

Avaliação de Processos pela Segunda Lei da Termodinâmica

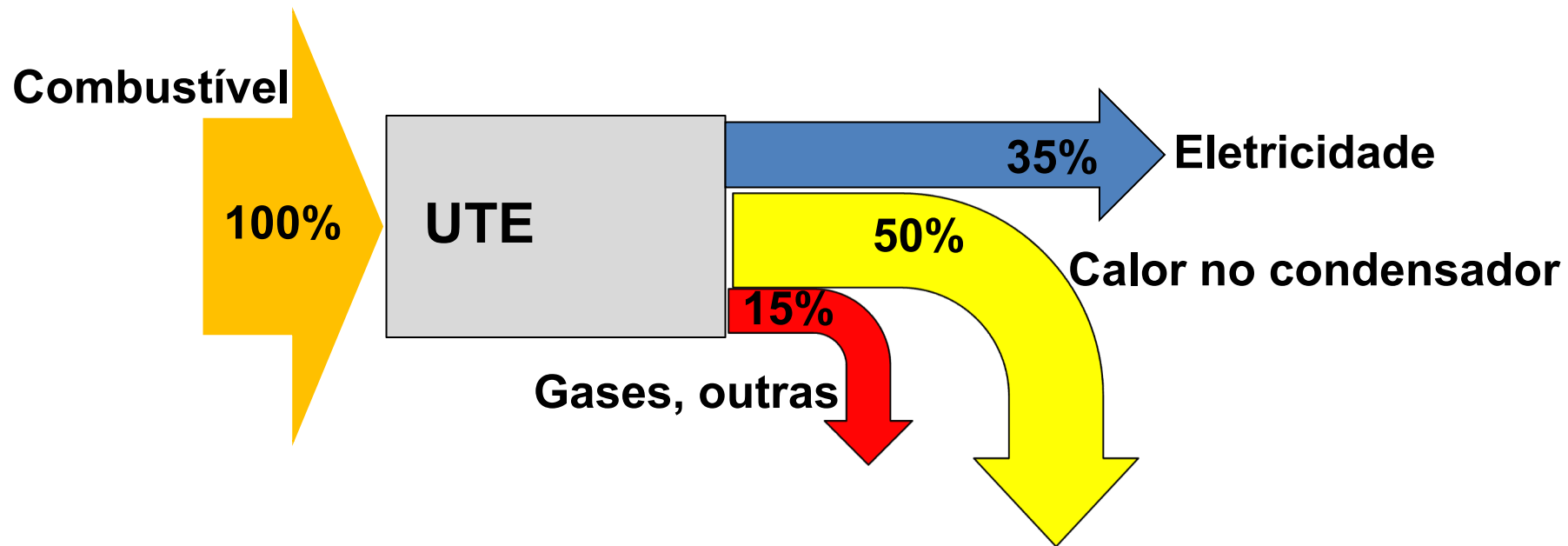
Carlos Eduardo Keutenedjian Mady



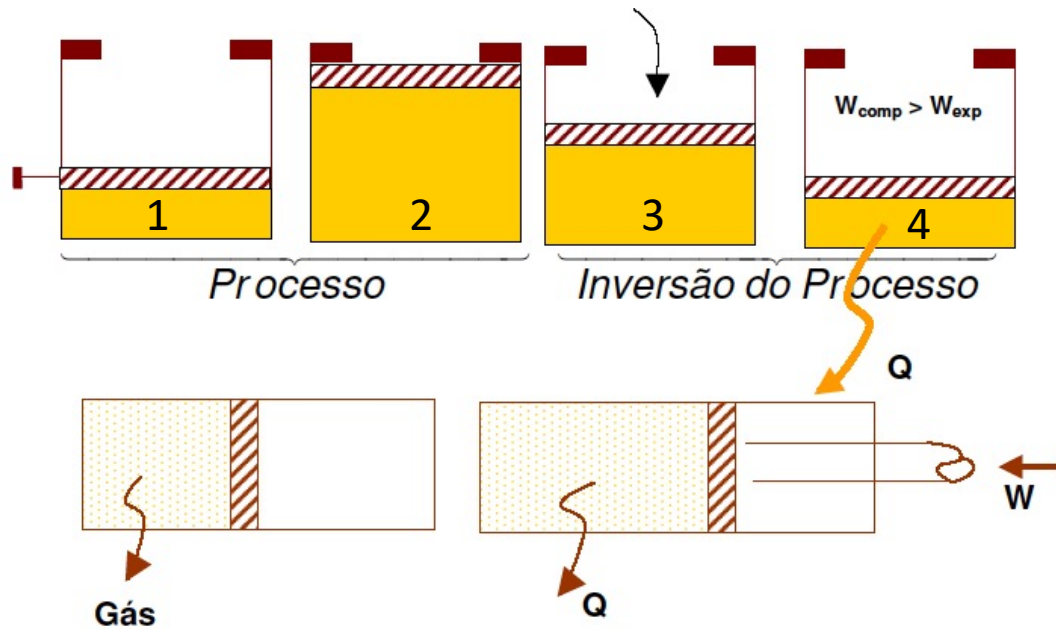
Os limites da análise energética:

➤ Equivalência energética e falsas propostas:

- ✓ Calor possui mesmo efeito útil que trabalho?
- ✓ Efeito útil de calor depende da temperatura?
- ✓ Ex: termoeétrica:



Racional de um processo reversível.



➤ Vamos analisar cada processo:

- ✓ 1-2 Expansão entre 1 e 2 (irreversível)
- ✓ 2-3 Processo de compressão, conseguimos voltar as condições de origem?
- ✓ 3-4 Apenas se houver algum vestígio com o meio.

$$\Delta U = Q_{12} - W_{12} \longrightarrow W_{12} = U_1 - U_2$$

$$\Delta U = Q_{23} - W_{23} \longrightarrow W_{23} = U_2 - U_3$$

$$\Delta U = Q_{34} - W_{34} \longrightarrow Q_{34} = U_4 - U_3$$

$$W_{12} > |W_{23}| \longrightarrow Q_{34} = U_4 - U_3$$

Portanto para o estado 4 ser igual ao 1, devemos ter.

Processos Irreversíveis

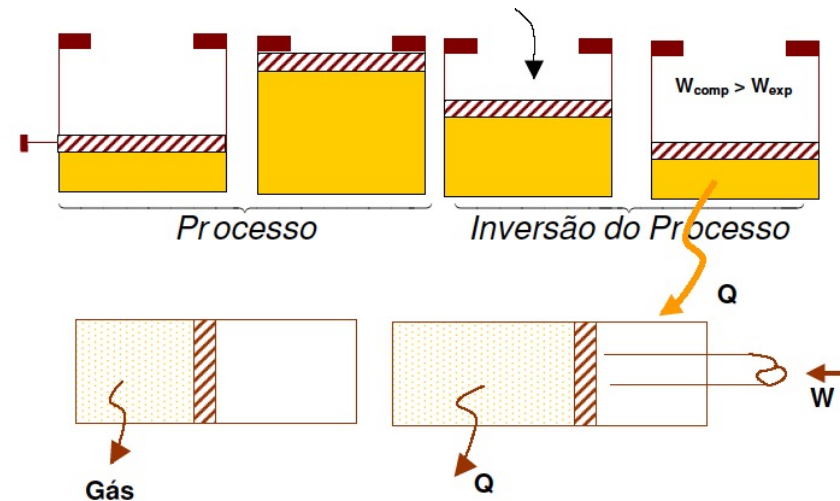
➤ Fornece o sentido da evolução espontânea de um processo:

✓ Processos Irreversíveis:

- Atrito.
- Expansão não resistida.
- Troca de calor com diferenças finitas de temperatura.
- Misturas.
- Etc...

✓ Tipos de irreversibilidades:

- Internas.
- Externas.



Energia Ordenada

- Energia ordenada: qualidade, capacidade de causar mudanças.
 - ✓ Energia armazenada de forma “ordenada” pode ser recuperada totalmente (a menos de atritos).
 - ✓ Energia cinética de corpos materiais (todas as moléculas caminham na mesma direção).
 - ✓ Energia elétrica: movimentação coletiva de elétrons.
 - ✓ Trabalho de eixo: corpo sólido em rotação.
 - ✓ Trabalho de deslocamento de fronteira.
- SE apenas energia ordenada está presente, basta a 1ª. Lei (sistemas conservativos)
 - ✓ Conceito “vulgar” de energia: energia se “gasta”; pode-se “perder” energia.
 - ✓ Conceito de conservação de energia: energia muda de forma mas sua quantidade se mantém.
 - ✓ Conceito de qualidade da energia: quantidade de energia pode ser ineficaz para outras aplicações.

Energia Ordenada

- Conversão de uma forma de energia ordenada em outra é total, se realizada reversivelmente. **Interações de trabalho.**
- A transferência de energia ordenada entre dois sistemas manifesta-se como uma interação do tipo trabalho na fronteira que separa os sistemas (**trabalho é energia ordenada em trânsito**).
- Transferências reversíveis de energia ordenada ocorrem sem variações de entropia dos sistemas envolvidos, podendo ser analisadas apenas a partir da Primeira Lei de Termodinâmica.
- Os parâmetros do meio ambiente (T_0 , p_0) não são necessários para cálculo de energia ordenada transferida de um sistema para outro.

Energia Ordenada

➤ Desprezando-se perdas de atrito, histerese, resistência elétricas, ...

