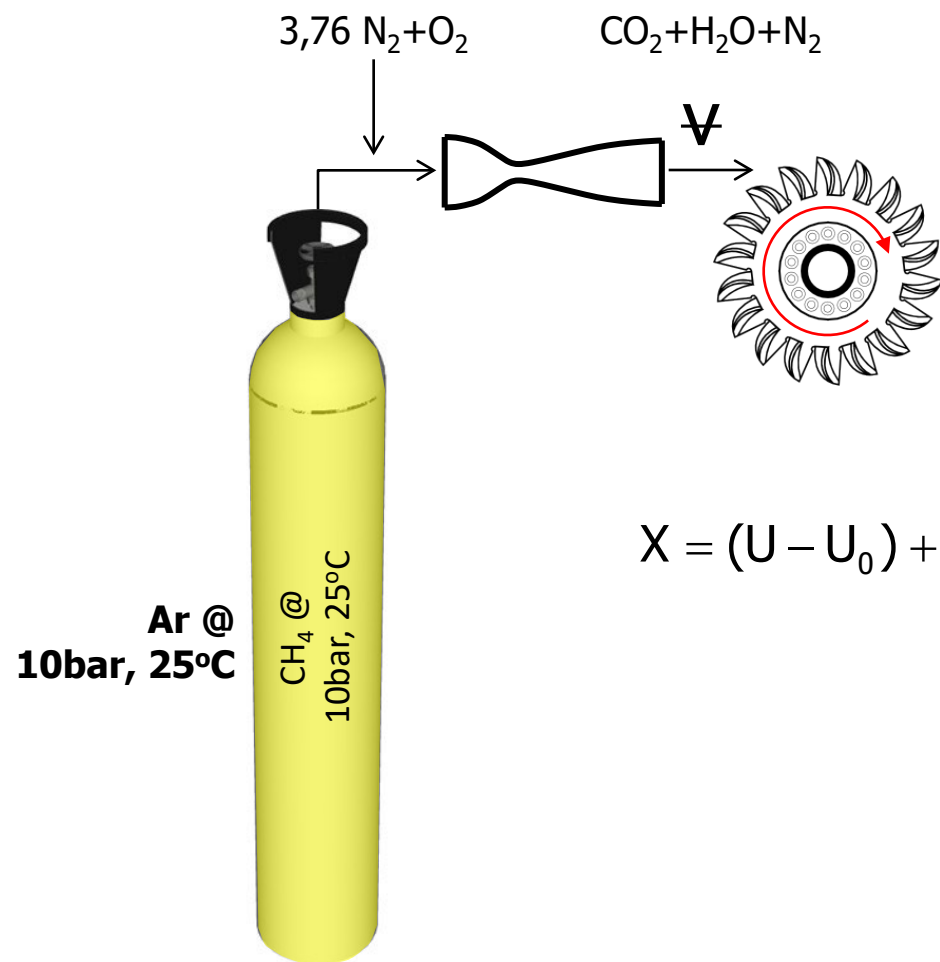
J. Willard Gibbs

Exergia...

$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}}$$

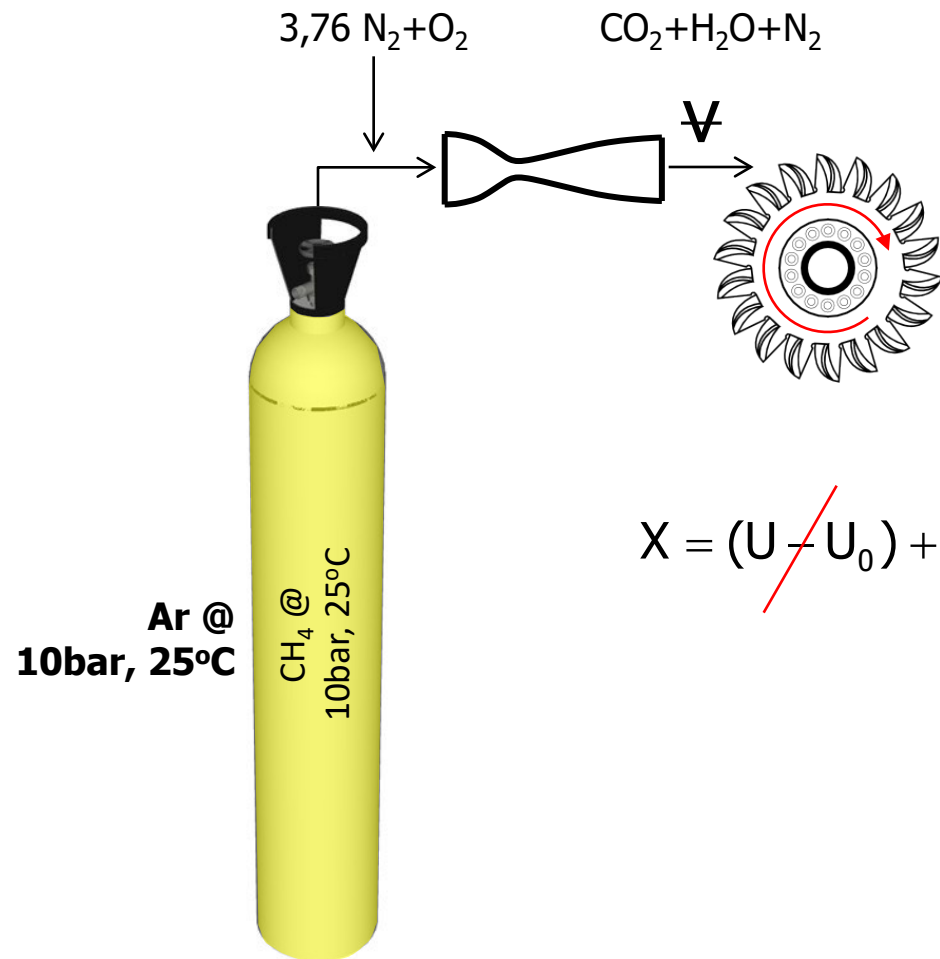
$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}} + \underbrace{EP + EC}_{\text{exergia mecânica}}$$

$$X^{\text{def}} = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}} + \underbrace{EP + EC}_{\text{exergia mecânica}} + \underbrace{EQ}_{\text{exergia química}}$$



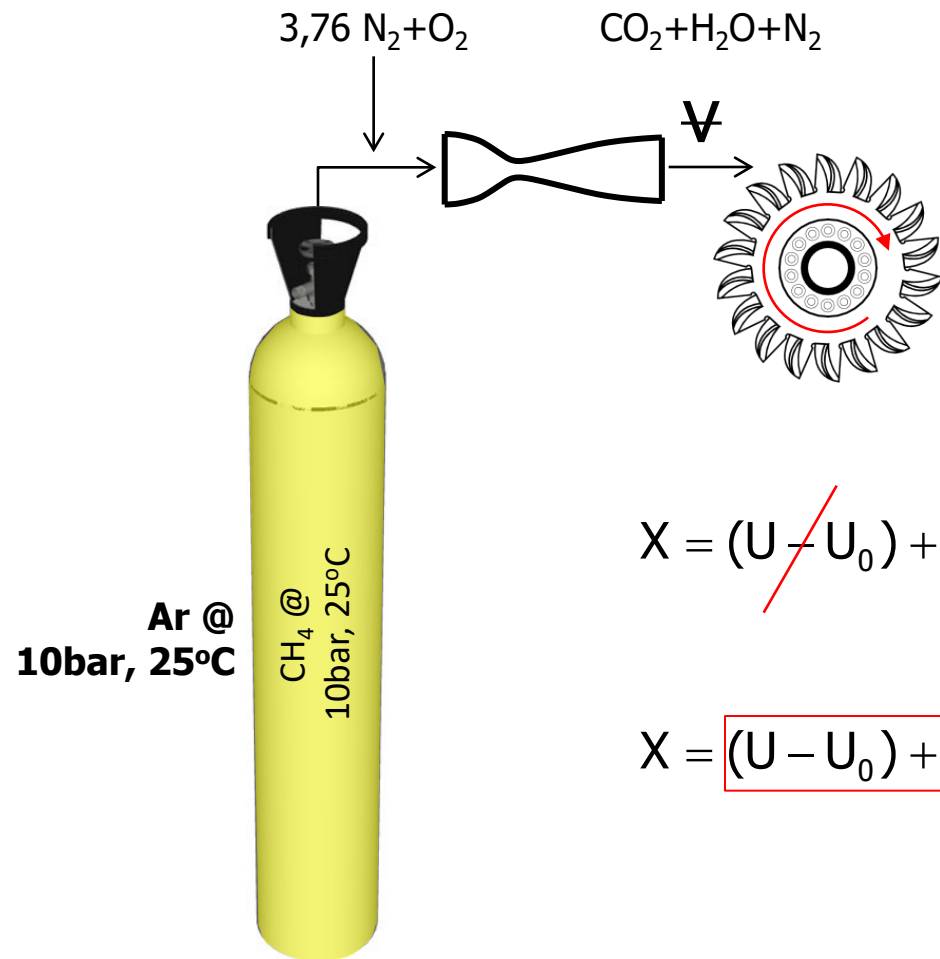
Exergia química é definida como o máximo trabalho que pode ser obtido quando o sistema reage quimicamente com as substâncias constituintes do ambiente.

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + EP + EC + EQ$$



Exergia química é definida como o máximo trabalho que pode ser obtido quando o sistema reage quimicamente com as substâncias constituintes do ambiente.

$$X = (\cancel{U - U_0}) + P_0(\cancel{V - V_0}) - T_0(\cancel{S - S_0}) + \cancel{EP} + \cancel{EC} + EQ$$

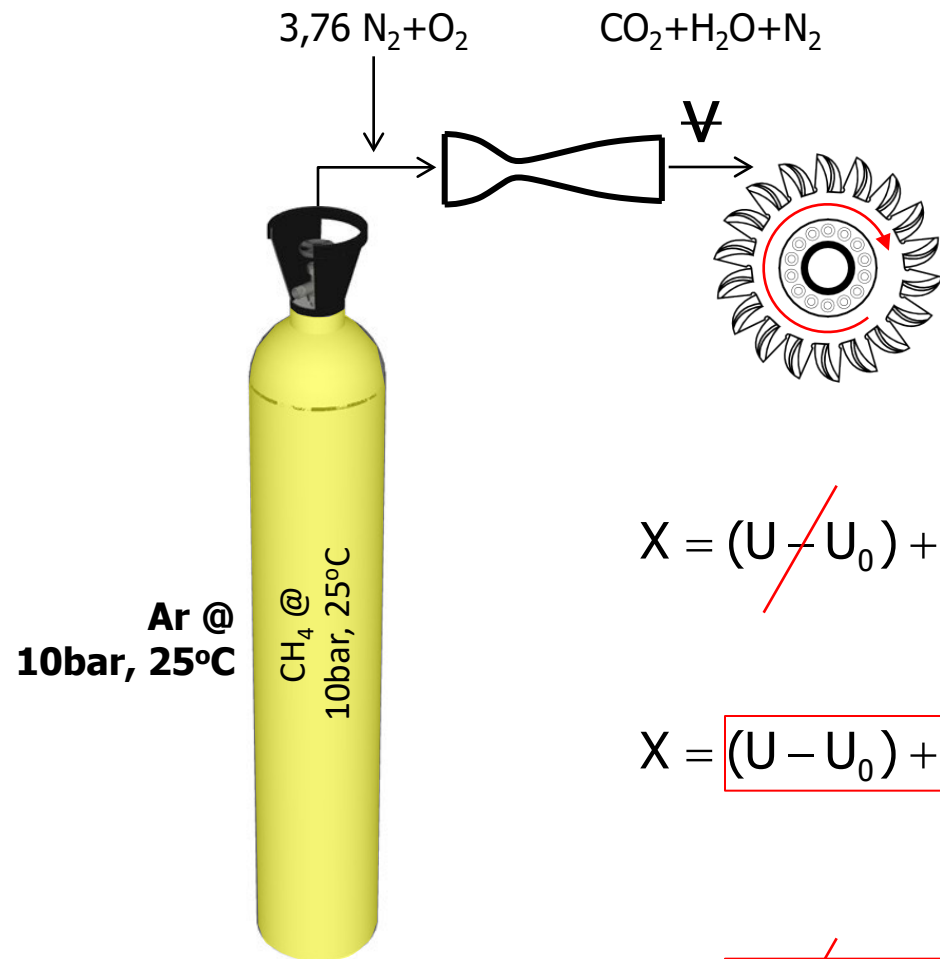


Exergia química é definida como o máximo trabalho que pode ser obtido quando o sistema reage quimicamente com as substâncias constituintes do ambiente.

$$X = (\cancel{U - U_0}) + P_0(\cancel{V - V_0}) - T_0(\cancel{S - S_0}) + \cancel{EP} + \cancel{EC} + EQ$$

$$X = \boxed{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)} + \cancel{EP} + \cancel{EC} + \boxed{EQ}$$

↑

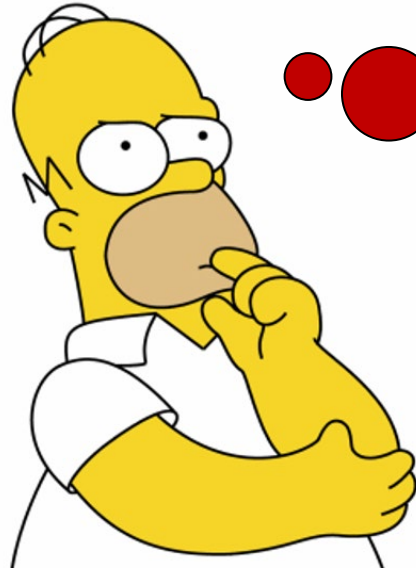


Exergia química é definida como o máximo trabalho que pode ser obtido quando o sistema reage quimicamente com as substâncias constituintes do ambiente.

$$X = (\cancel{U - U_0}) + P_0(\cancel{V - V_0}) - T_0(\cancel{S - S_0}) + \cancel{EP} + \cancel{EC} + EQ$$

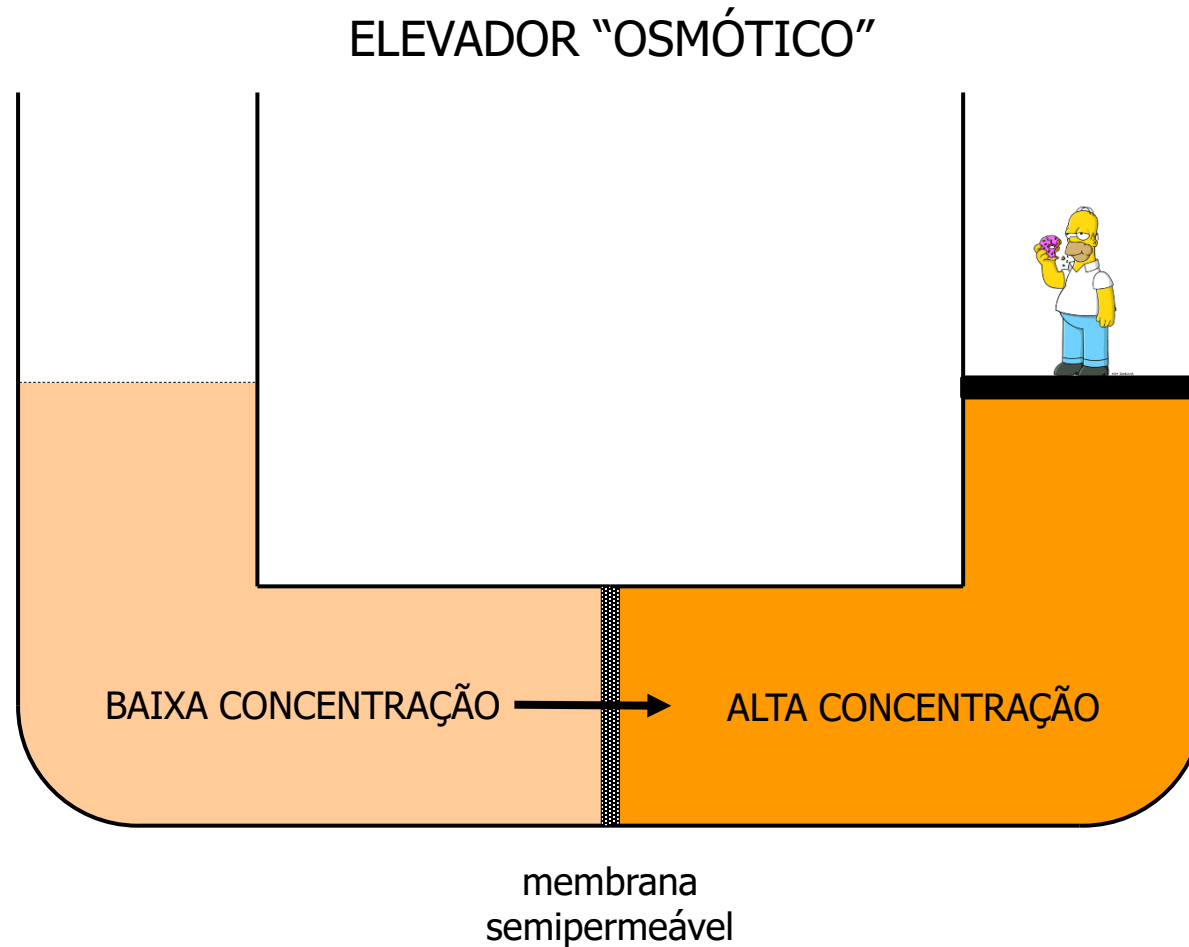
$$X = \boxed{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)} + \cancel{EP} + \cancel{EC} + \boxed{EQ}$$

$$X = \boxed{(\cancel{U - U_0}) + P_0(\cancel{V - V_0}) - T_0(\cancel{S - S_0})} + \cancel{EP} + \boxed{EC} + \cancel{EQ}$$