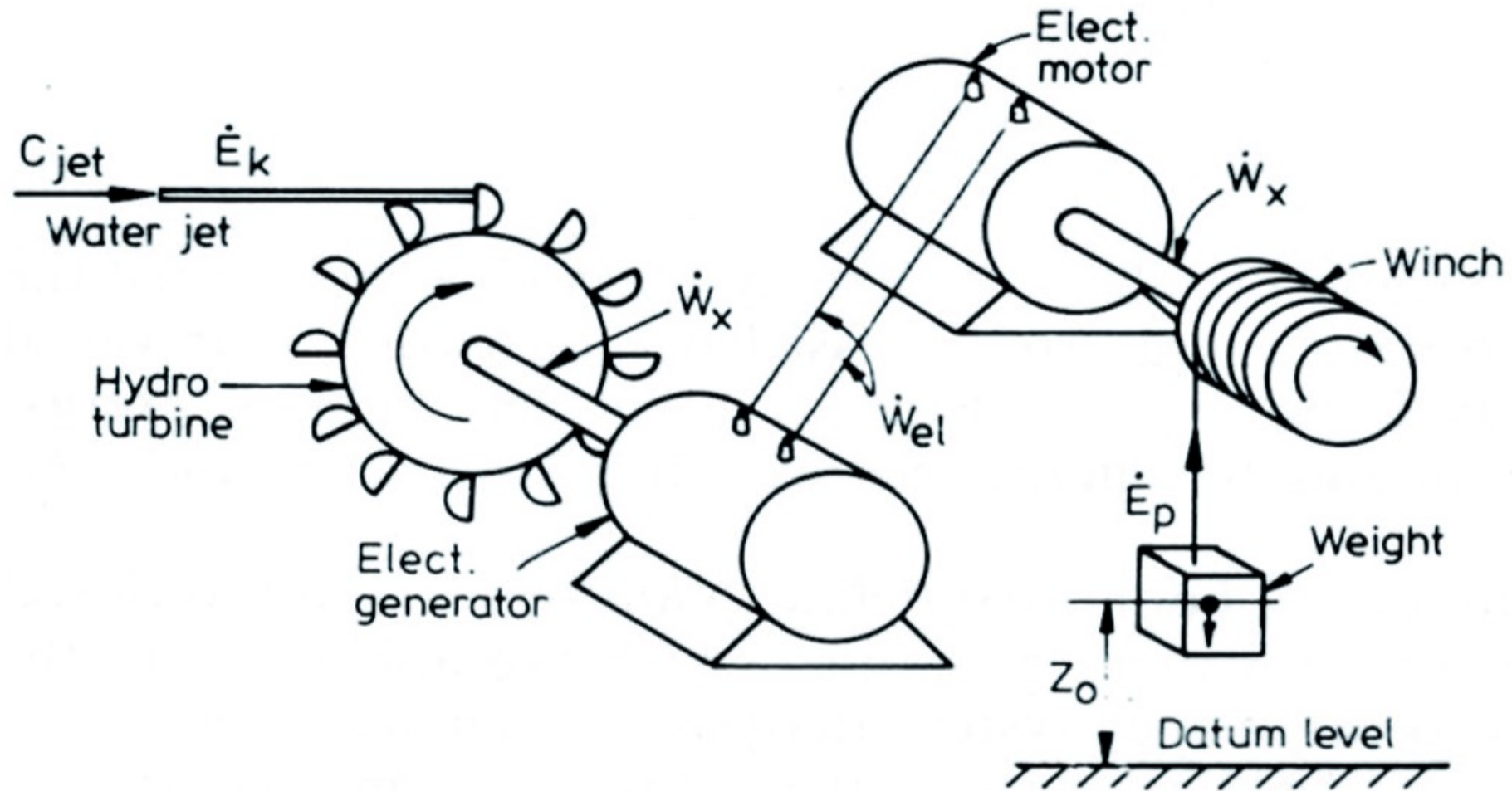


Fig 2.1 Examples of transformation of ordered energy.

Energia Desordenada

- Exemplos de energia desordenada (ou ordenada) que deve passar por processos de conversão de energia, tornando-se interna, para se tornar capaz de realizar um efeito.
 - ✓ Energia interna: u [kJ/kg].
 - ✓ Radiação Térmica: I [W/m²].
 - ✓ Energia química: PCI [kJ/kg].

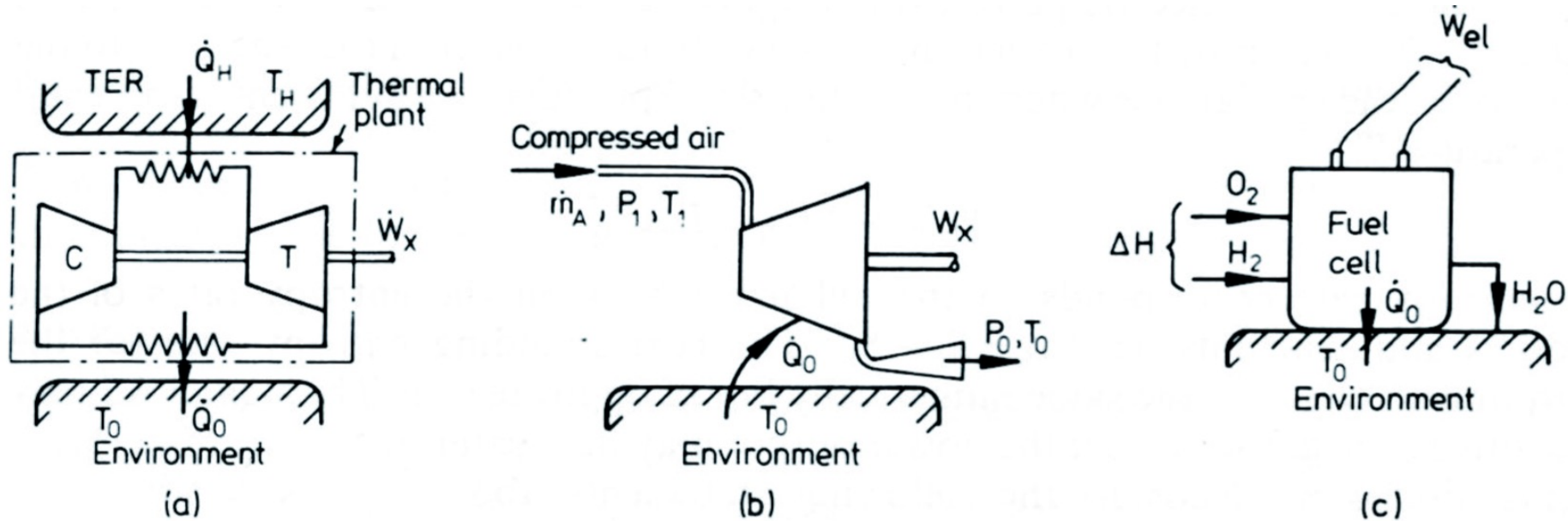


Fig 2.2 Examples of transformation of disordered energy to ordered energy.

Energia desordenada

- Condições para haver conversão máxima de energia desordenada em energia ordenada:
 - ✓ Os processos devem ser reversíveis.
 - ✓ O limite superior de conversão depende dos parâmetros termodinâmicos no qual a energia está armazenada e dos parâmetros do meio ambiente.
 - ✓ A análise dos processos de conversão deve envolver o uso da Segunda Lei da Termodinâmica.
 - ✓ A conversão de energia é em geral acompanhada pelas mudanças de entropias do sistemas que estão interagindo.



Como podemos avaliar e quantificar a qualidade de um processo de conversão de energia?

Exergia

- ✓ Quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, através de processos reversíveis, envolvendo interação apenas com os componentes do meio ambiente (Szargut).
- ✓ Trabalho de eixo ou energia elétrica necessária para produzir um material em seu estado especificado a partir de materiais comuns do meio ambiente em processos reversíveis, sendo que o calor trocado resulta apenas de interações com o meio a T_0 (Riekert).
- ✓ Parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia (Rant).
- ✓ Padrão de qualidade da energia = máximo trabalho útil que pode ser obtido de uma dada "forma de energia", utilizando os parâmetros do ambiente ($p_0, T_0, \mu_{0,i}$) como aqueles do estado de referência (Kotas).

Exergia

- ✓ Propriedade de um sistema que quantifica o máximo trabalho que pode ser obtido quando interagindo unicamente com o ambiente ($p_0, T_0, \mu_{0,i}$), passa de seu estado termodinâmico inicial até o estado morto (em equilíbrio com o ambiente) (Reistad).
- ✓ Mínimo trabalho técnico necessário para constituir um sistema a partir do ambiente de referência (Lozano Serrano).

➤ “BALANÇO” DE EXERGIA:

- ✓ “O balanço de exergia pode ser proposto de forma similar ao de energia, no entanto, enquanto pode-se atestar que o balanço de energia é o da conservação; o balanço de exergia pode ser tido como a lei da degradação de energia”.

Cálculo do trabalho e transferência de calor

- Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e (h_e + e_{c,e} + e_{p,e}) - \sum_s \dot{m}_s (h_s + e_{c,s} + e_{p,s}) + \sum_i \dot{Q}_i - \dot{W}_{VC}$$

- Hipóteses simplificadoras para todos os equipamentos:

- ✓ $\Delta E_c \approx \Delta E_p \approx 0$, assim $E = U$.

- ✓ Regime permanente: $dE_{VC}/dt = 0$.

- ✓ Sem perdas de calor para o ambiente.

- Perdas de pressão na caldeira e no condensador desprezíveis.

- Bombas e turbinas INICIALMENTE considerados isentrópicos.

- Primeira Lei da Termodinâmica simplificada:

$$\sum_i \dot{Q}_i - \dot{W}_{VC} = \sum_s \dot{m}_s h_s - \sum_e \dot{m}_e h_e$$

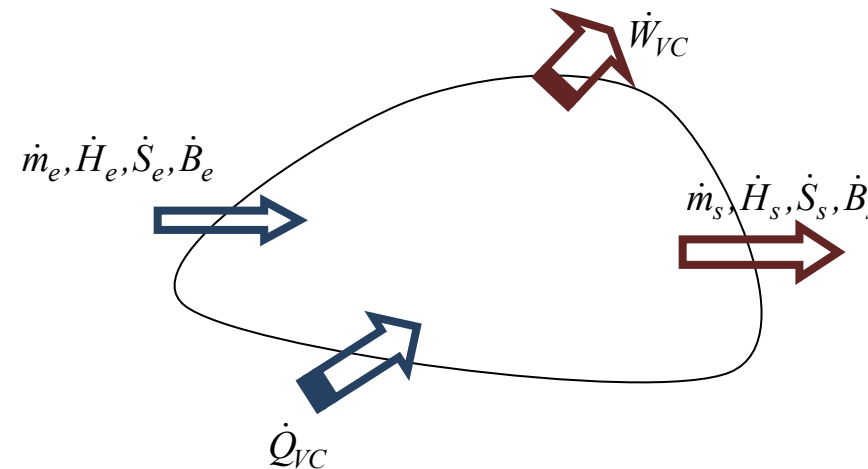
Segunda Lei da Termodinâmica – Vol. Controle

➤ Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{\sigma}$$

➤ Hipóteses simplificadoras para todos os equipamentos:

- ✓ Regime permanente: $dS_{VC}/dt = 0$.
- ✓ Uma entrada e uma saída.
- ✓ Um troca de calor com o ambiente.
- ✓ Realização de trabalho.



➤ Segunda Lei da Termodinâmica simplificada:

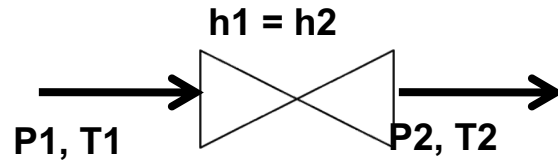
$$\dot{\sigma} = \dot{m}_s s_s - \dot{m}_e s_e - \frac{\dot{Q}_i}{T_i}$$

Conservação da energia e perda de qualidade

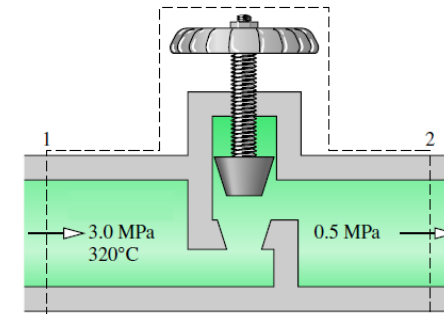
Os limites da análise energética:

➤ **Perdas não identificadas:**

- ✓ Processos isentálpicos
- ✓ Ex: válvulas de expansão

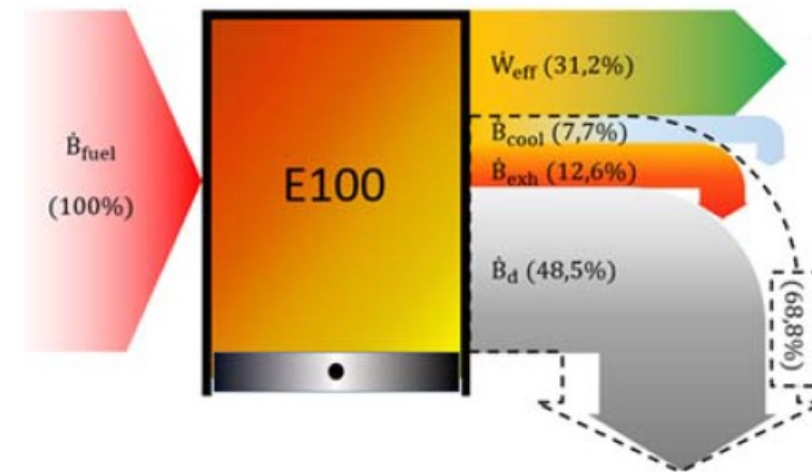
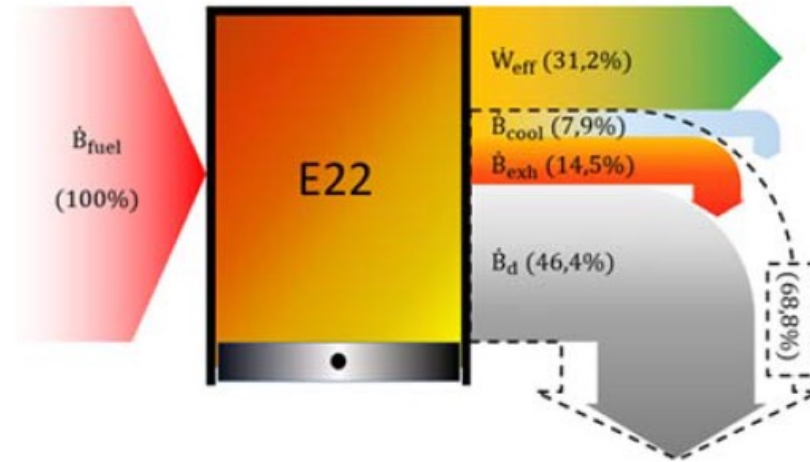
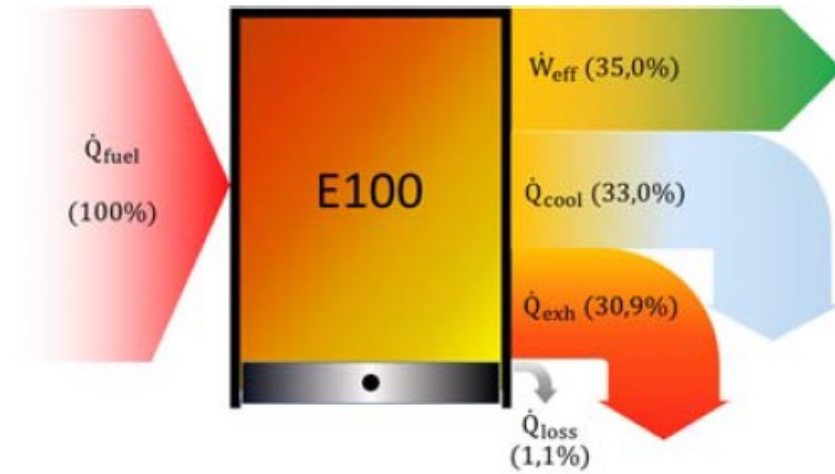
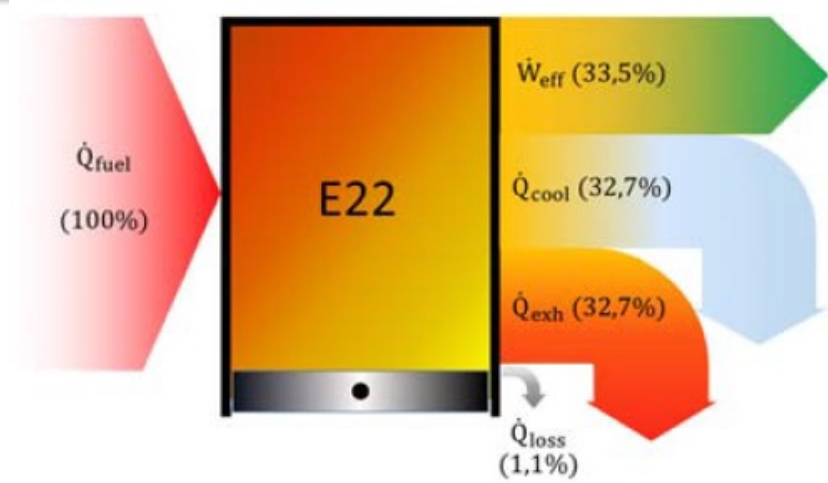


Não há perdas?

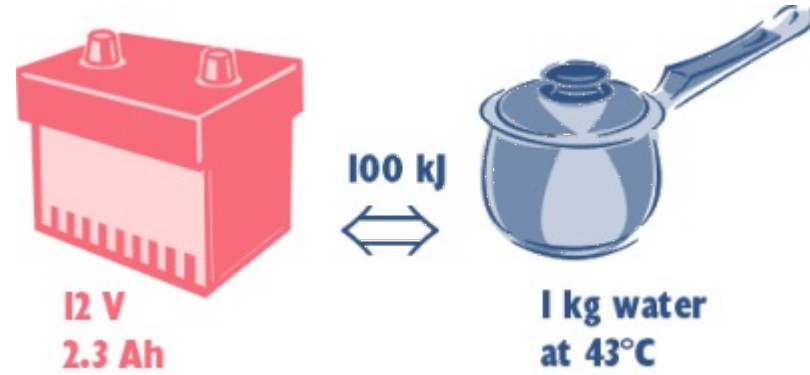


- ✓ O gás (ou vapor) “perdeu” pressão e portanto capacidade de realizar trabalho útil.

Diagramas energéticos e exergéticos

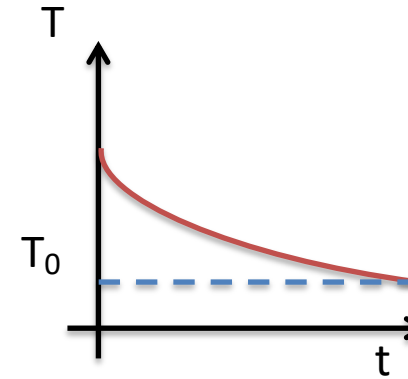
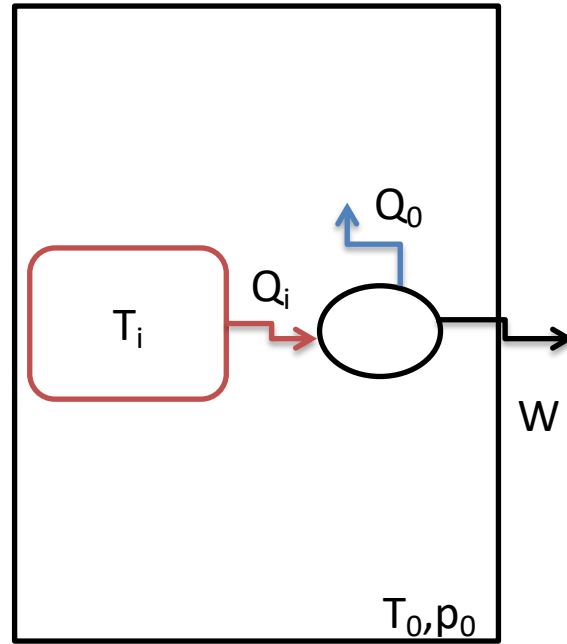


Qualidade da Energia



Energia: = 100kJ	X	100kJ
Exergia: ~ 99,5kJ	X	3,6kJ

Definição do Ambiente de Referência



➤ Ambiente de Referência para exergia:

- ✓ Grande extensão, com p_0 e T_0 uniformes.
- ✓ Toma-se alguma condição típica (25°C , 1atm) ou o lugar em que o componente está inserido (São Paulo, Rio de Janeiro, dentre outros).
- ✓ Não há variações significativas das propriedades extensivas em função de algum processo de conversão de energia.