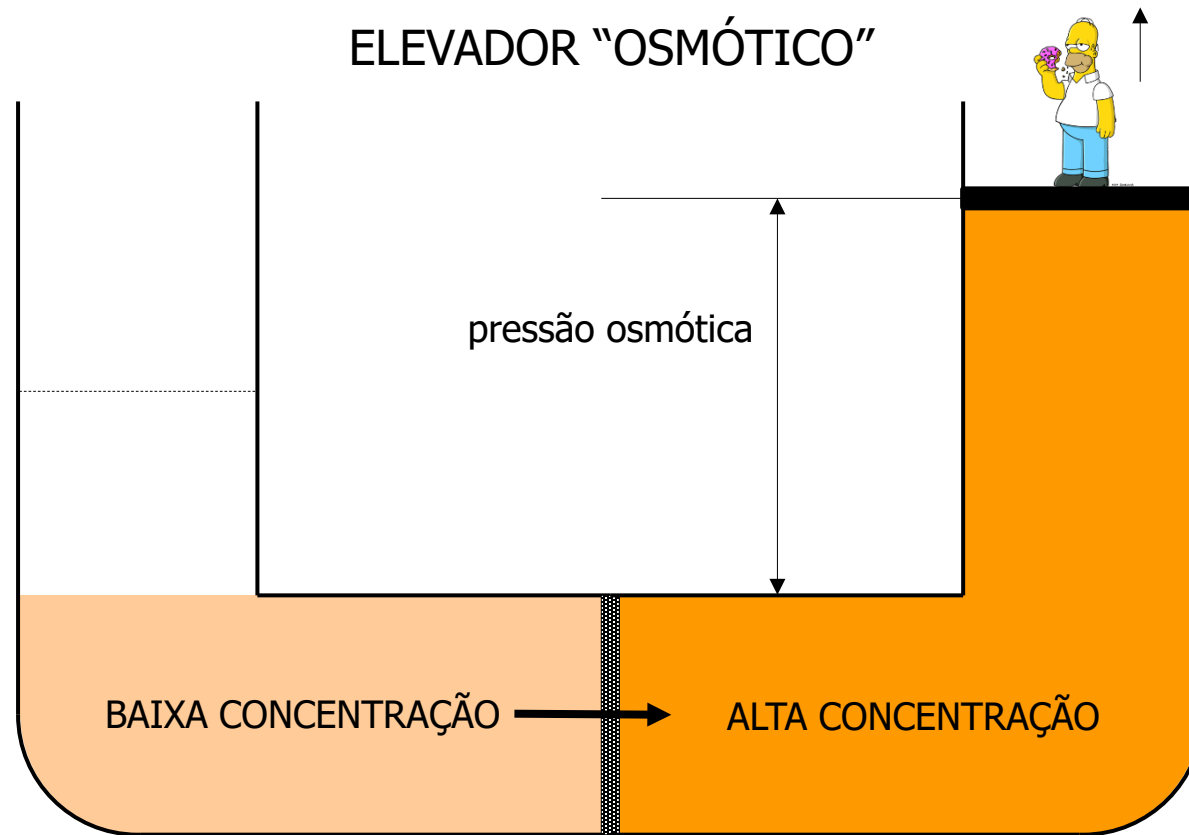


O potencial de gerar trabalho mecânico (energia organizada) existe quando há diferenças entre um sistema e o ambiente, seja entre as propriedades termodinâmicas, seja em termos de composição química...

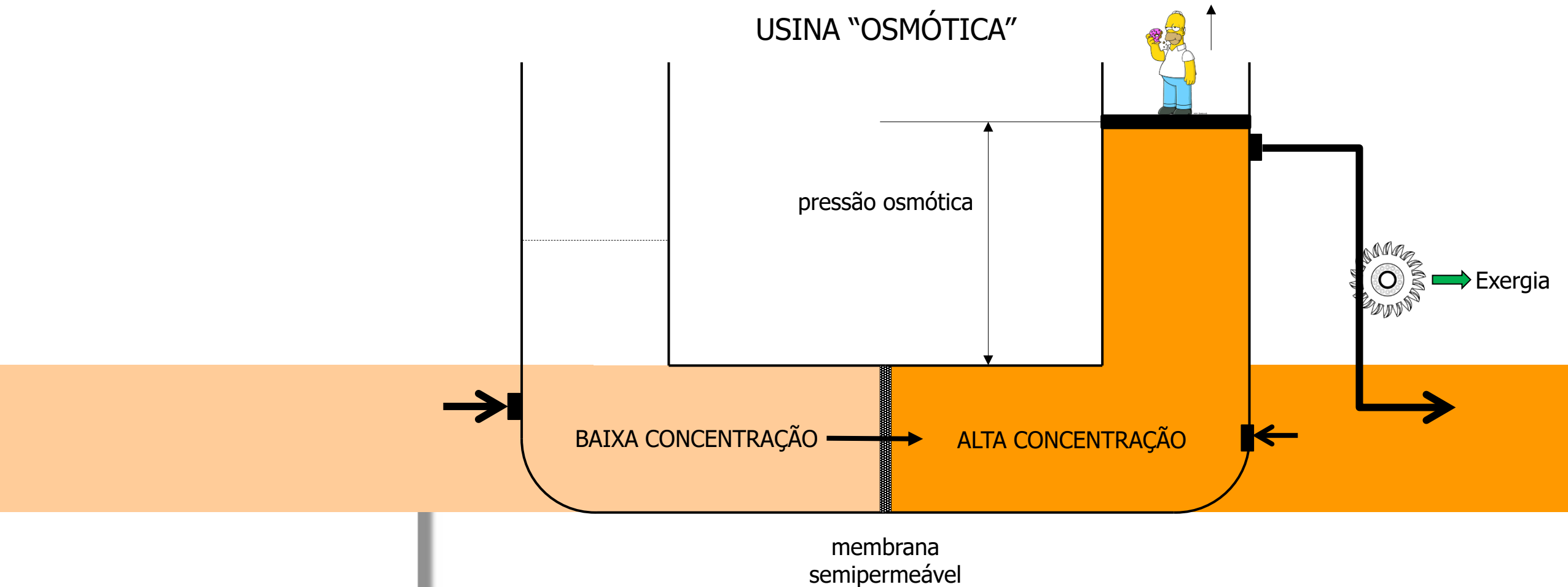
Potencial para geração de trabalho a partir da diferença de composição química



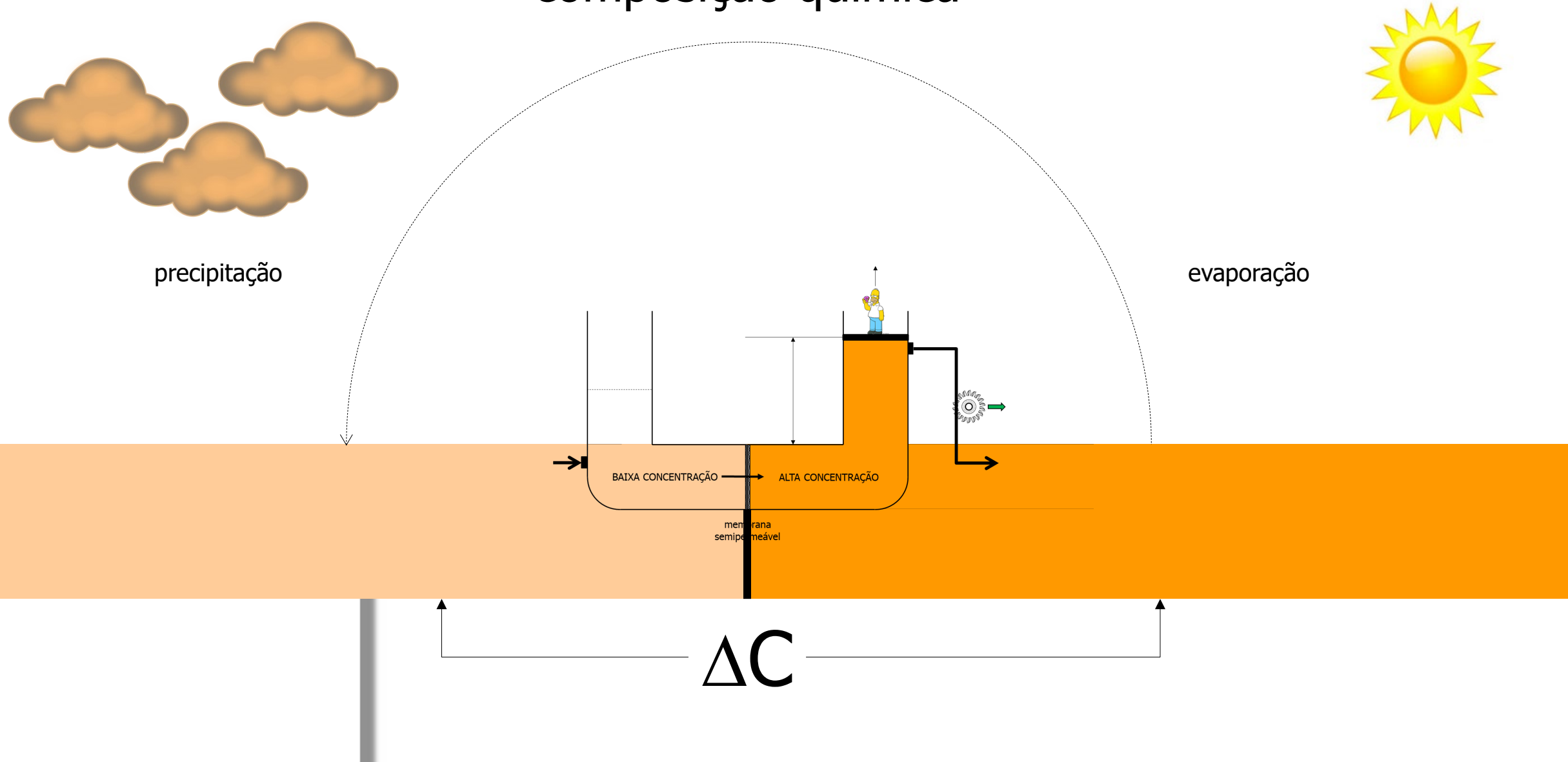
Potencial para geração de trabalho a partir da diferença de composição química

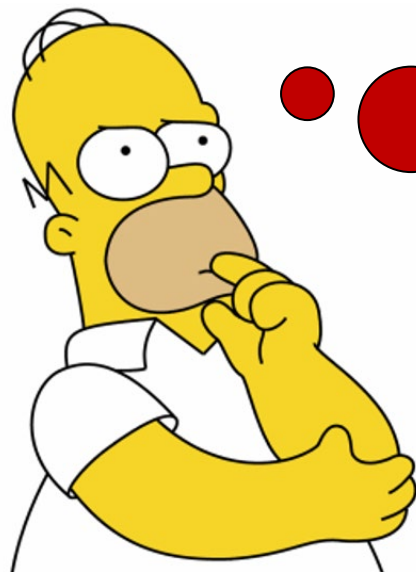


Potencial para geração de trabalho a partir da diferença de composição química

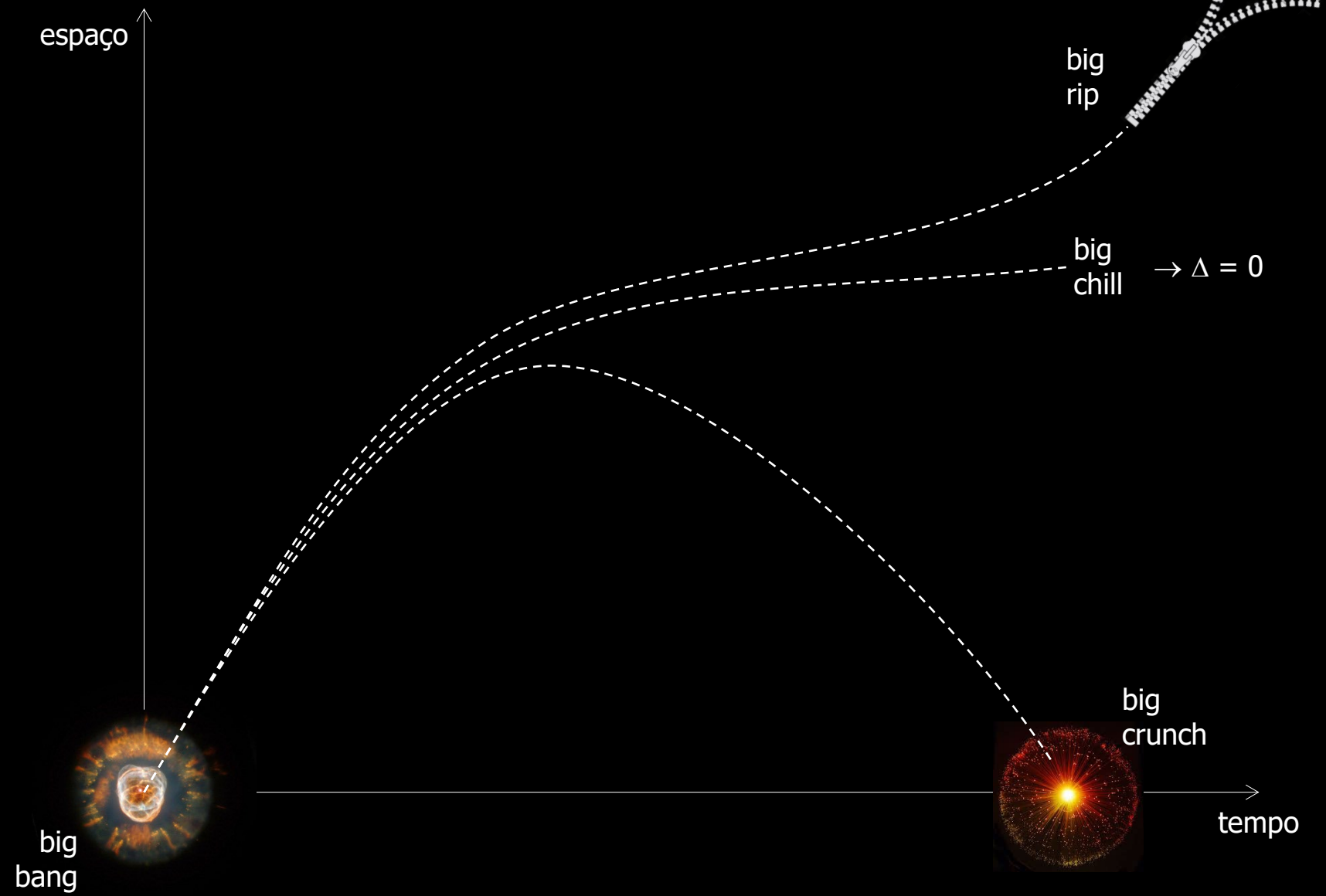


Potencial para geração de trabalho a partir da diferença de composição química





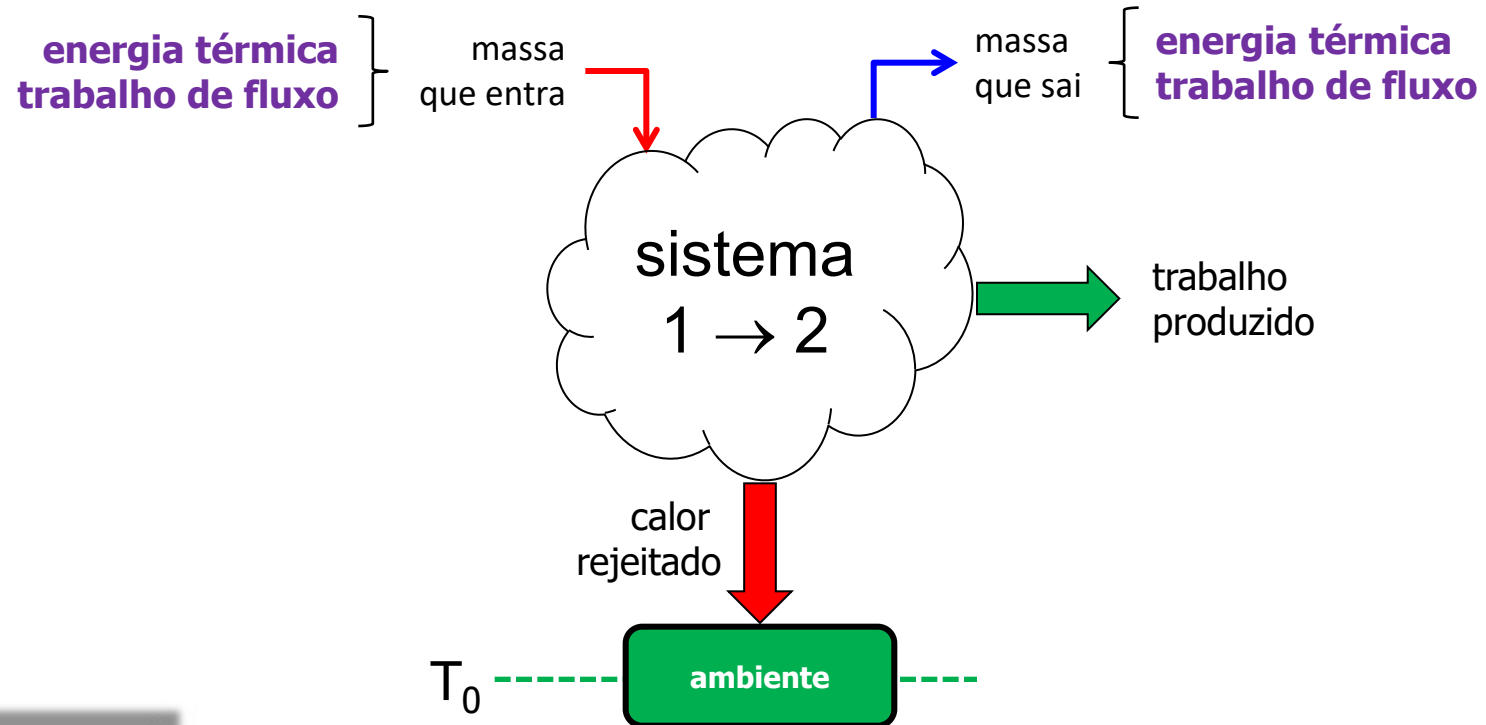
Mas se a entropia do universo sempre aumenta... se o cosmo evolui para o caos, isso significa que os sistemas e o ambiente tendem a se equalizar; pressões e temperaturas se igualam, as diferenças de composição química desaparecem...