Ambiente – Análise Exergética

- Para análise exergética, torna-se necessário modelar a atmosfera.
- O modelo resultante é chamado ambiente de referência da exergia, ou ambiente.
 - ✓ Quando há o equilíbrio de **pressão e temperatura (equilíbrio físico)** pode-se afirmar que o estado é de referência **restrito**.
 - ✓ Quando o equilíbrio é **químico e físico** diz-se que o sistema está no estado **morto**.

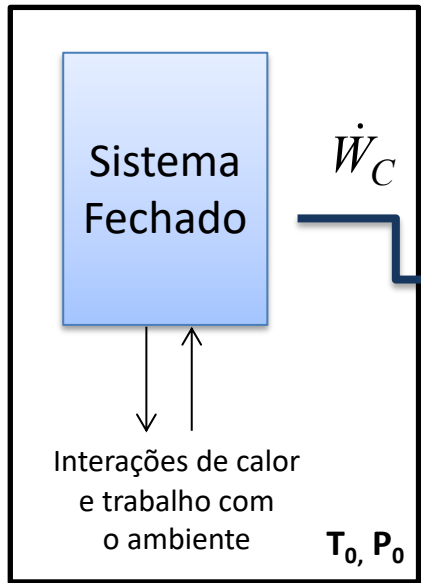
Exergia de um Sistema – Uma Propriedade?

$$B = E = E_x = (U - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \cancel{EC} + \cancel{EP}$$

Nomenclaturas
aceitas e adotadas
internacionalmente

Considere um processo em que o sistema e o ambiente entram em equilíbrio.
Calcule W_c e W_{max}

Mostra-se que esse é o
máximo trabalho teórico de
um sistema em um dado
estado termodinâmico até o
equilíbrio com o ambiente.



Fronteira do ambiente.
Calor transferido pelo
sistema completo
(ambiente + sistema) $Q_c=0$

$$\Delta U_c = \cancel{Q_c} - W_c \longrightarrow \Delta U_{amb} + \Delta U_s = -W_c$$

$$\Delta U_{amb} = T_0 \Delta S_{amb} - P_0 \Delta V_{amb} \longleftarrow \Delta V_{amb} = -(V_0 - V)$$

Varição do volume do
ambiente é oposta em
sinal a do sistema

$$\Delta U_{amb} + (U_0 - U) = -W_c$$

$$W_c = (U - U_0) + T_0 \Delta S_{amb} + P_0(V - V_0) \quad \sigma = \Delta S_{amb} + \Delta S_{sist} = \Delta S_c$$

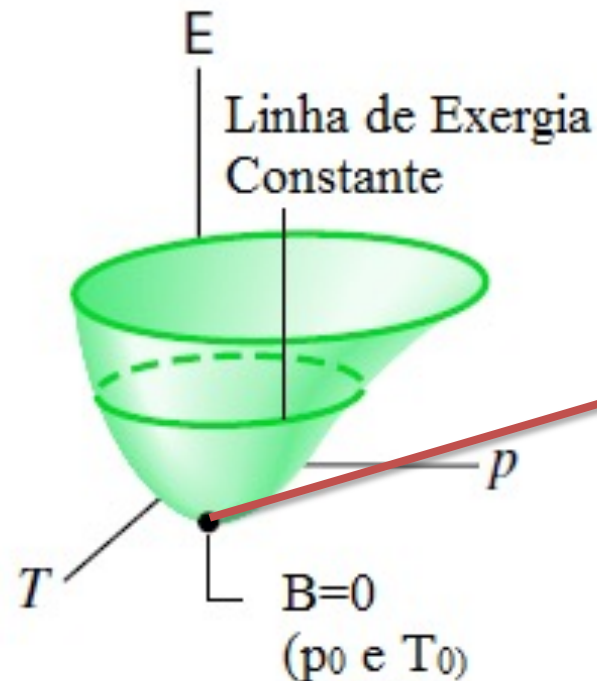
$$\Delta S_{amb} = (S_0 - S)_{sist} - \sigma = (S - S_0) - \sigma$$

$$W_c = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P_0(V - V_0) - T_0 \sigma$$

Se $T_0 \sigma = 0$, $B = W_c = W_{max}$

Considerações acerca da exergia

- Exergia é uma medida de desvio do estado de sistema quando comparado com o ambiente. É portanto, um atributo do sistema mais do meio. Porém uma vez que define-se o meio ela é definida em termos de propriedades do sistema, então é uma propriedade.
- Exergia **não** é conservativa. Exergia é um **padrão de qualidade termodinâmica** do sistema, uma vez que indica o quanto da energia não pode ser convertida em trabalho.



O valor da exergia não pode ser negativo. Se o sistema está em qualquer condição diferente do estado morto, este será capaz de espontaneamente mudar para condição do ambiente.

Balanço de exergia para um sistema

- Um sistema fechado pode chegar a um estado novo de várias maneiras, inclusive via iterações de trabalho e calor.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_i = (U_i - U_0) + p_0(V_i - V_0) - T_0(S_i - S_0) + EC_i + EP_i \\ B_2 - B_1 = (U_2 - U_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) + (EC_2 - EC)_1 + (EP_2 - EP_1) \end{array} \right.$$

$$\Delta E = \int_1^2 \delta Q - W_2 \quad \xleftarrow{+} \quad \Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \sigma$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E - T_0 \Delta S = \int_1^2 \delta Q - T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} - W - T_0 \sigma \\ B_2 - B_1 - p_0(V_2 - V_1) = (U_2 - U_1) - T_0(S_2 - S_1) + (EC_2 - EC)_1 + (EP_2 - EP_1) \end{array} \right.$$

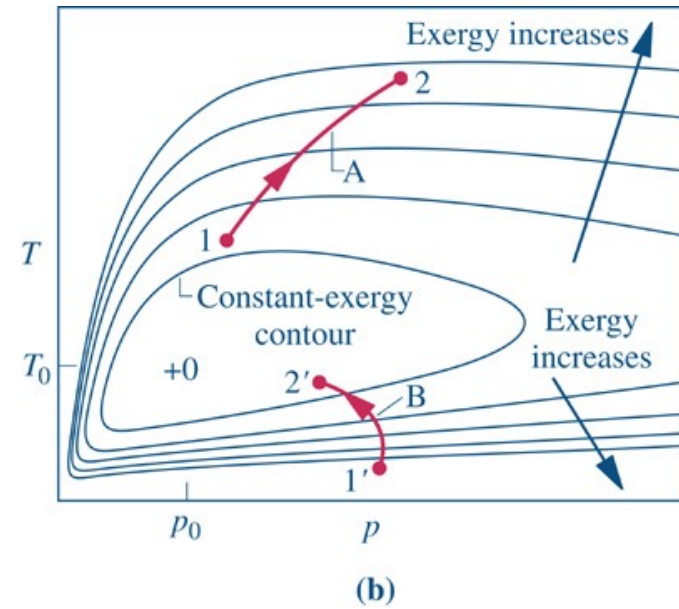
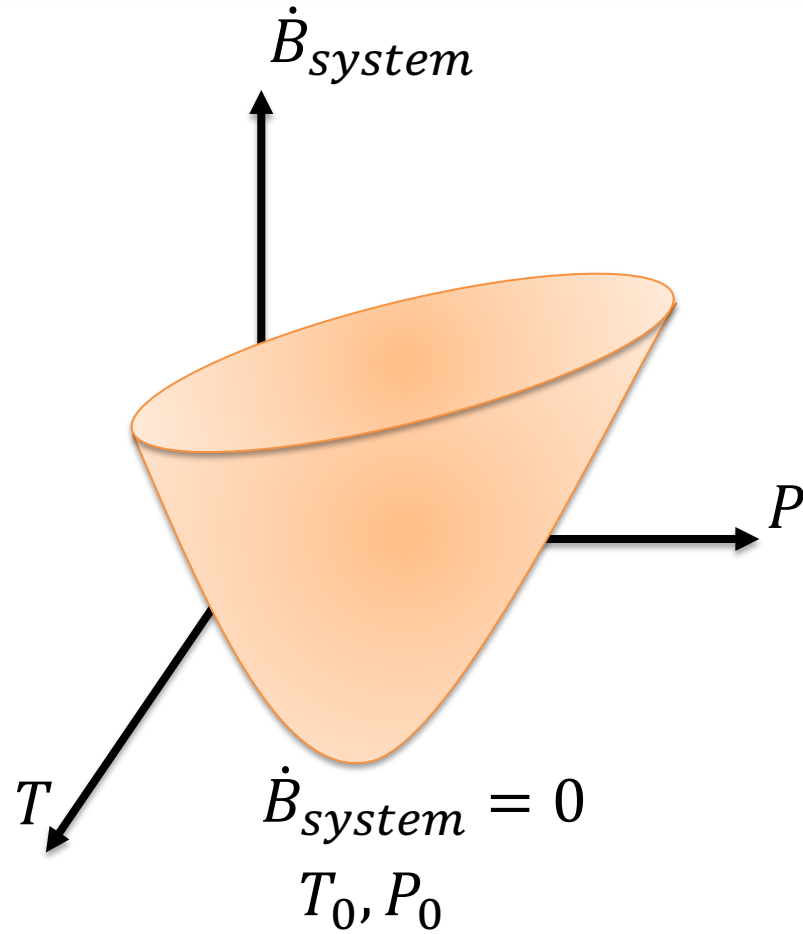
$$B_2 - B_1 - p_0(V_2 - V_1) = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_1 Q_{2-1} - W_2 - T_0 \sigma$$

$$B_d = T_0 \sigma$$

$B_d = 0$ (processo reversível)

$B_d > 0$ (processo irreversível)

Mudança de estado do sistema



Análise exergetica em [J] ou em [W]

- Variação da exergia de um sistema é igual as transferências de exergia associadas as trocas de calor subtraído do trabalho realizado e da destruição da exergia associada ao processo de conversão de energia de 1 para 2.