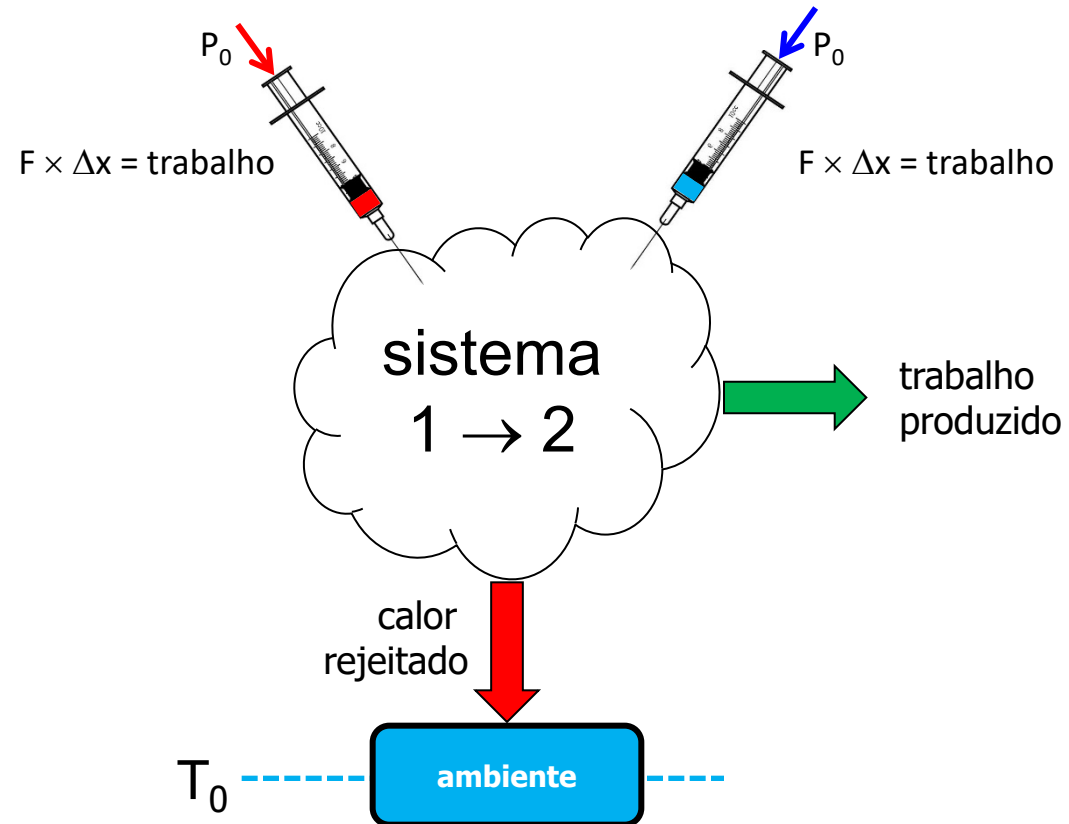
Análise de um sistema aberto...

Attention to
Filler Words

Exergia de escoamento / fluxo de exergia



Exergia de escoamento / fluxo de exergia



$$\Rightarrow W_{\text{fluxo}} = (P \cdot A) \cdot \Delta x = P \cdot V$$

$$W_{\text{fluxo}} = P \cdot (A \cdot \Delta x) = P \cdot V$$

$$X_{\text{fluxo}} = P \cdot V - P_0 \cdot V = (P - P_0) \cdot V$$

$$X = X_{\text{sist. fechado}} + X_{\text{fluxo}}$$

$$W_{\text{fluxo}} = P \cdot (A \cdot \Delta x) = P \cdot V$$

$$X_{\text{fluxo}} = P \cdot V - P_0 \cdot V = (P - P_0) \cdot V$$

$$X = \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}} + \underbrace{(P - P_0)V}_{\text{exergia de fluxo}}$$

$$W_{\text{fluxo}} = P \cdot (A \cdot \Delta x) = P \cdot V$$

$$X_{\text{fluxo}} = P \cdot V - P_0 \cdot V = (P - P_0) \cdot V$$

$$X = \boxed{(U - U_0)} + \cancel{P_0(V - \boxed{V_0})} - T_0(S - S_0) + \boxed{(P - P_0)V}$$

$$X = (H - H_0) - T_0(S - S_0)$$

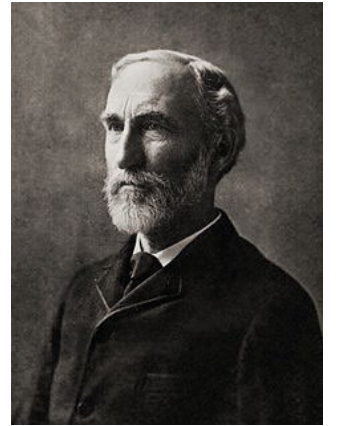
$$\Rightarrow X = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + EP + EC + EQ$$

$$\Rightarrow x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + ep + ec + eq$$

DEFINIÇÕES

eficiência de segunda lei
eficiência racional
etc.

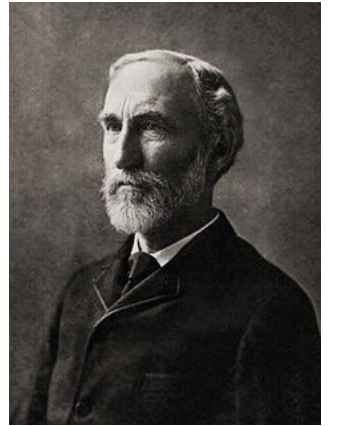
Eficiência exergética: é a razão entre a eficiência térmica real de um ciclo e a eficiência de um ciclo reversível operando entre as mesmas temperaturas



J. Willard Gibbs

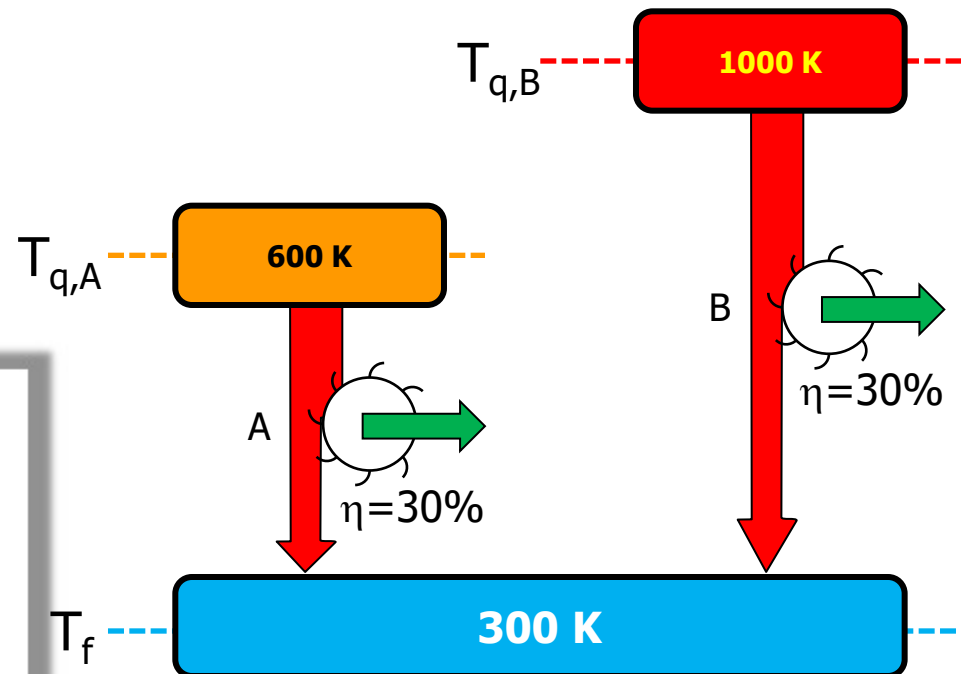
DEFINIÇÕES

eficiência de segunda lei
eficiência racional
etc.



J. Willard Gibbs

Eficiência exergética: é a razão entre a eficiência térmica real de um ciclo e a eficiência de um ciclo reversível operando entre as mesmas temperaturas



$$\eta_{2^{lei}}^{def} = \eta_{term} / \eta_{rev}$$

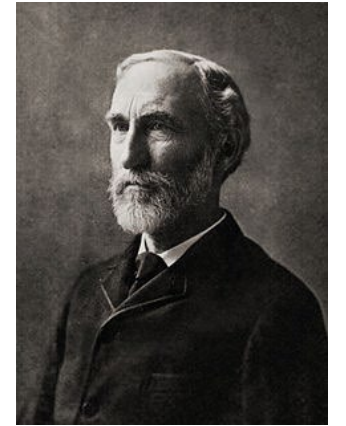
$$\eta_{rev,A} = 1 - T_f / T_{q,A}$$

$$\eta_{2^{lei}} = 0,3 / (1 - 300 / 600)$$

$$\eta_{2^{lei}} = 0,60$$

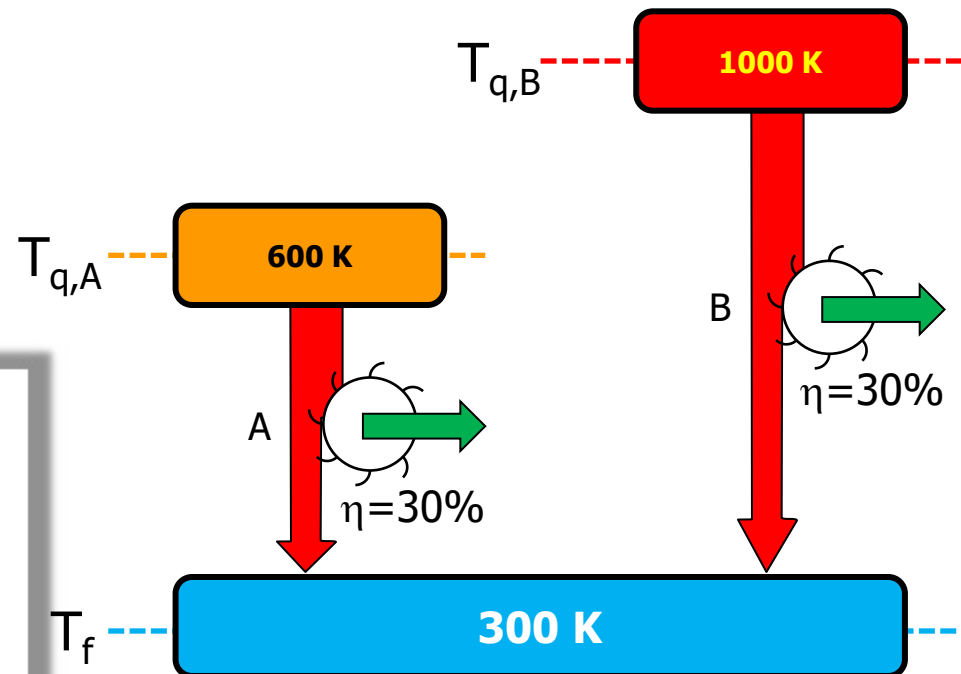
DEFINIÇÕES

eficiência de segunda lei
eficiência racional
etc.



J. Willard Gibbs

Eficiência exergética: é a razão entre a eficiência térmica real de um ciclo e a eficiência de um ciclo reversível operando entre as mesmas temperaturas

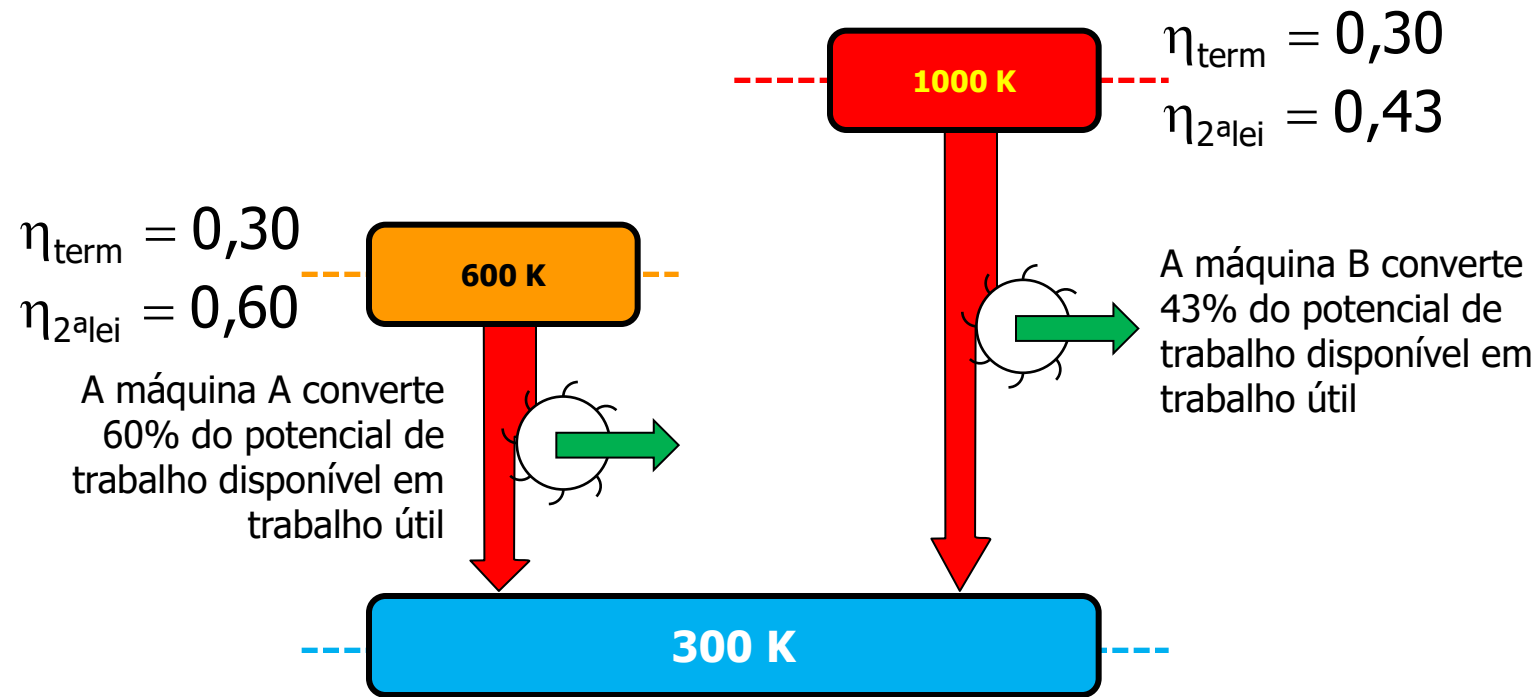


$$\eta_{2^{lei}}^{def} = \eta_{term} / \eta_{rev}$$

$$\eta_{rev,B} = 1 - T_f / T_{q,B}$$

$$\eta_{2^{lei}} = 0,3 / (1 - 300 / 1000)$$

$$\eta_{2^{lei}} = 0,43$$



$$\eta_{2^{\text{alei}}} = \frac{W_{\text{útil}}}{W_{\text{rev}}} \Rightarrow \eta_{2^{\text{alei}}} = \frac{\text{exergia recuperada}}{\text{exergia fornecida}} = 1 - \frac{\text{exergia destruída}}{\text{exergia fornecida}}$$