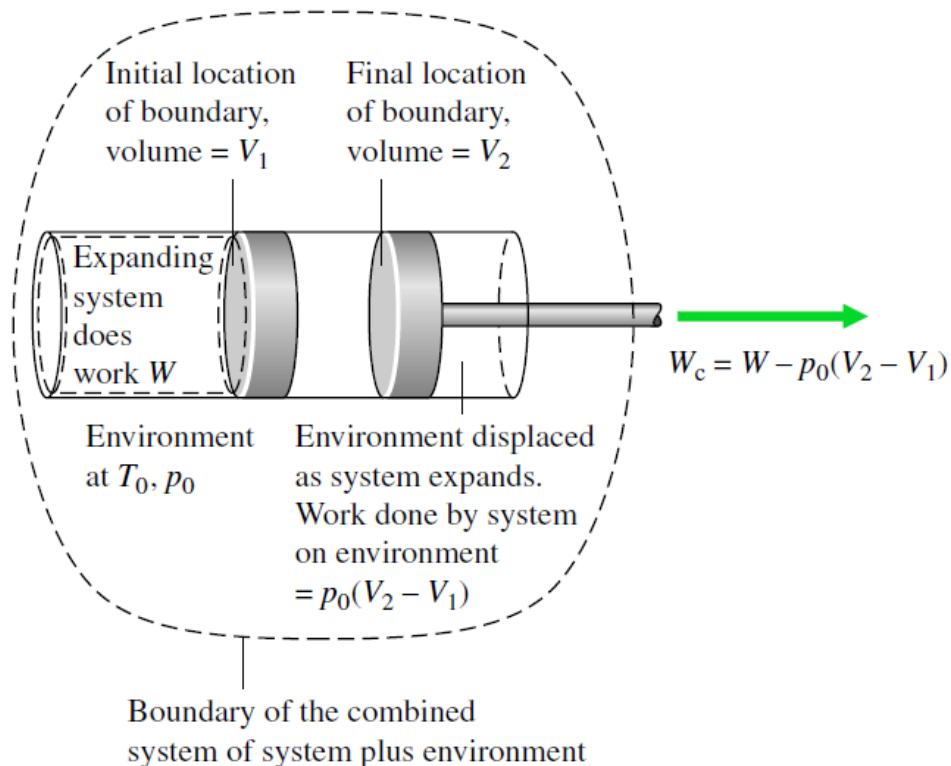
$$B_2 - B_1 = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i - [W - P_0(V_2 - V_1)] - B_d$$

- A taxa com a qual a exergia do sistema varia no tempo é igual a taxa de exergia recebida ou perdida na forma de calor, subtraída da potência efetiva e da taxa com a qual a exergia é destruída.

$$\frac{dB}{dt} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt}\right) - \dot{B}_d$$

Considerações sobre o termo: $p_0\Delta V$

- Exergia que acompanha a trabalho. A magnitude da exergia é avaliada como o trabalho máximo que pode ser extraído com o sistema interagindo com o ambiente. No caso da imagem, é mostrada a parte do trabalho útil que é usada para a contração/expansão do sistema com relação a vizinhança, reduzindo o trabalho máximo.



$$Exergia_{trabalho} = [W - P_0(V_2 - V_1)]$$

$$Exergia_{potência} = \left[\dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt} \right]$$

Exercícios - Demonstração

(2) Dois corpos idênticos, de calor específico constante a T_1 e T_2 , respectivamente, são usados como reservatórios térmicos para uma máquina térmica. Se os dois corpos permanecem a pressão constante e não experimentam mudanças de fase, considerando C_p constante, demonstre que a quantidade de trabalho produzida é:

$$W = C_p (T_1 + T_2 - 2T_f)$$

No qual, T_f é a temperatura final alcançada por ambos os corpos. Demonstre que, quando W é máximo:

$$T_f = (T_1 \cdot T_2)^{1/2}$$

(3) Dois corpos idênticos com C_p constante encontram-se a mesma temperatura inicial T_1 . Um refrigerador é colocado entre eles até que a temperatura de um dos corpos alcance T_2 . Se a pressão permanece constante nos dois corpos e não sofrem mudança de fase, obtenha a expressão da quantidade mínima de trabalho para isto.

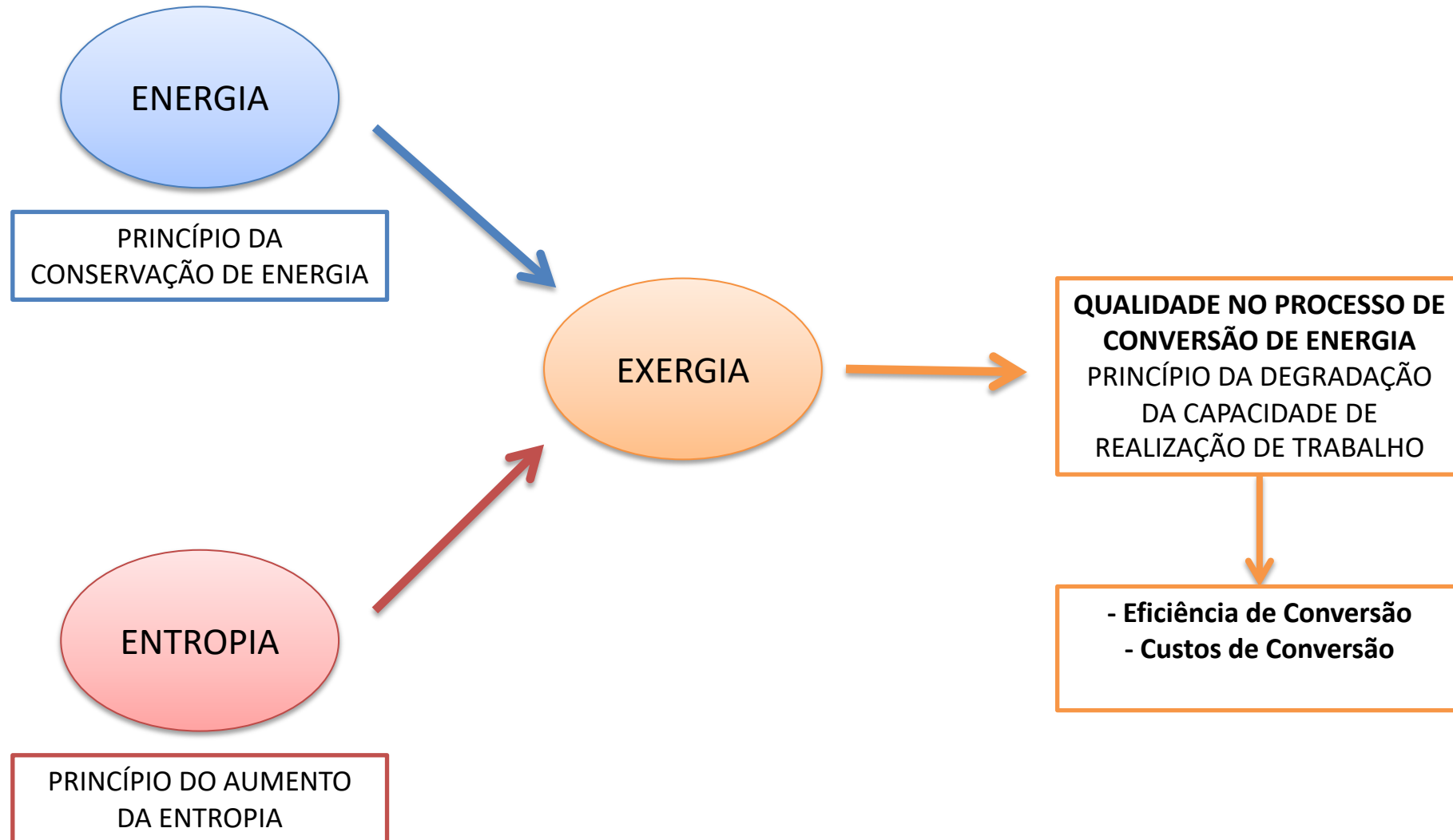
(4) Considere duas massas de iguais de água, $m_A = m_B$ que estão inicialmente a $T_{A,O} > T_{B,O}$.

(a) Se as duas massas são colocadas em contato térmico atingindo o equilíbrio térmico a temperatura $T_{A,\infty} = T_{B,\infty} = T_\infty$. Determine a temperatura T_∞ e a entropia gerada no processo de troca de calor (S_g).

(b) Admita que um motor térmico é colocado para operar continuamente entre T_A e T_B e que após um número suficiente de ciclos as duas massas atingem uma temperatura igual a $T_{\infty,f}$. Determine $T_{\infty,f}$ e o trabalho líquido produzido pelo ciclo.

(c) Mostre que W é proporcional a S_g .

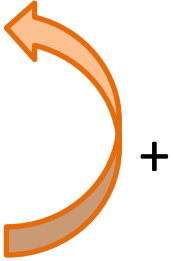
Introdução - Análise Exergética



Introdução - Análise Exergética

➤ Combinação da Primeira com a Segunda Leis da termodinâmica:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e h_{tot,e} - \sum \dot{m}_s h_{tot,s}$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} + \dot{S}_{ger} \quad * (-T_0)$$


$$\frac{d(E + p_0V - T_0S)}{dt} = \frac{dB}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) - \dot{W}_{ef} - T_0 \dot{S}_{ger} - \left(\sum_s \dot{H}_s - \sum_e \dot{H}_e - T_0 \left(\sum_s \dot{S}_s - \sum_e \dot{S}_e\right)\right)$$

$$\frac{dB_{VC}}{dt} = \sum_e \dot{m} b_e - \sum_s \dot{m} b_s + \dot{B}_{Q_i} - \dot{W}_{VC} - \dot{B}_d$$

$$B_{VC} = (U - U_0)_{VC} - T_0(S - S_0) + P_0(V - V_0) + Ec + EP \quad [J]$$

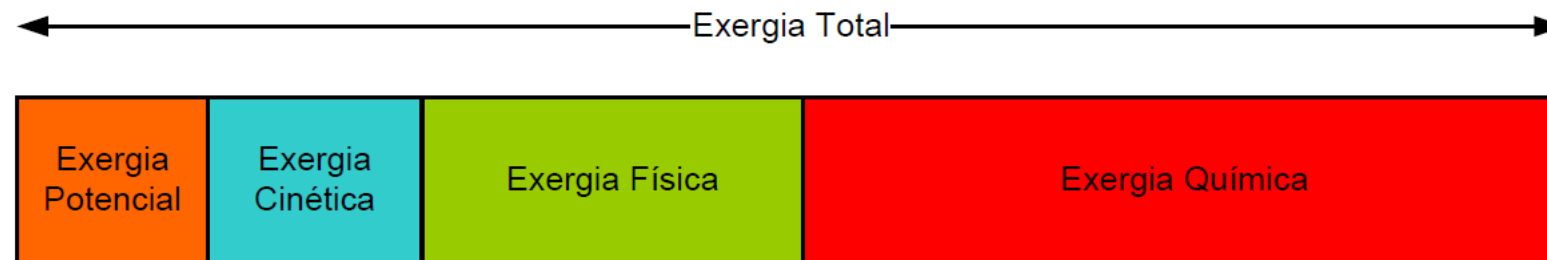
Introdução - Análise Exergética

- Variação temporal da exergia: $\frac{d(E + p_0V - T_0S)}{dt} = \frac{dB}{dt}$
- Variação da exergia entre e e s : $\sum_s \dot{H}_s - \sum_e \dot{H}_e - T_0(\sum_s \dot{S}_s - \sum_e \dot{S}_e)$
- Exergia associada à troca de calor: $\sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right)$
- Trabalho Líquido (Exergia Pura): \dot{W}_{ef}
- Exergia destruída: $T_0 \dot{S}_{ger}$

Introdução - Análise Exergética

➤ Exergia:

- ✓ Máximo trabalho que pode ser realizado quando um sistema evolui do estado em que se encontra até o estado de equilíbrio com os componentes do meio ambiente (equilíbrio mecânico, térmico e químico), através de processos reversíveis, interagindo apenas com os componentes do meio ambiente.
- ✓ Szargut et al. (1998) propõe um ambiente de referência como será visto no capítulo de reações químicas.



Pellegrini (2008) baseado em Kotas (1985)

Exercício

- (5) Considere o rejeito térmico de um processo com vazão mássica \dot{m} , temperatura T_r e pressão p_r . A pressão e temperatura atmosférica são p_0 e T_0 , respectivamente.
- (a) Escoamento é resfriado até T_0 através do contato térmico direto com a atmosfera. Modelando o rejeito como um gás ideal (R, c_p), determine a taxa de transferência de calor para atmosfera (\dot{Q}) e a taxa de geração de entropia associada ao resfriamento \dot{S}_g .
- (b) Um método possível para utilizar os gases de exaustão para gerar trabalho mecânico consiste em operar um motor térmico entre os fluxos de gases e a atmosfera. Modelando o funcionamento do motor como reversível, determine a potência útil gerada pelo motor e a taxa de rejeito térmico para a atmosfera.
- (c) Demonstre que a potência mecânica gerada em (b) é proporcional a \dot{S}_g .

Exergias Cinética e Potencial

- **Exergia** de formas organizadas de energia ou de interações tipo trabalho (conversões completamente reversíveis):
- B_K macroscópica = **exergia cinética** do sistema

$$B_K = \frac{1}{2} mV^2$$

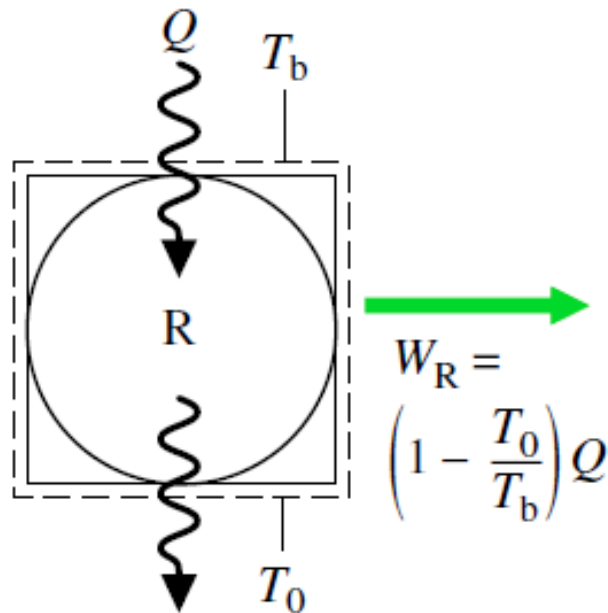
- B_{pot} gravitacional macroscópica = **exergia potencial**

$$B_p = mgz$$

- Outras formas de **energia do tipo campo** (elétrico, magnético) também são exergia pura;
- **Trabalho** também pode ser considerado como exergia pura, pois pode se transformar em qualquer forma de energia de tipo conservativo (exergia)

Exergia Associada a Transferência de Calor

- Exergia associada a interações de calor: quantidade máxima de trabalho que pode ser produzida entre o sistema a temperatura T e o meio a temperatura T_0 : máquina de Carnot operando entre T e T_0 .

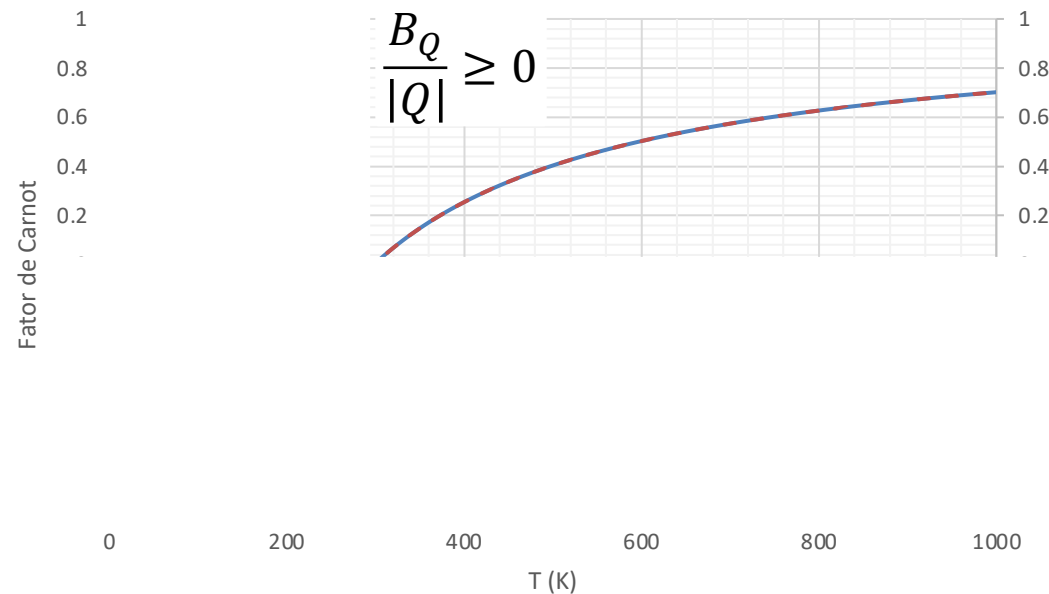
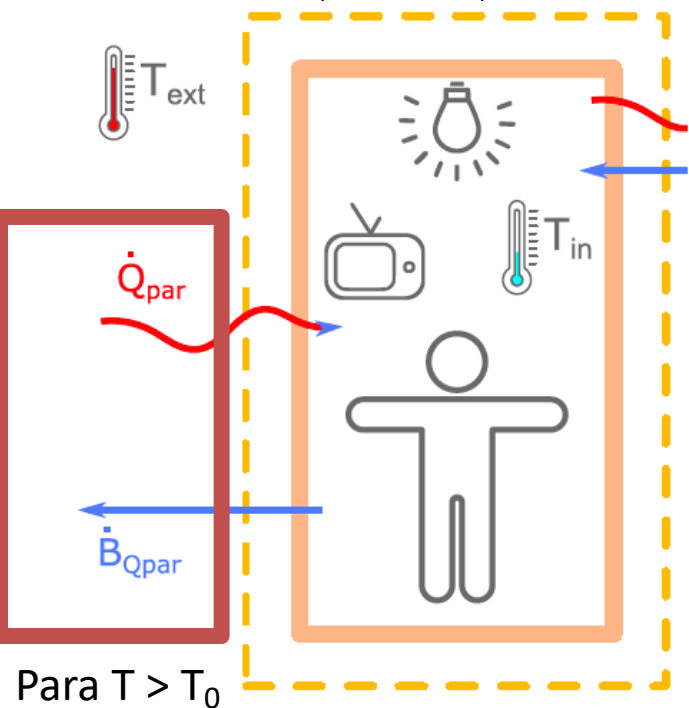


$$B_Q = W_{MAX} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

Exergia Associada a Transferência de Calor

- Exergia associada a interações de calor: quantidade máxima de trabalho que pode ser produzida entre o sistema a temperatura T e o meio a temperatura T_0 : máquina de Carnot operando entre T e T_0 .