Formas de transferência de exergia

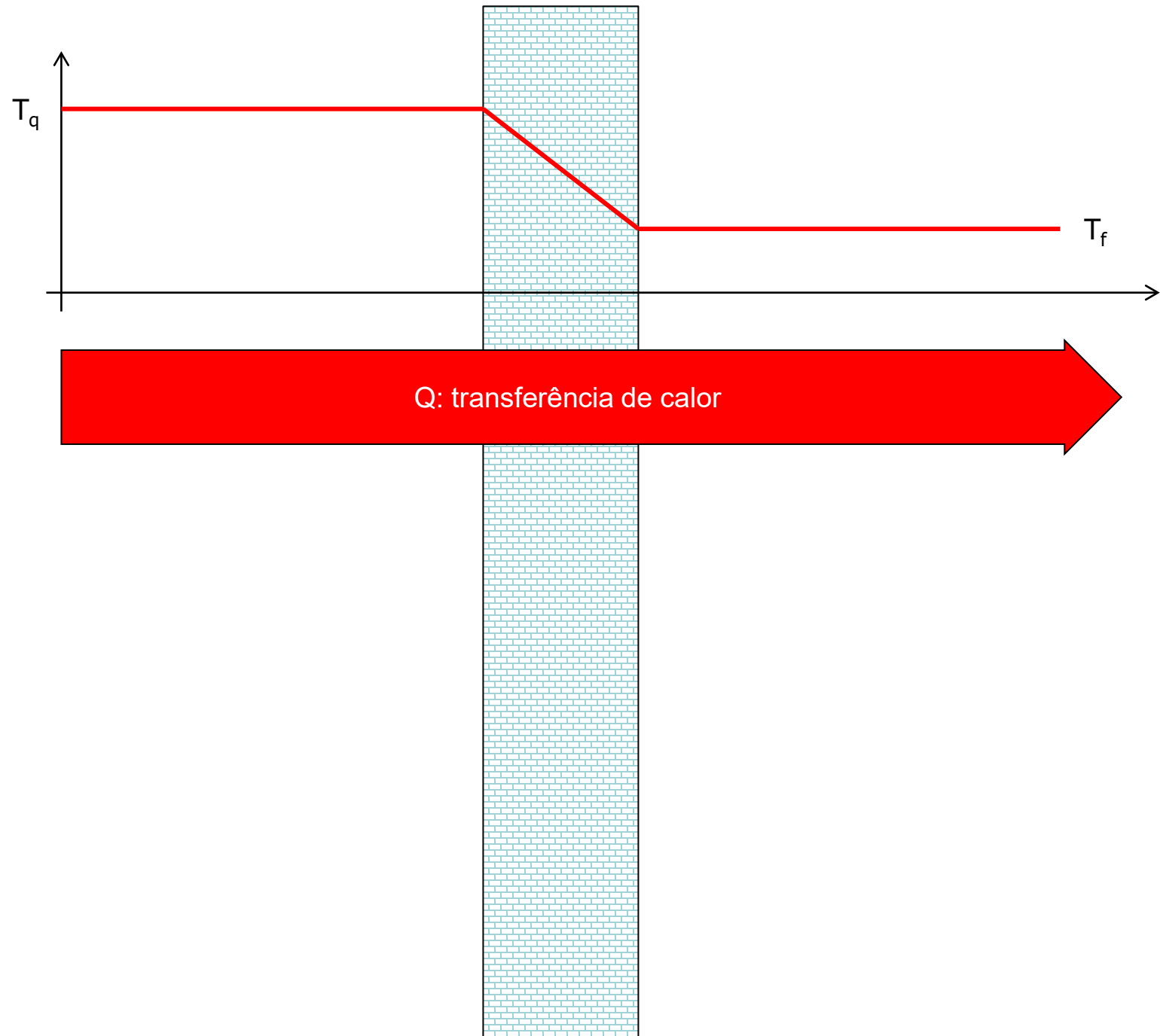
- Calor, Trabalho, Fluxo de massa

$$X \stackrel{\text{def}}{=} \underbrace{(U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)}_{\text{exergia termodinâmica}} + \underbrace{EP + EC}_{\text{exergia mecânica}} + \underbrace{EQ}_{\text{exergia química}}$$

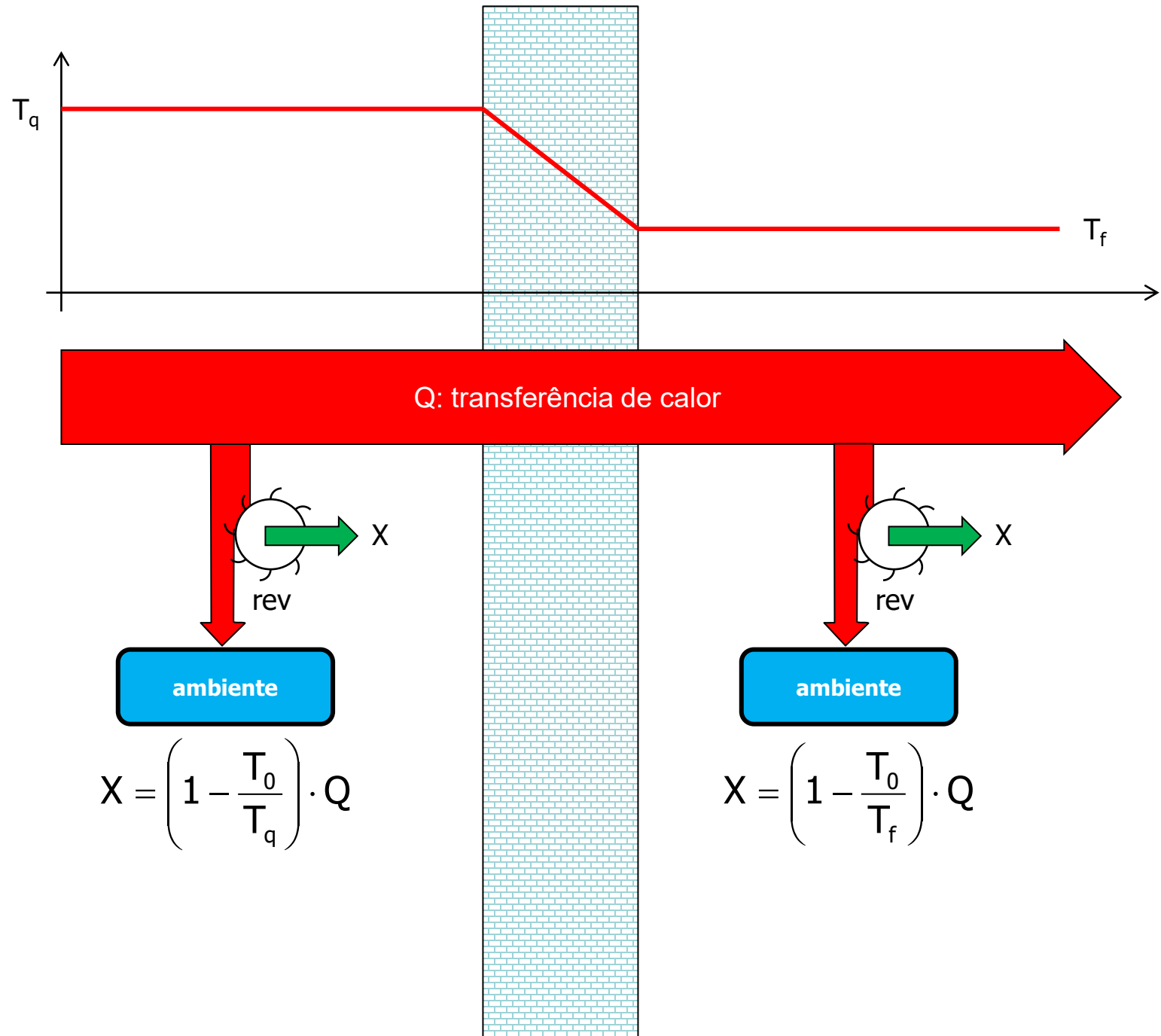
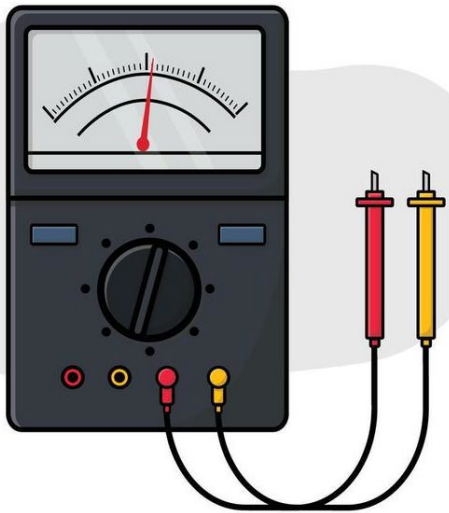
Exergia é uma propriedade termodinâmica, i.e. de estado !

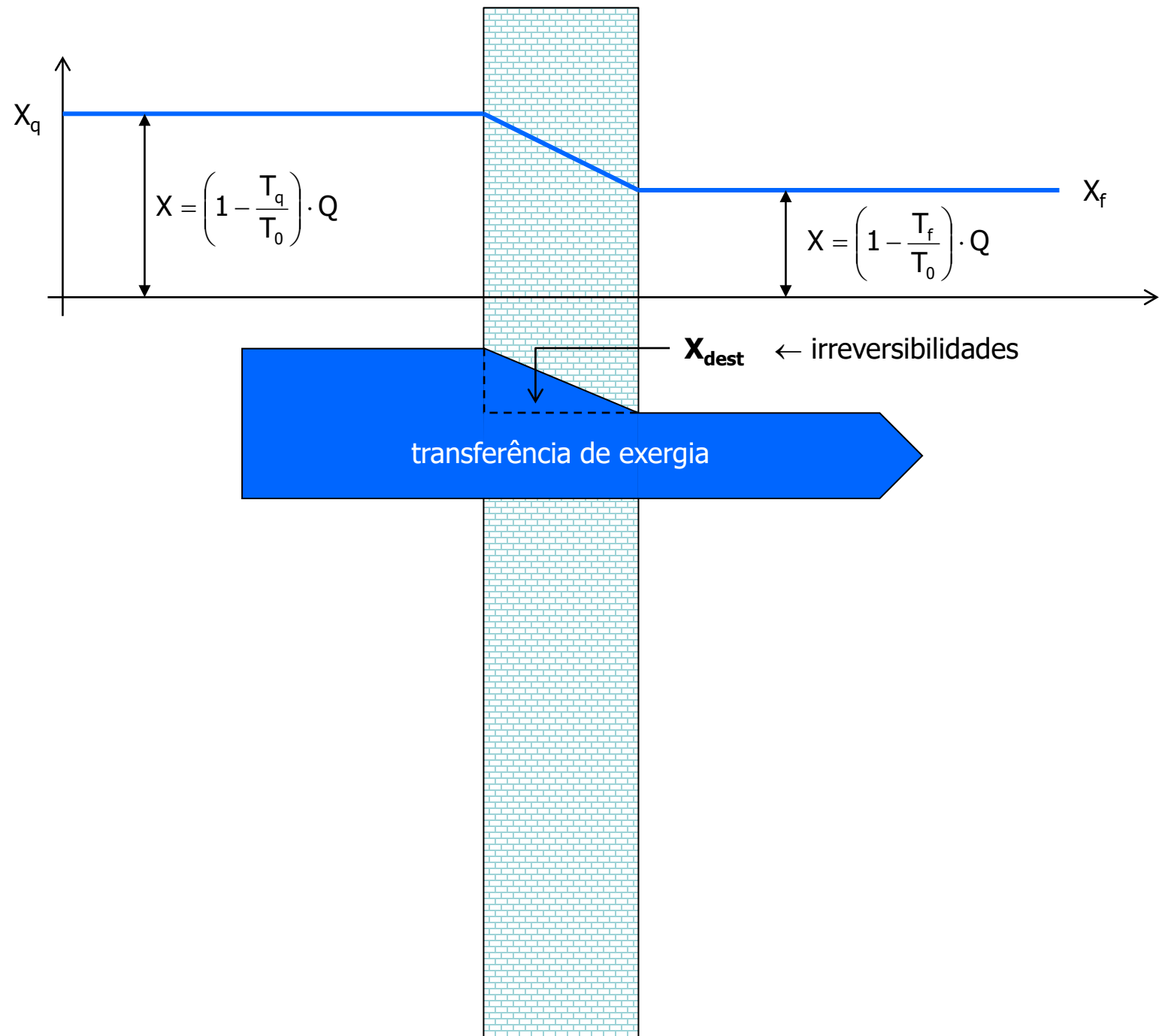
Transferência de exergia via calor...