$$B_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$



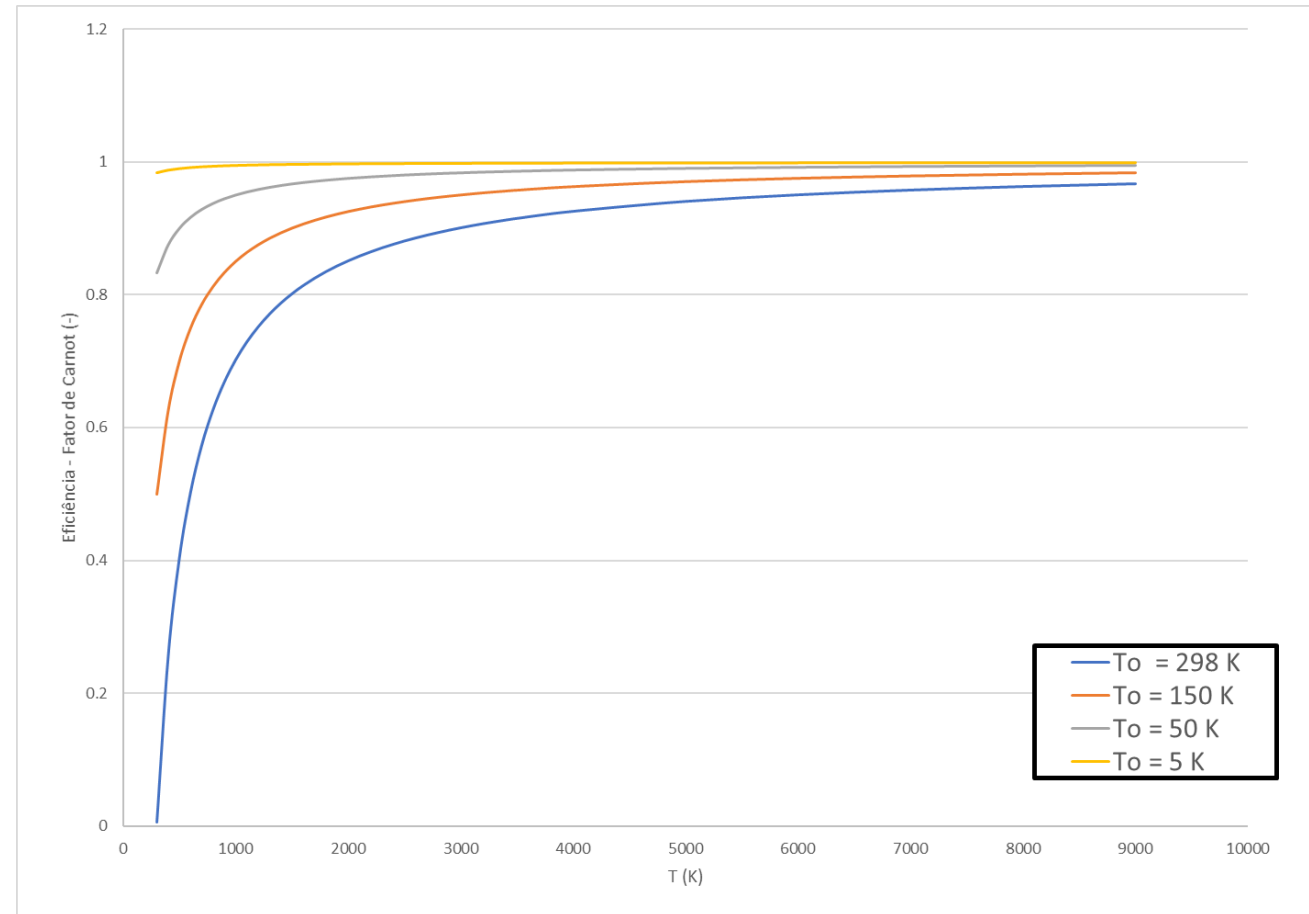
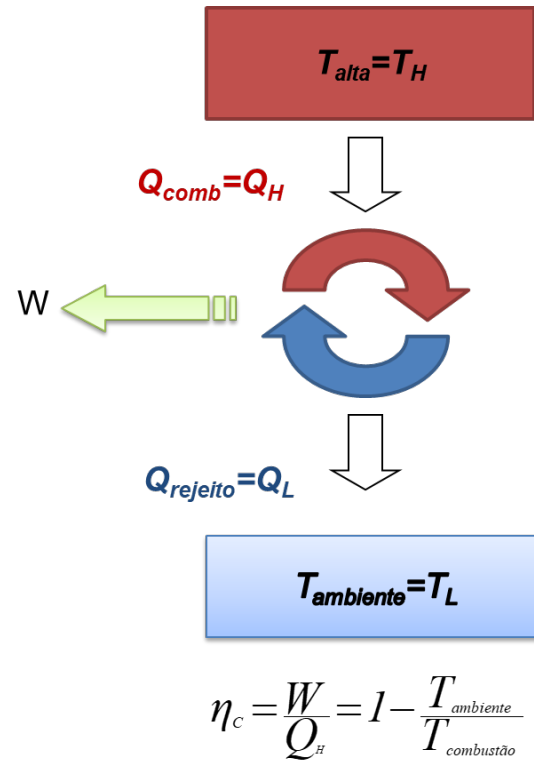
$$\theta = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

Exergia associada a interações de **calor**:

Quando $T > T_0 \rightarrow$ trabalho máximo (máquina de Carnot)

Quando $T < T_0 \rightarrow$ trabalho mínimo para levar o sistema de T_0 até T (refrigerar o sistema). **Fator de Carnot maior que a unidade** indica o quanto é difícil e custoso refrigerar (contra um processo natural).

Fator de Carnot em Função da Temperatura Amb.



- (7) Num trocador de calor a contracorrente, ar é aquecido a partir de 40°C e um fluxo de gases é resfriado de 450°C até 200°C . O calor perdido pelo trocador para o meio corresponde a 20% do calor transferido do fluxo de gases. Determine a irreversibilidade (por unidade de massa) do processo de transferência de calor assumindo gases e ar como gases perfeitos com as mesmas propriedades do ar a temperatura de 20°C . Considere que ambos os fluidos possuem a mesma vazão mássica. Qual é a exergia perdida ao meio ambiente? Qual a exergia destruída total?
- (8) Um refrigerador operando em regime permanente com coeficiente de performance de 2,5 remove 2,22kW do compartimento de um freezer a 0°C . Determine a potência consumida pelo refrigerador, supondo que o ambiente esteja a 20°C , compare-a com aquela requerida por um refrigerador reversível operando nas mesmas condições.

Exergia Física para Volume de Controle

- **Exergia** associada a uma **vazão de massa entrando ou saindo de um volume de controle**
- Fluxo de massa está em um estado genérico (p, T, h, s). Sua exergia é o trabalho máximo (reversível) que seria obtido para levar até o estado inativo (p_0, T_0, h_0, s_0).

Primeira e segunda leis p/ o V.C. : $B = W_{\max}$

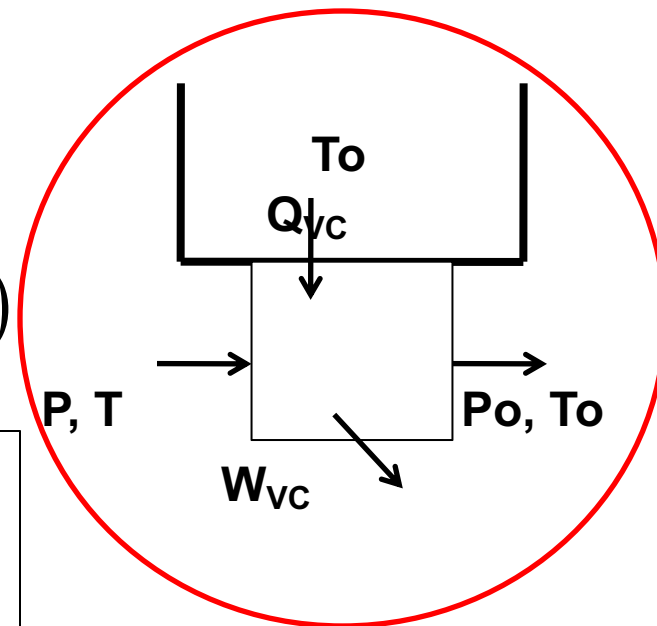
Qual a diferença com Energia de Gibbs?

Substituindo tudo e rearranjando:

$$H_o - H = Q_{VC} - W_{VC} \quad Q_{VC} = T_o(S_o - S)$$

$$B_f = (H - H_o) - T_o(S - S_o)$$

$$b_f = (h - h_o) - T_o(s - s_o)$$



Exergia Física

➤ Exergia Física ou Termomecânica de um Sistema:

$$B_i = (E_i - E_0) + p_0(V_i - V_0) - T_0(S_i - S_0)$$

$$b_i = (e_i - e_0) + p_0(v_i - v_0) - T_0(s_i - s_0)$$

➤ Exergia Física de um Fluxo

$$B_i = H_i - H_0 - T_0(S_i - S_0)$$

$$b_i = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)$$

Exergia Física – vazão mássica

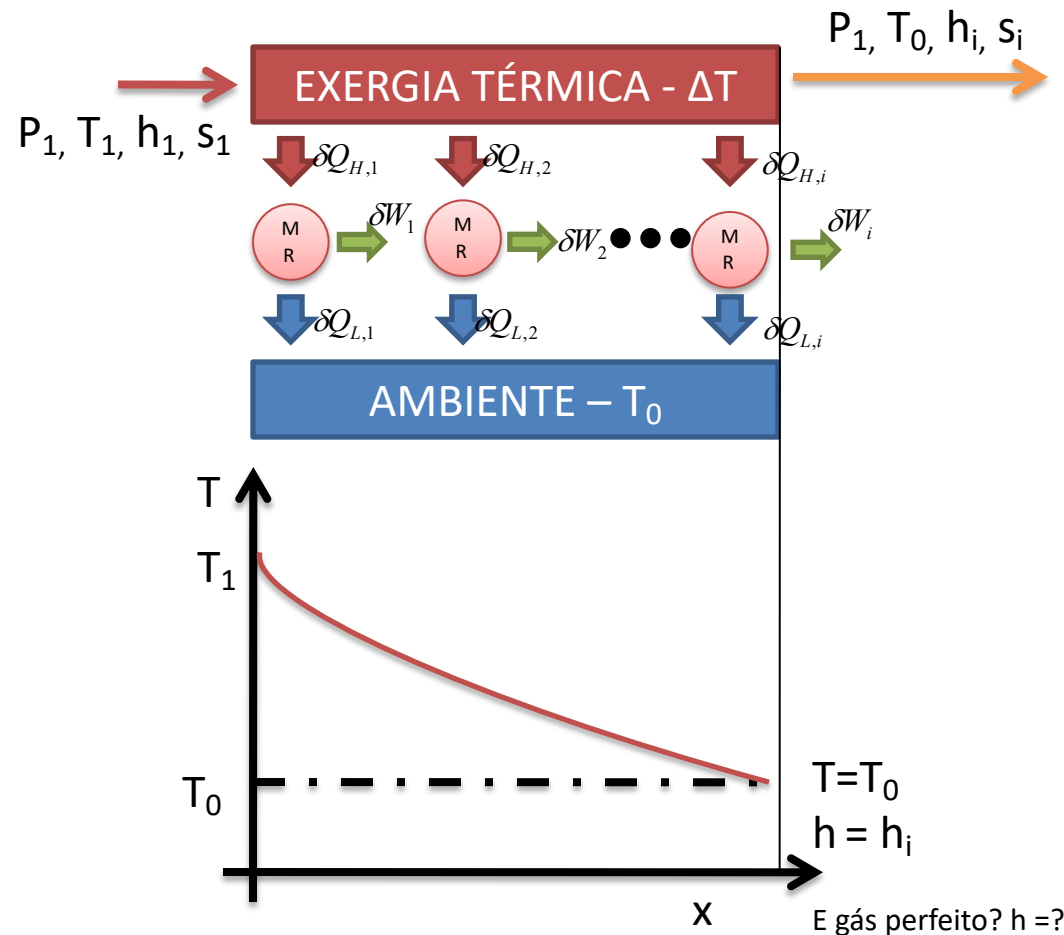
- Exergia física depende de desequilíbrio de P e de T. Assim, a exergia física pode ser escrita como:

$$b_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0) = b_f^{\Delta T} + b_f^{\Delta p}$$