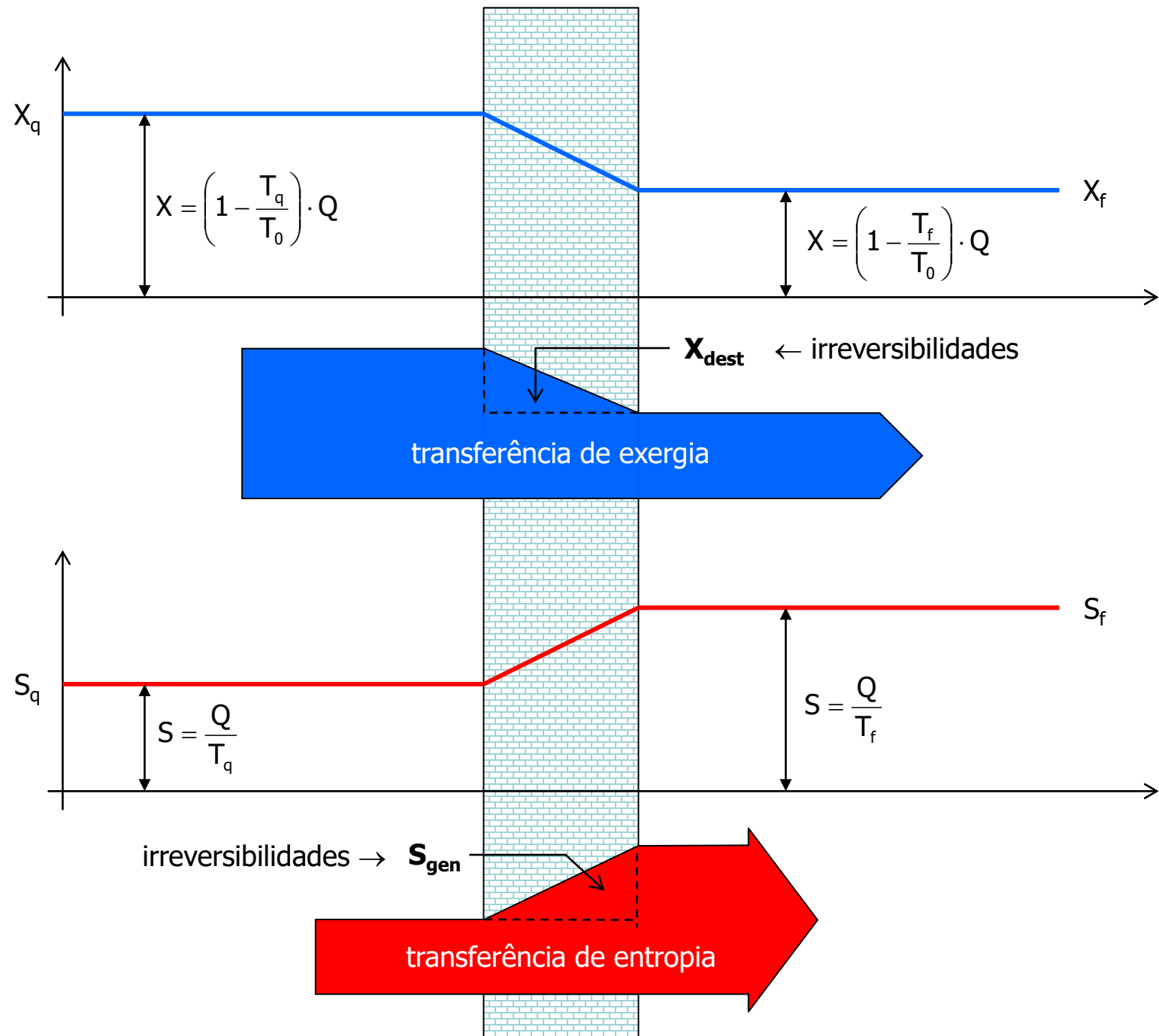
Attention to
Filler Words

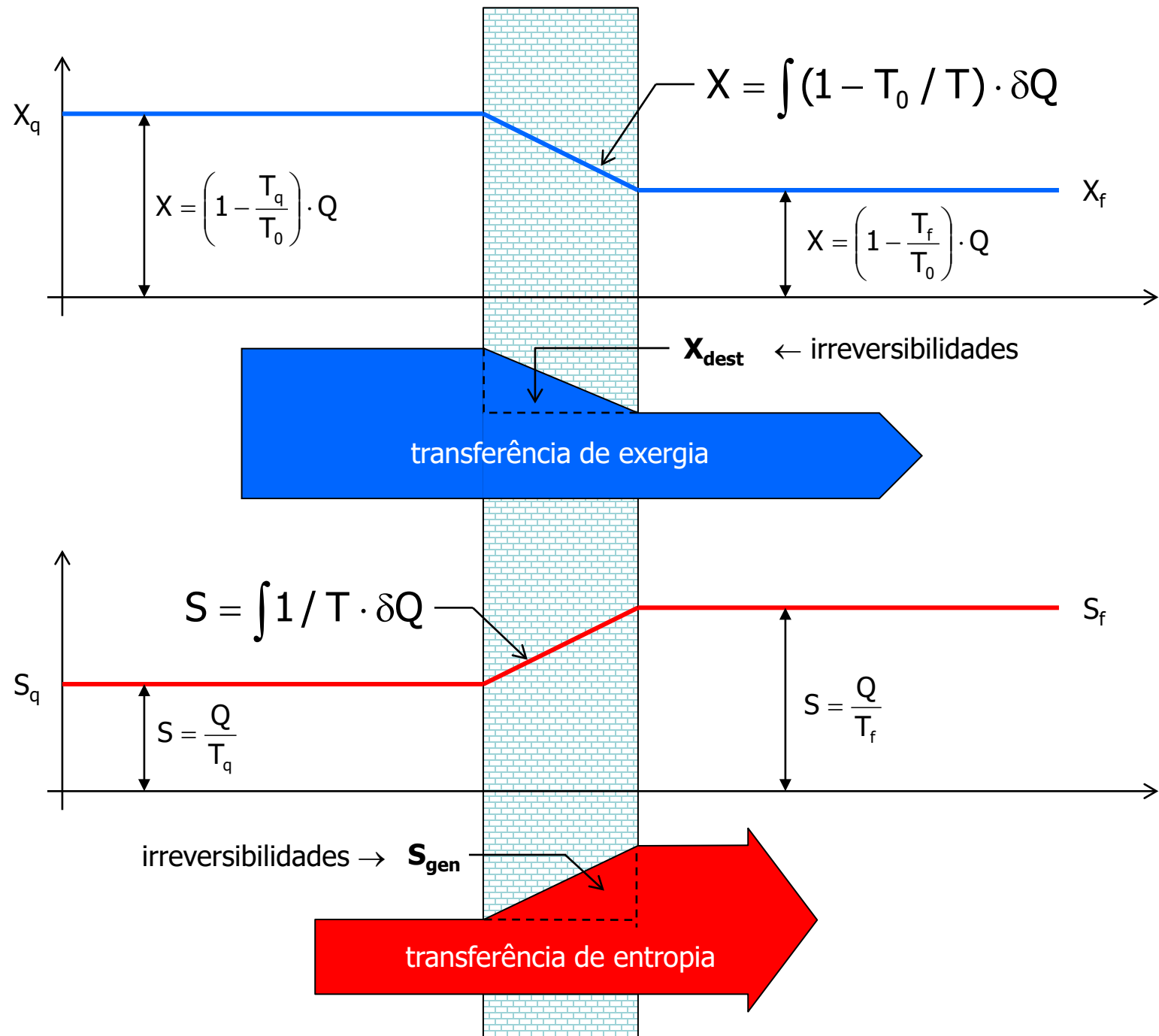


EXERGÍMETRO





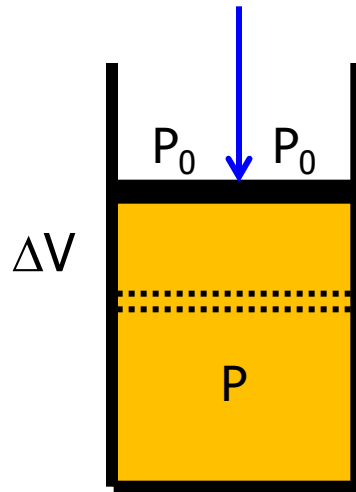




Transferência de exergia via trabalho...

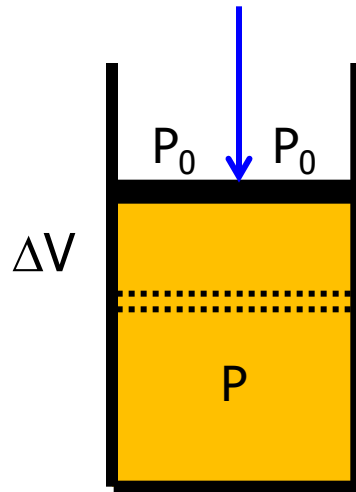
Attention to
Filler Words

potencial de trabalho útil = exergia



$$X_{\text{trabalho}} = W_{\text{fronteira}} - W_{\text{vizinhança}}$$

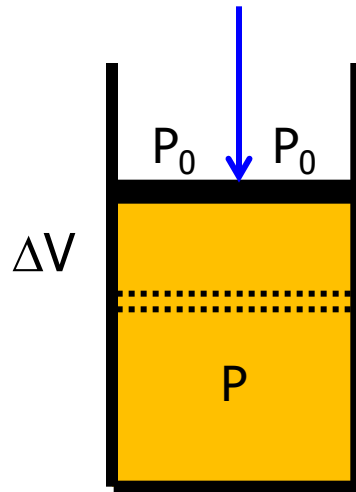
potencial de trabalho útil = exergia



$$X_{\text{trabalho}} = W_{\text{fronteira}} - W_{\text{vizinhança}}$$

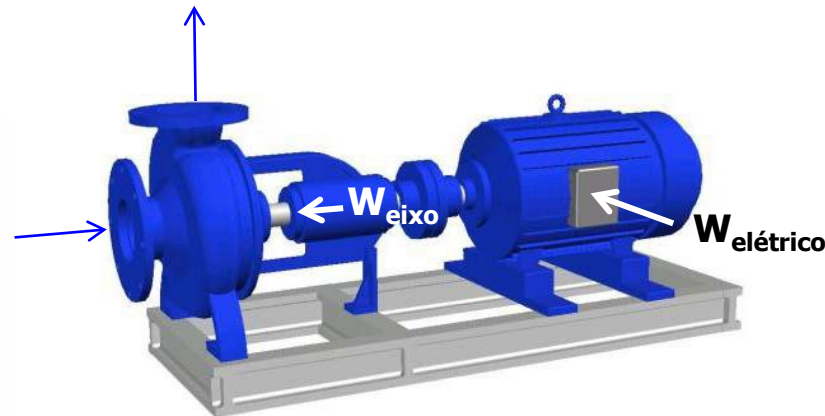
$\int P dV \quad \uparrow \quad \uparrow \quad P_0 \Delta V$

potencial de trabalho útil = exergia



$$X_{\text{trabalho}} = W_{\text{fronteira}} - W_{\text{vizinhança}}$$

$\int P dV \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad P_0 \Delta V$



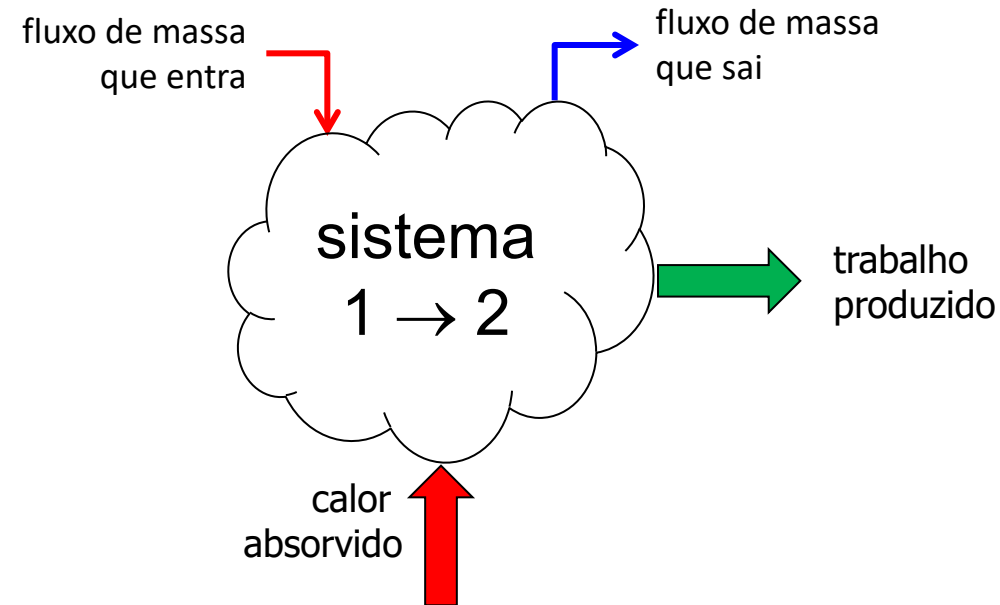
$$X_{\text{trabalho}} = W_{\text{eixo}}$$

$$X_{\text{trabalho}} = W_{\text{elétrico}}$$

Transferência de exergia via fluxo de massa...

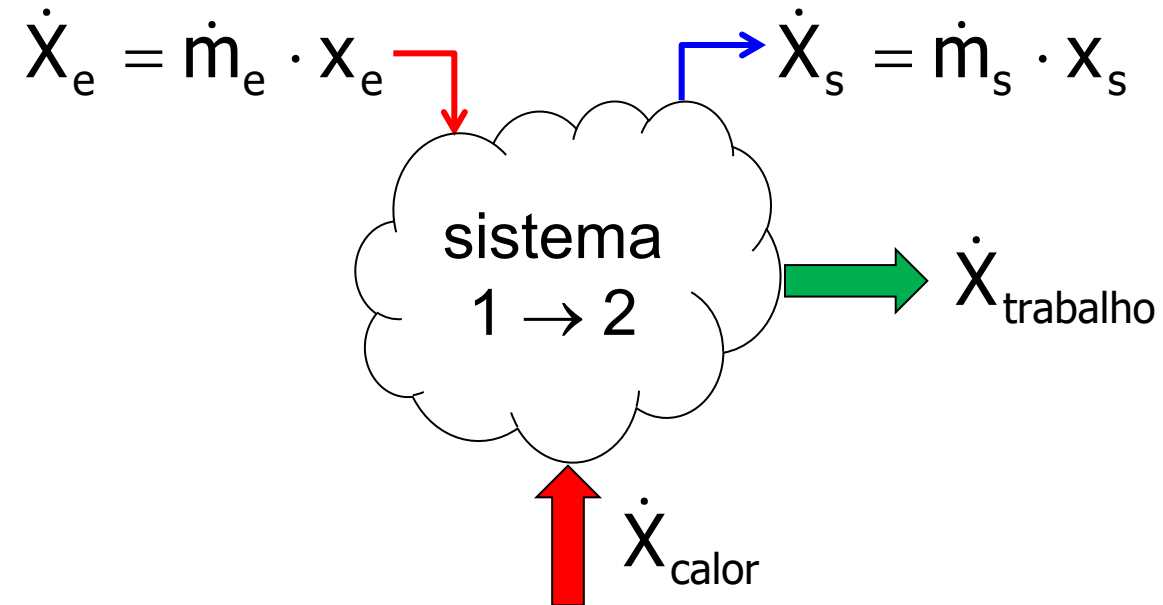
Attention to
Filler Words

massa contém exergia, assim como
contém energia, entropia, etc.



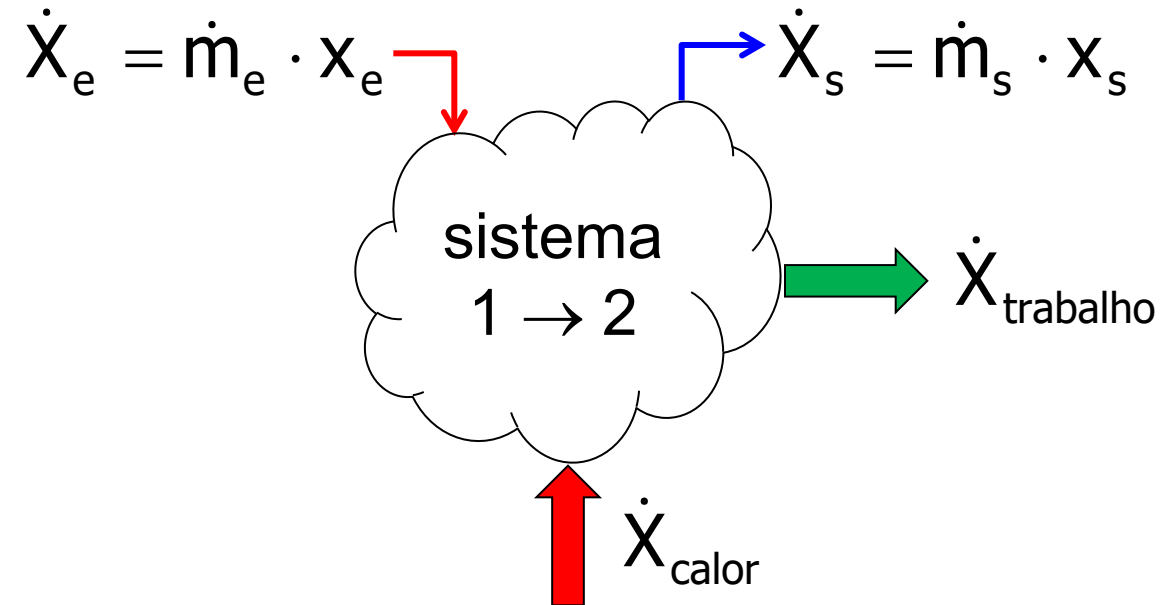
$$x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + ep + ec + eq$$

massa contém exergia, assim como
contém energia, entropia, etc.



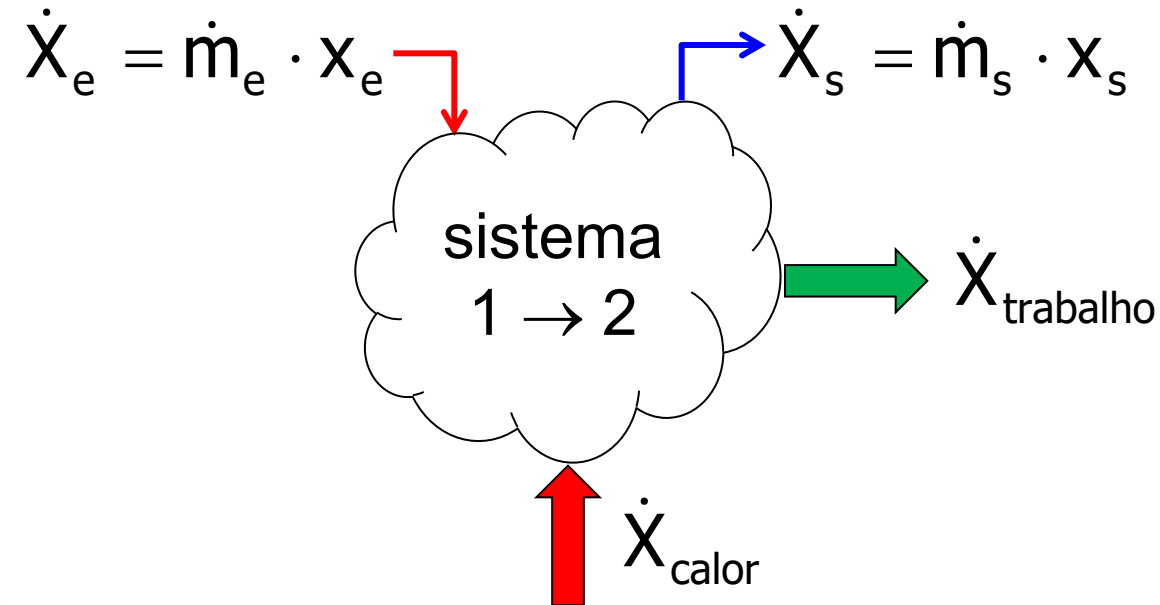
$$x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + ep + ec + eq$$

massa contém exergia, assim como contém energia, entropia, etc.



$$\dot{X}_{\text{calor}} - \dot{X}_{\text{trabalho}} + \dot{X}_{e,f.\text{massa}} - \dot{X}_{s,f.\text{massa}} - \dot{X}_{\text{destruída}} = dX_{\text{vc}} / dt$$

massa contém exergia, assim como contém energia, entropia, etc.

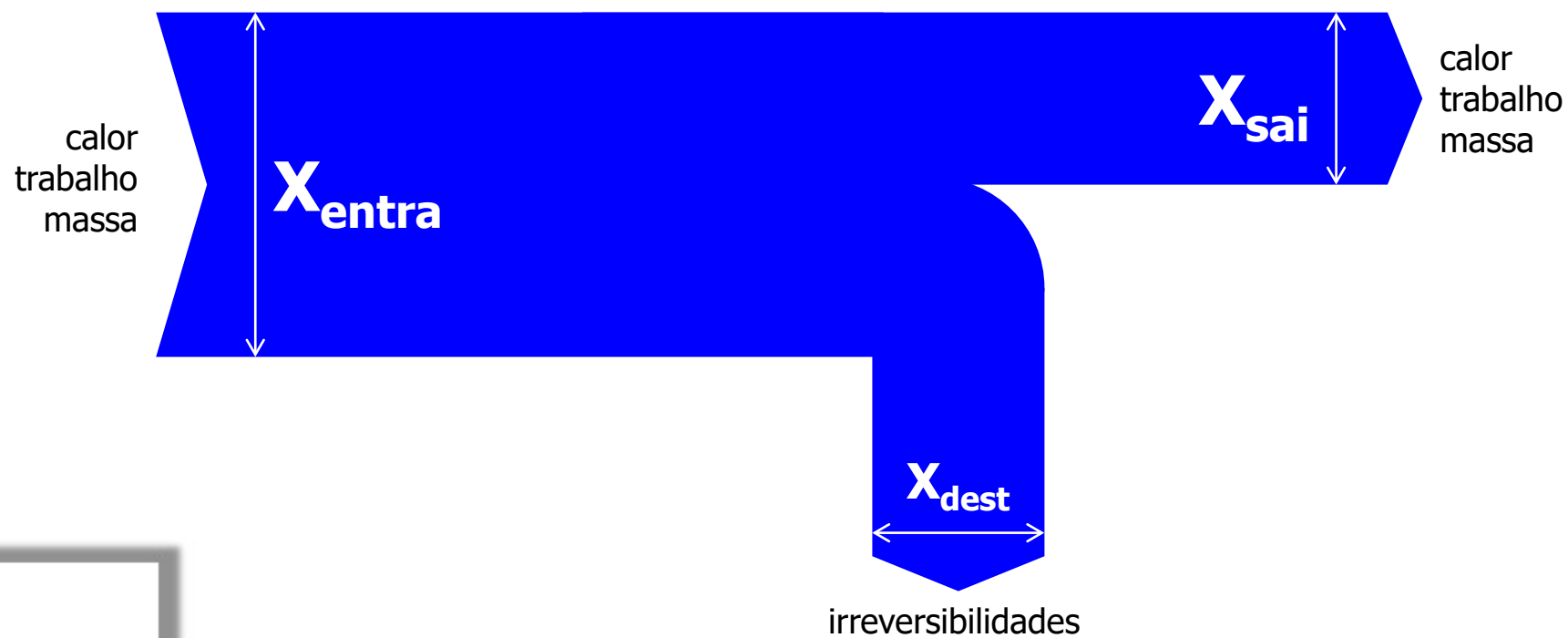


$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt} \right) + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{\text{dest}} = \frac{dX_{vc}}{dt}$$

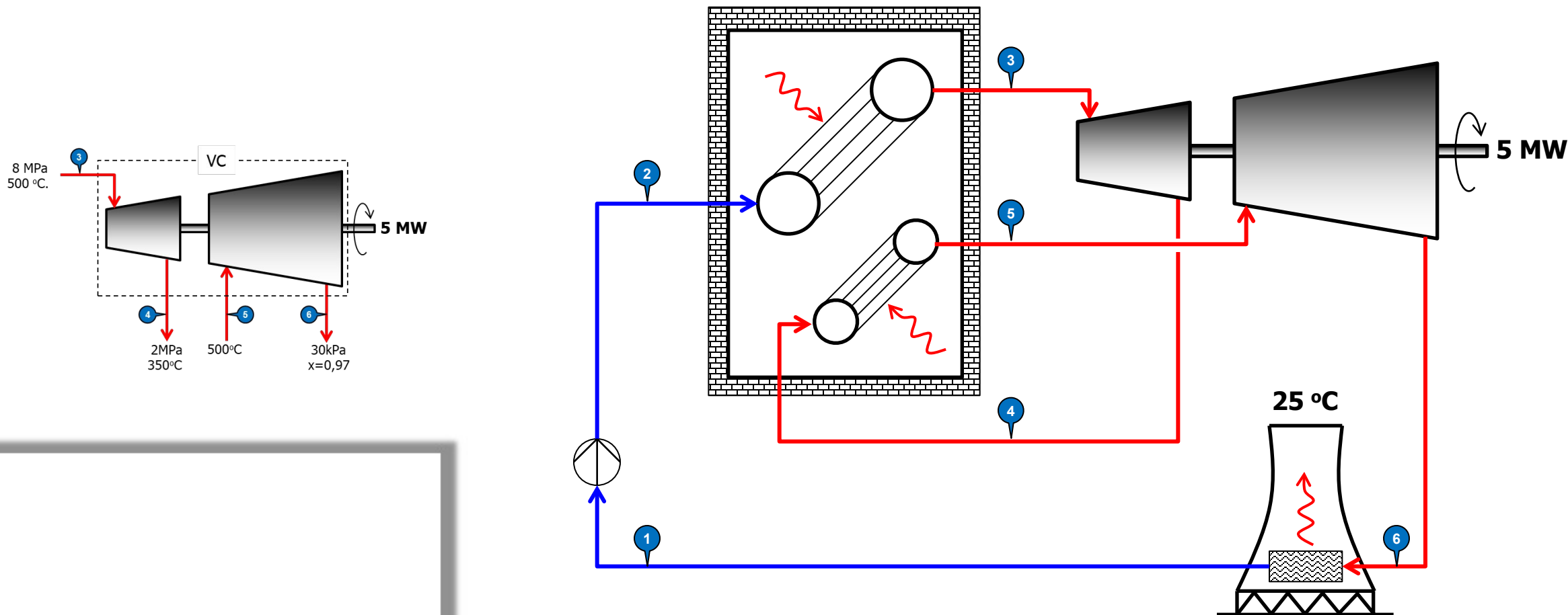
Exemplo: análise exergética de um ciclo de Rankine com reaquecimento...

Attention to
Filler Words

Diagrama de Sankey



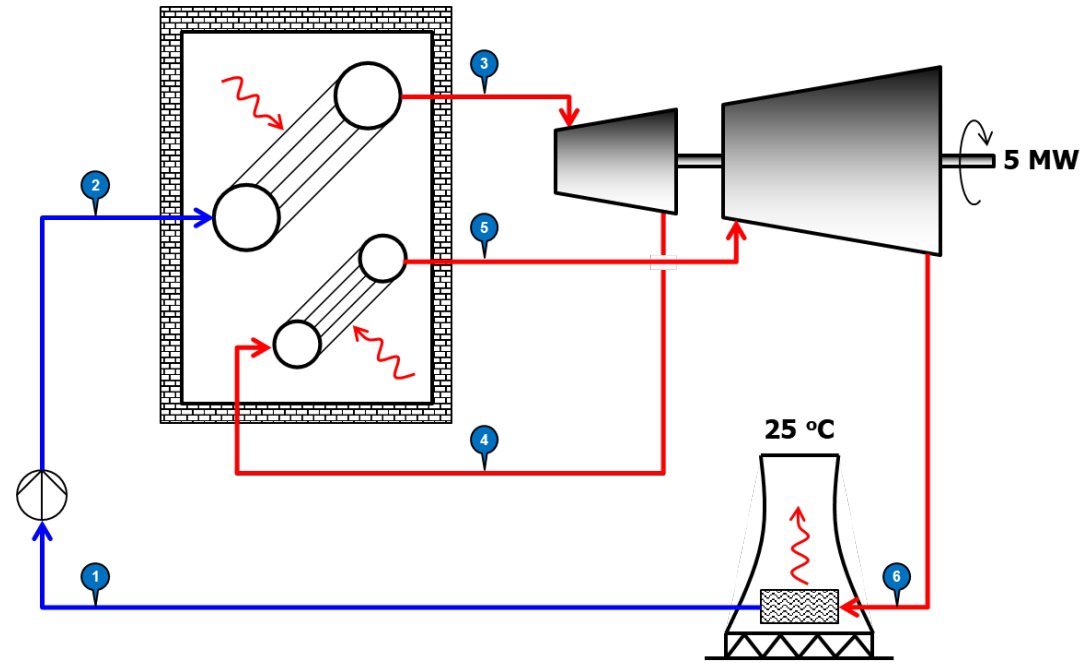
8.114) Vapor de água entra em uma turbina adiabática de dois estágios a 8 MPa e 500 °C. Ele se expande no primeiro estágio até 2 MPa e 350 °C. Em seguida o vapor é reaquecido isobaricamente até 500 °C antes de ser direcionado para o segundo estágio, de onde sai a 30 kPa e com título de 97%. A potência produzida pela turbina é de 5 MW. Considerando que a vizinhança está a 25 °C, determine a potência reversível e a taxa de destruição de exergia dentro dessa turbina. (5457kW e 457 kW)

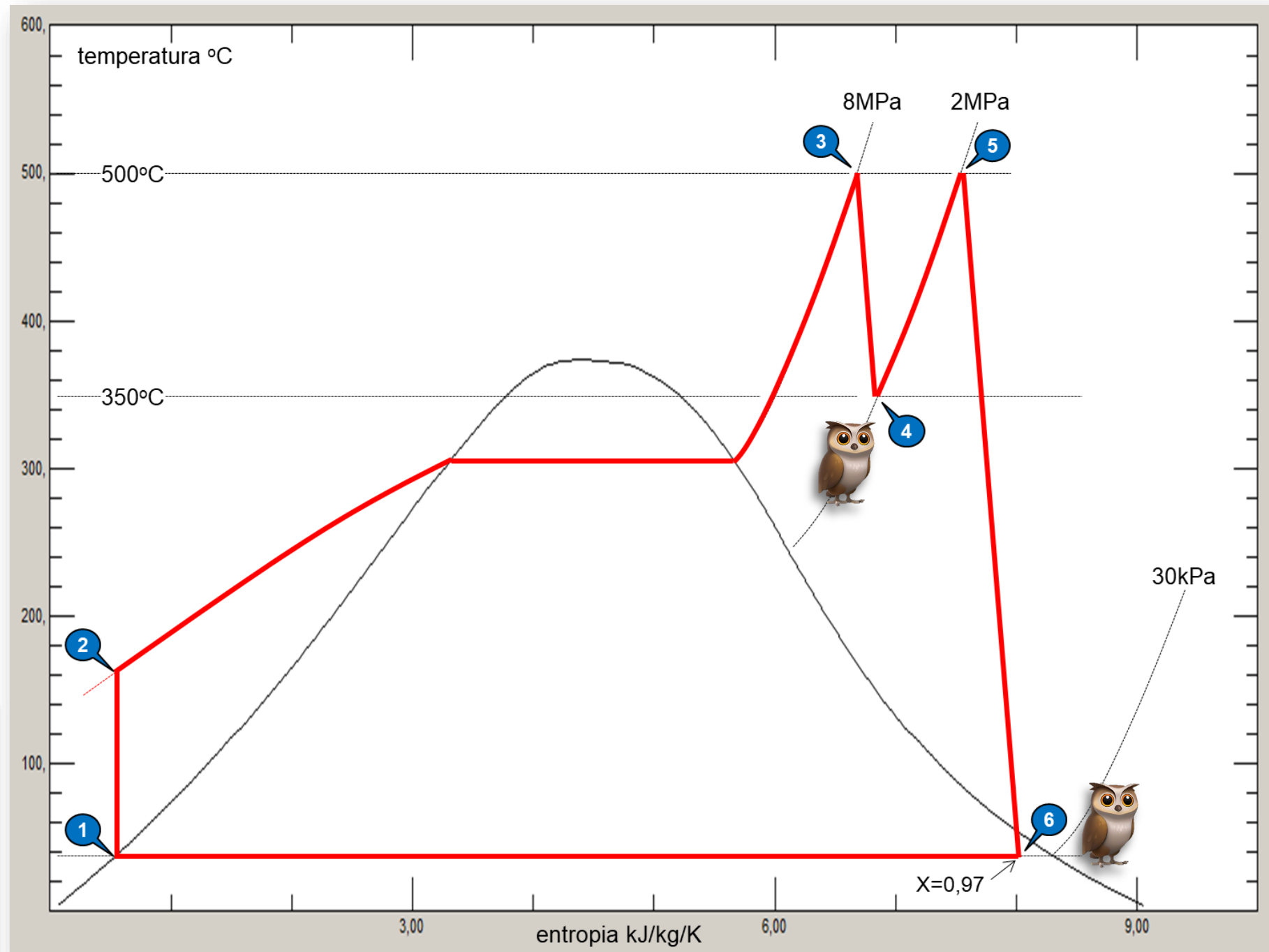
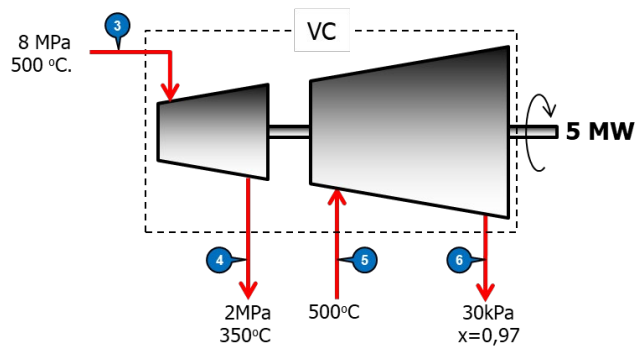




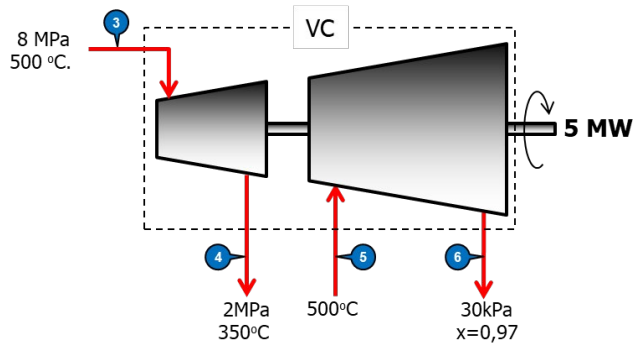
4: water: Specified state points

		Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
3	1	500,00	8000,0	23,942	0,041767	3065,4	3399,5	6,7266	Superheated	1398,5
4	2	350,00	2000,0	7,2150	0,13860	2860,5	3137,7	6,9583	Superheated	1067,6
5	3	500,00	2000,0	5,6921	0,17568	3116,9	3468,2	7,4337	Superheated	1256,4
6	4	69,095	30,000	0,19718	5,0716	2402,3	2554,5	7,5628	0,97000	304,21
1	5	69,095	30,000	978,25	0,0010222	289,24	289,27	0,94407	0,00000	12,360
2	6	69,479	8000,0	981,51	0,0010188	289,26	297,41	0,94407	Subcooled	20,494
0	7	25,000	100,00	997,05	0,0010030	104,82	104,92	0,36720	Subcooled	0,00000
	8									





$$x = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$



		Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
3	1	500,00	8000,0	23,942	0,041767	3065,4	3399,5	6,7266	Superheated	1398,5
4	2	350,00	2000,0	7,2150	0,13860	2860,5	3137,7	6,9583	Superheated	1067,6
5	3	500,00	2000,0	5,6921	0,17568	3116,9	3468,2	7,4337	Superheated	1256,4
6	4	69,095	30,000	0,19718	5,0716	2402,3	2554,5	7,5628	0,97000	304,21
1	5	69,095	30,000	978,25	0,0010222	289,24	289,27	0,94407	0,00000	12,360
2	6	69,479	8000,0	981,51	0,0010188	289,26	297,41	0,94407	Subcooled	20,494
0	7	25,000	100,00	997,05	0,0010030	104,82	104,92	0,36720	Subcooled	0,00000
	8									

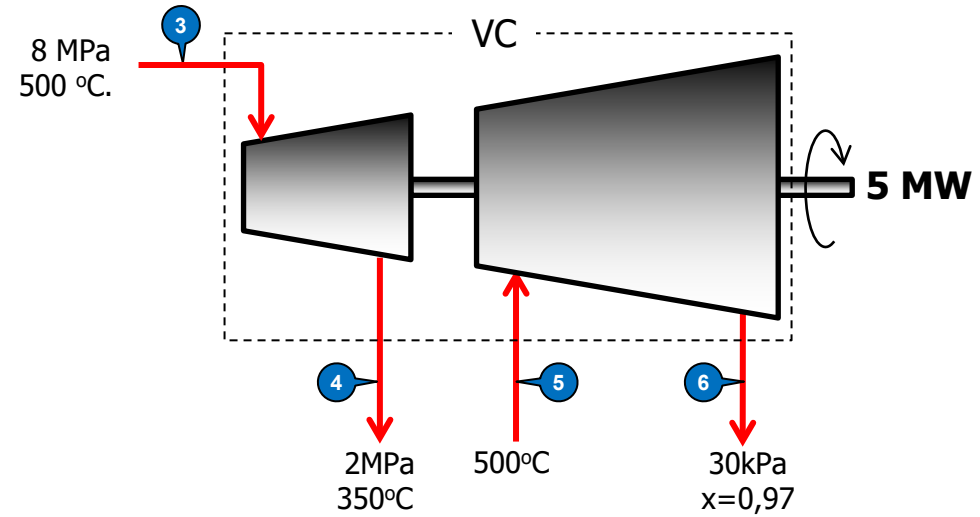
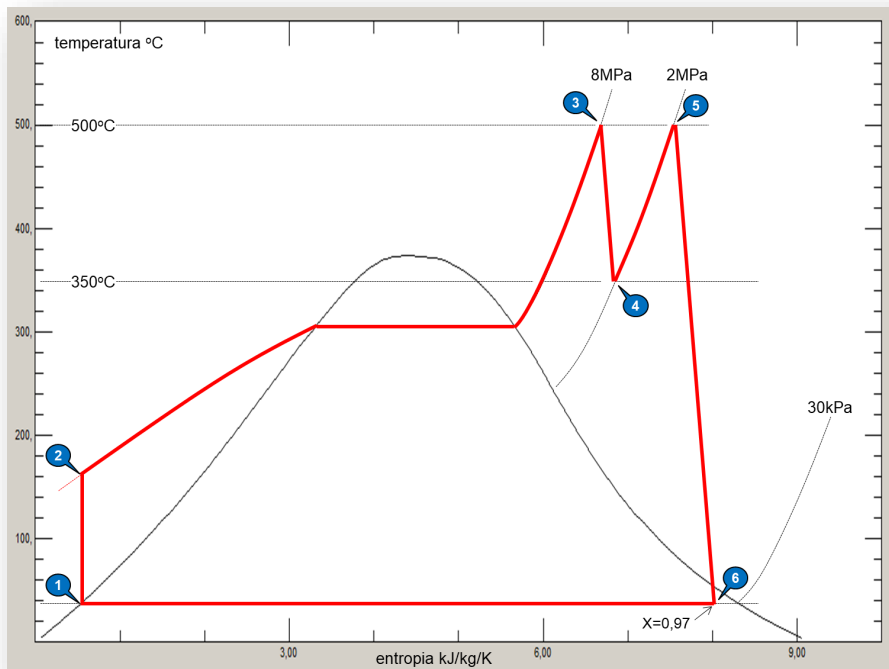
$$x_3 = (3399,42 - 104,920) - (25 + 273,15) \cdot (6,727 - 0,367) = 1398,338 \text{ kJ/kg}$$

$$x_4 = (3137,653 - 104,920) - (25 + 273,15) \cdot (6,958 - 0,367) = 1067,626 \text{ kJ/kg}$$

$$x_5 = (3468,241 - 104,920) - (25 + 273,15) \cdot (7,434 - 0,367) = 1256,295 \text{ kJ/kg}$$

$$x_6 = (2554,489 - 104,920) - (25 + 273,15) \cdot (7,563 - 0,367) = 304,082 \text{ kJ/kg}$$

Attention to
Filler Words

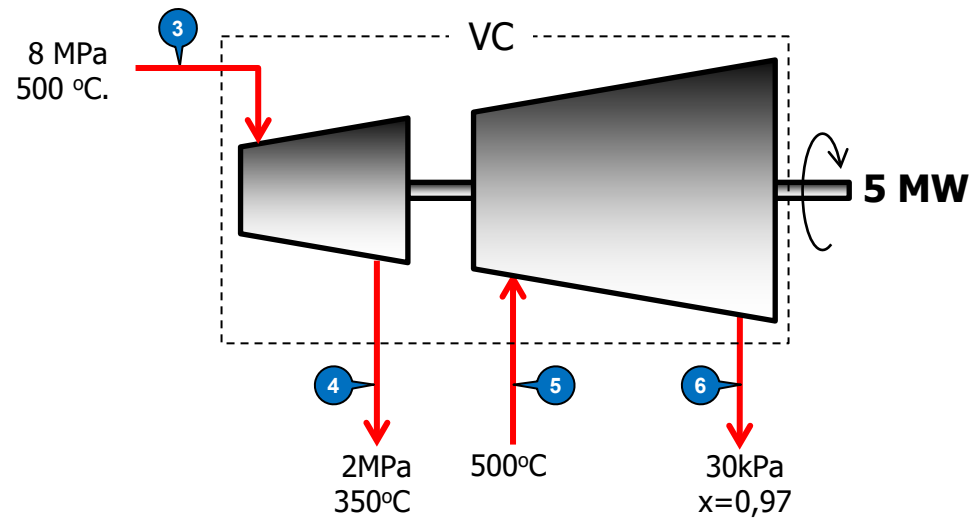
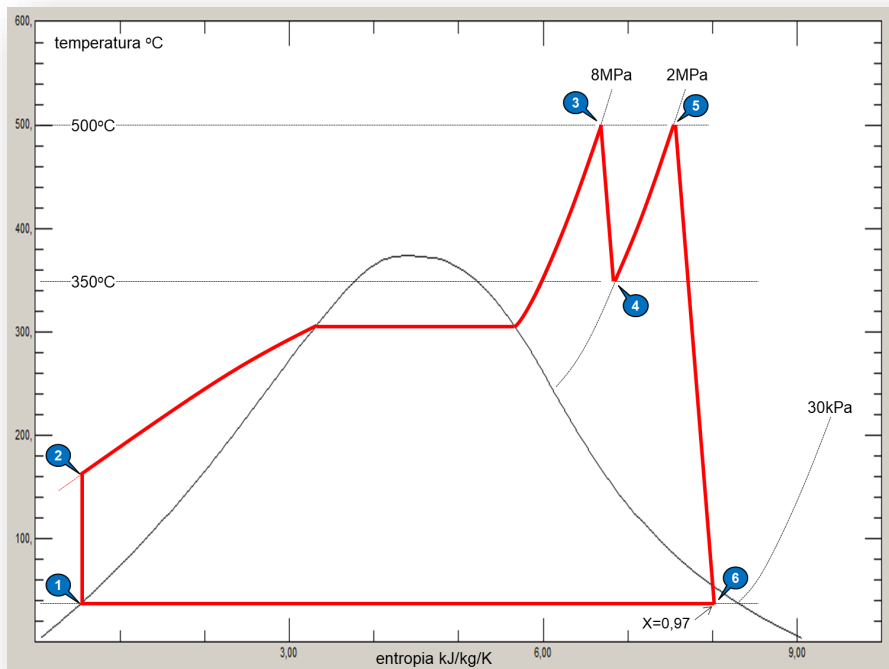


$$\dot{Q} = 0 \rightarrow \dot{W} = \dot{m} \cdot [(h_3 + h_5) - (h_4 + h_6)]$$

$$5000 \text{ kW} = \dot{m} \cdot [(3399,5 + 3468,2) - (3137,7 + 2554,5)] \cdot \text{kJ} / \text{kg}$$

$$\dot{m} = 4,25 \frac{\text{kW} \cdot \text{kg}}{\text{kJ}} = 4,25 \frac{\text{kJ} / \text{s} \cdot \text{kg}}{\text{kJ}}$$

$$\dot{m} = 4,25 \cdot \text{kg} / \text{s}$$



$$\dot{m} = 4,25 \cdot \text{kg} / \text{s}$$

$$\dot{W}_I = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4)$$

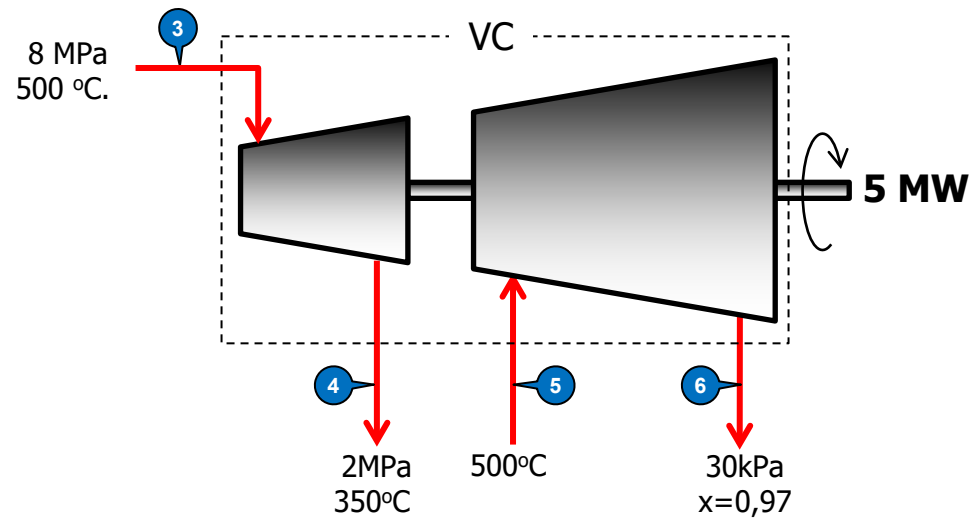
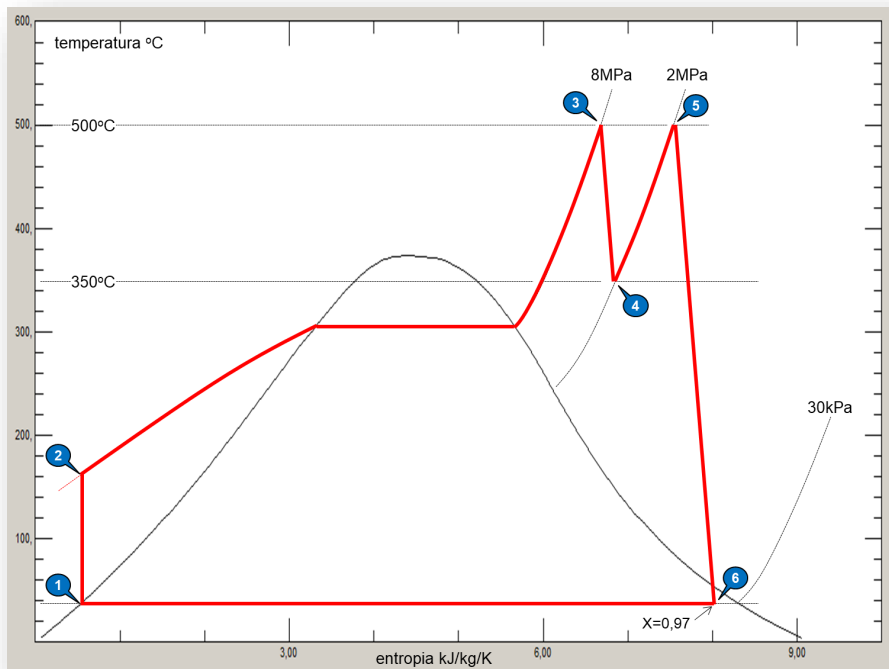
$$\dot{W}_{II} = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6)$$

$$\dot{W}_I = 4,25 \cdot (3399,5 - 3137,7)$$

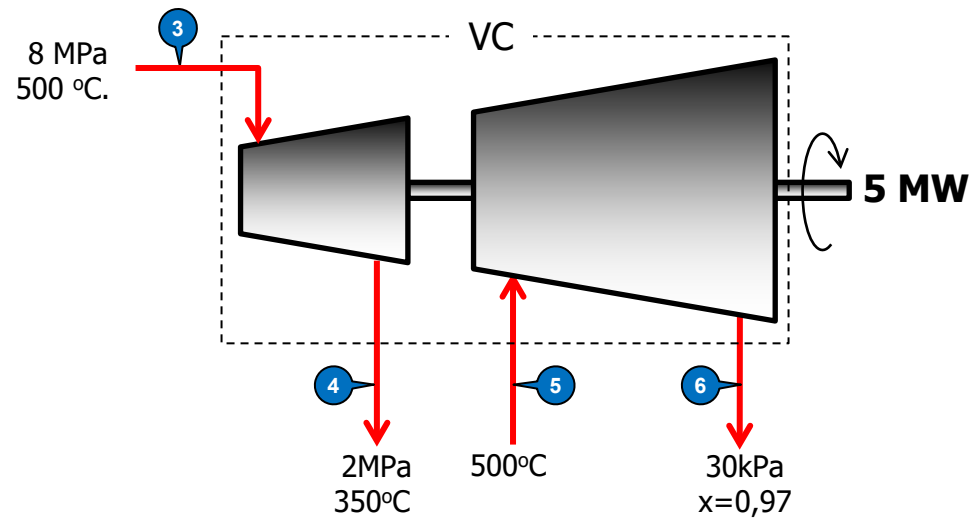
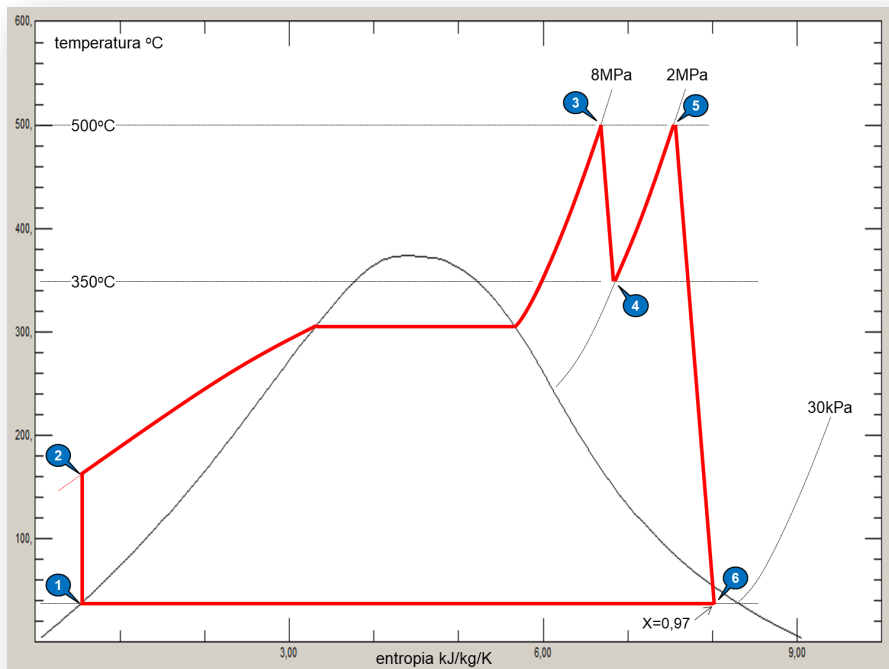
$$\dot{W}_{II} = 4,25 \cdot (3468,2 - 2554,5)$$

$$\dot{W}_I = 1116,8 \text{ kW}$$

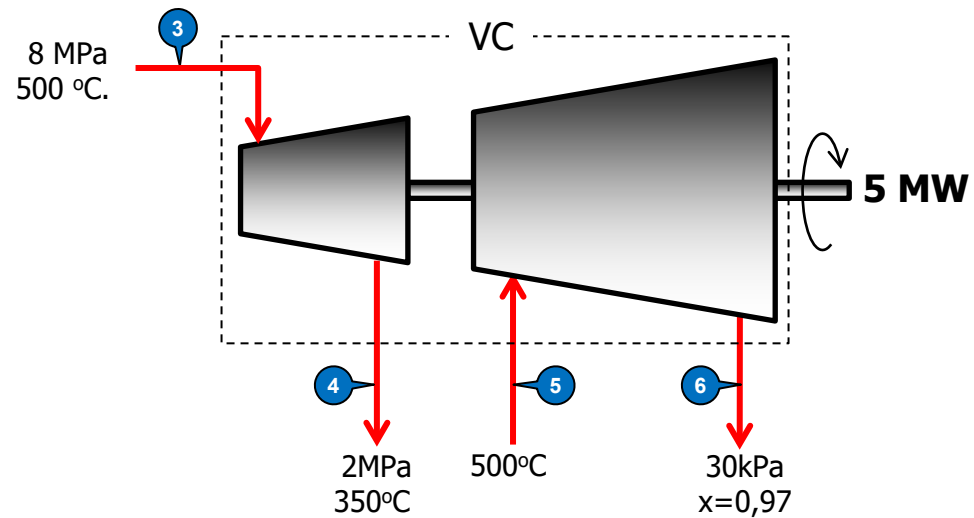
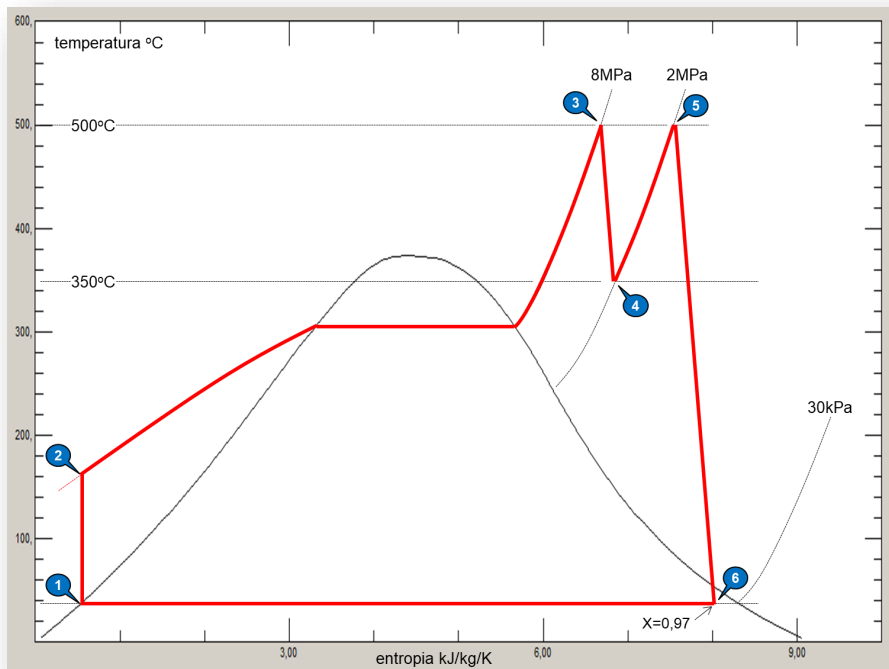
$$\dot{W}_{II} = 3883,2 \text{ kW}$$



$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt} \right) + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{dest} = \frac{dX_{vc}}{dt}$$

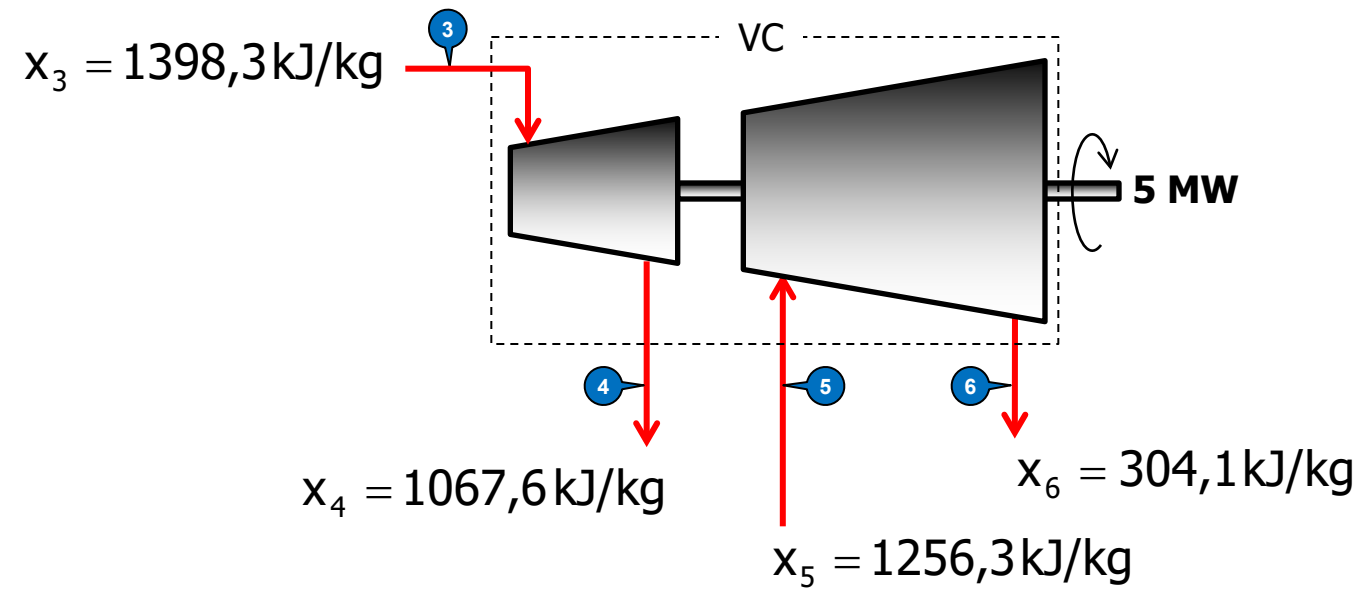


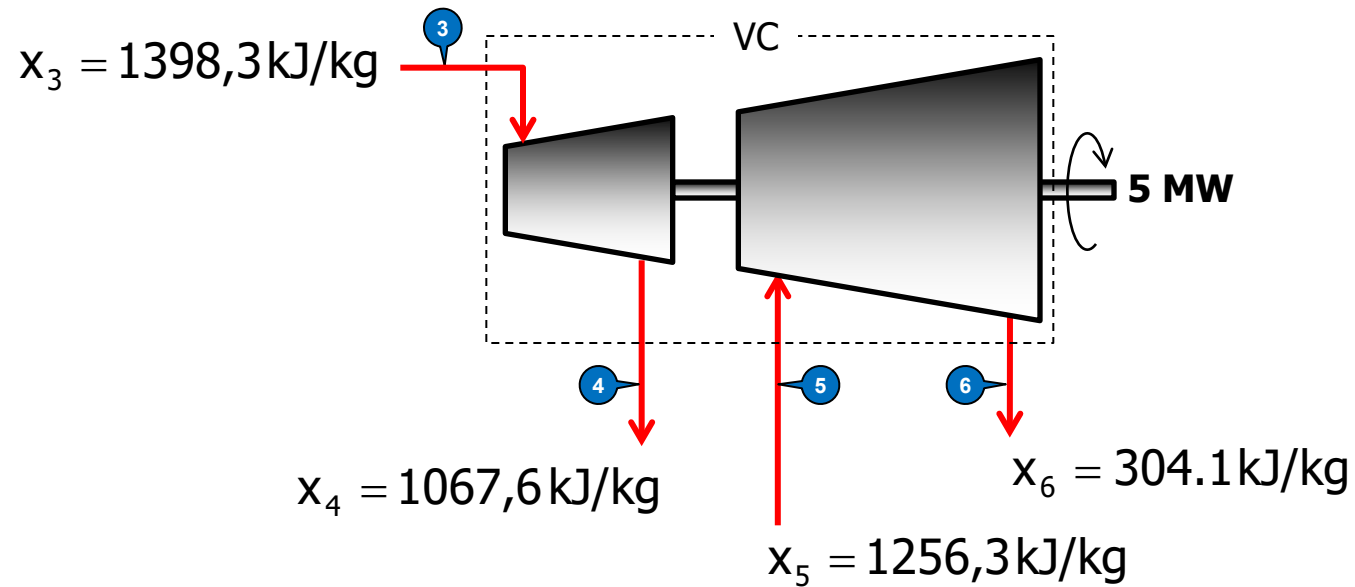
$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt} \right) + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{dest} = \frac{dX_{vc}}{dt}$$



~~$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt} \right) + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{dest} = \frac{dX_{vc}}{dt}$$~~

$$-\dot{W} + \dot{m} \cdot [(x_3 + x_5) - (x_4 + x_6)] - \dot{X}_{dest} = 0$$



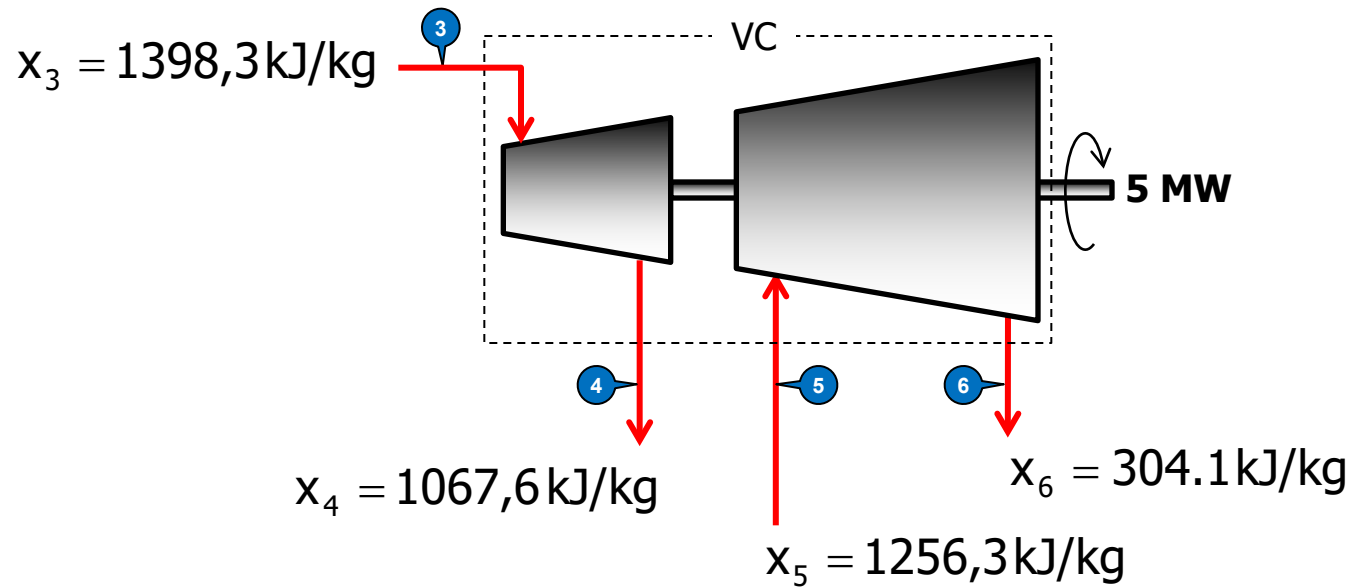


$$-\dot{W} + \dot{m} \cdot [(x_3 + x_5) - (x_4 + x_6)] - \dot{X}_{\text{dest}} = 0$$

$$-5000 \text{ kW} + 4,25 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(1398,3 + 1256,3) - (1067,6 + 304,1)] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \dot{X}_{\text{dest}} = 0$$

$$\dot{X}_{\text{dest}} = 456,280 \text{ kW}$$

potencial de
trabalho
desperdiçado



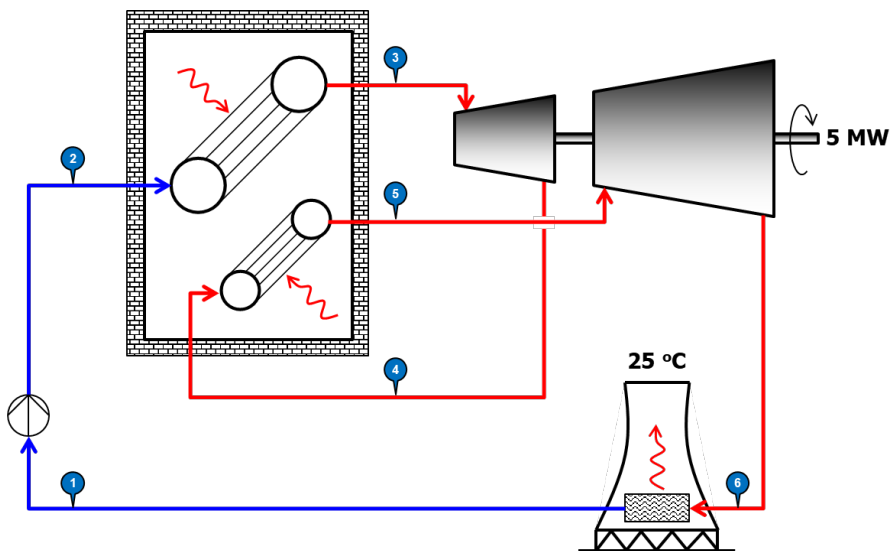
$$-\dot{W} + \dot{m} \cdot [(x_3 + x_5) - (x_4 + x_6)] - \dot{X}_{\text{dest}} = 0$$

$$- \cancel{5000 \text{ kW}}^{= W_{\text{max}}} + 4,25 \frac{\text{kg}}{\text{s}} [(1398,3 + 1256,3) - (1067,6 + 304,1)] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \cancel{\dot{X}_{\text{dest}}}^{= 0} = 0$$

$$\dot{W} = 5456,280 \text{ kW}$$

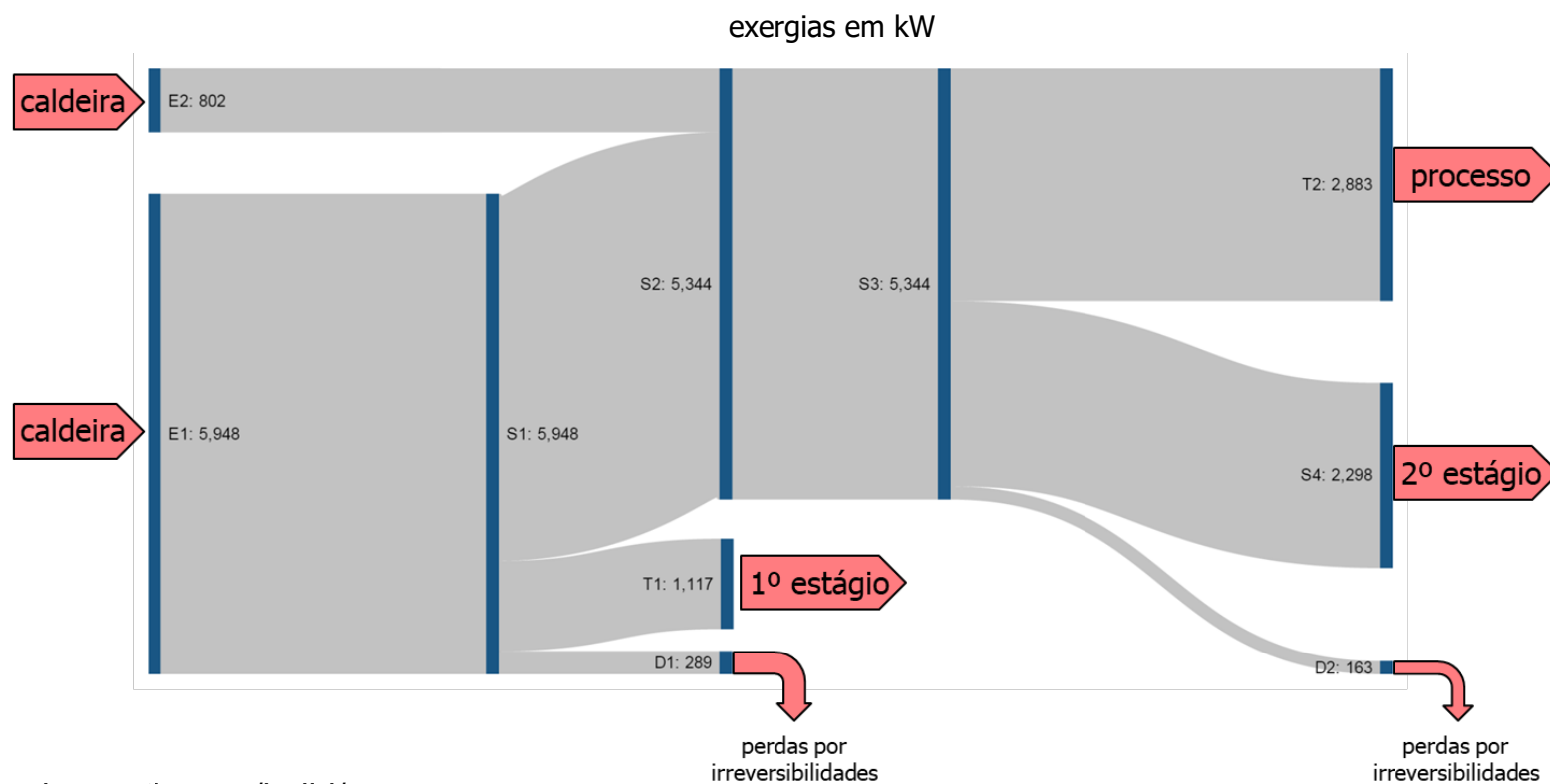
potência reversível
ef. isentrópica = 1

$$\dot{m} = 4,25 \cdot \text{kg} / \text{s}$$



4: water: Specified state points

		Temperature (°C)	Pressure (kPa)	Density (kg/m³)	Volume (m³/kg)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)	Flow Exergy (kJ/kg)
3	1	500,00	8000,0	23,942	0,041767	3065,4	3399,5	6,7266	Superheated	1398,5
4	2	350,00	2000,0	7,2150	0,13860	2860,5	3137,7	6,9583	Superheated	1067,6
5	3	500,00	2000,0	5,6921	0,17568	3116,9	3468,2	7,4337	Superheated	1256,4
6	4	69,095	30,000	0,19718	5,0716	2402,3	2554,5	7,5628	0,97000	304,21
1	5	69,095	30,000	978,25	0,0010222	289,24	289,27	0,94407	0,00000	12,360
2	6	69,479	8000,0	981,51	0,0010188	289,26	297,41	0,94407	Subcooled	20,494
0	7	25,000	100,00	997,05	0,0010030	104,82	104,92	0,36720	Subcooled	0,00000
	8									



<http://sankeymatic.com/build/>



Curso de Termodinâmica

EXERGIA

parte 1/2

aula 16/20





Moraine Lake