- Ou seja, é sempre possível calcular a exergia por meio de um caminho reversível isotérmico, seguido de um caminho isobárico (ou vice-versa).
- Embora o cálculo do efeito separado de ΔT e Δp pode ser difícil, é sempre bom ter claro que os dois efeitos ocorrem simultaneamente.
- **Para gás ideal**, é fácil separar as parcelas dependentes da T e de p

Interpretação - exergia associada a vazão mássica

- Fluxo de massa está em um estado genérico (p, T, h, s). Sua exergia é o trabalho máximo (reversível) que seria obtido para levar até o estado inativo (p_0, T_0, h_0, s_0).



Qual o W_{MAX} nesse processo?
Como posso aproveitar a exergia associada a ΔT de uma vazão mássica?

Se for gás perfeito?

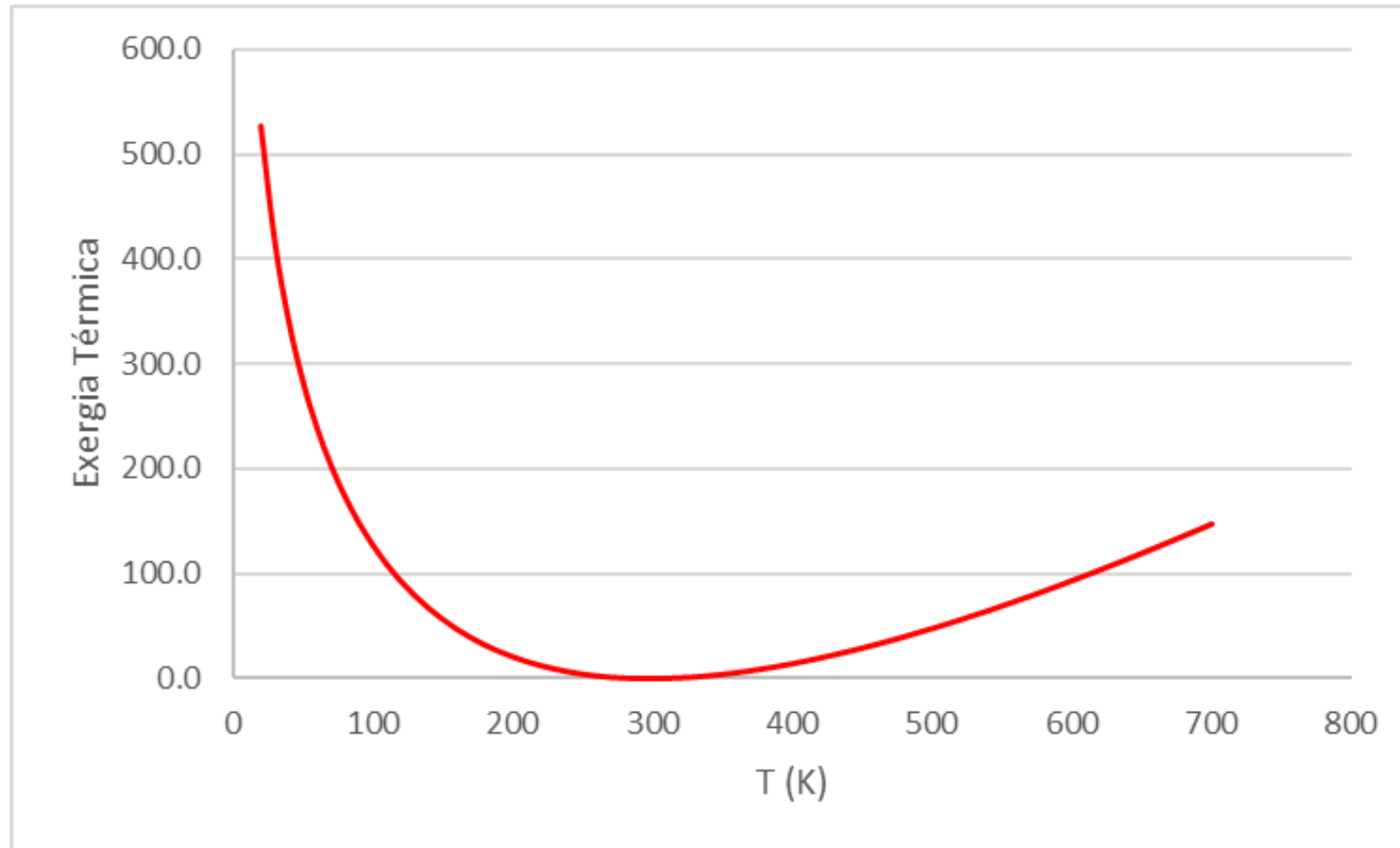
$$W_{MAX} = c_p \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right)$$

Como chegamos nessa Equação via interpretação física

Primeira e Segunda Lei...

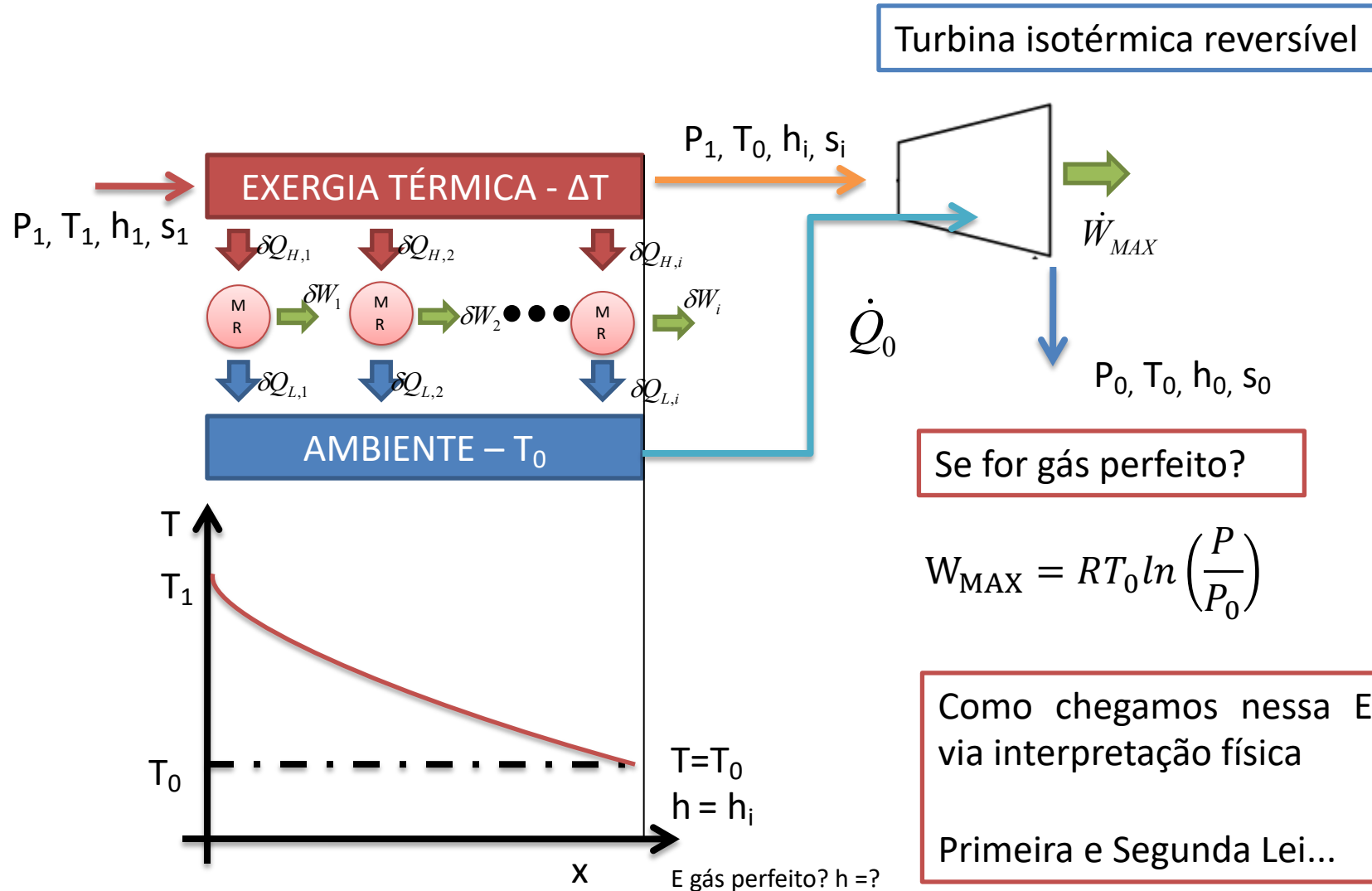
Exergia Térmica

- A exergia térmica pode ser negativa?
- Faz sentido falarmos em energia térmica?
- Como explicamos o caso de $T < T_0$?



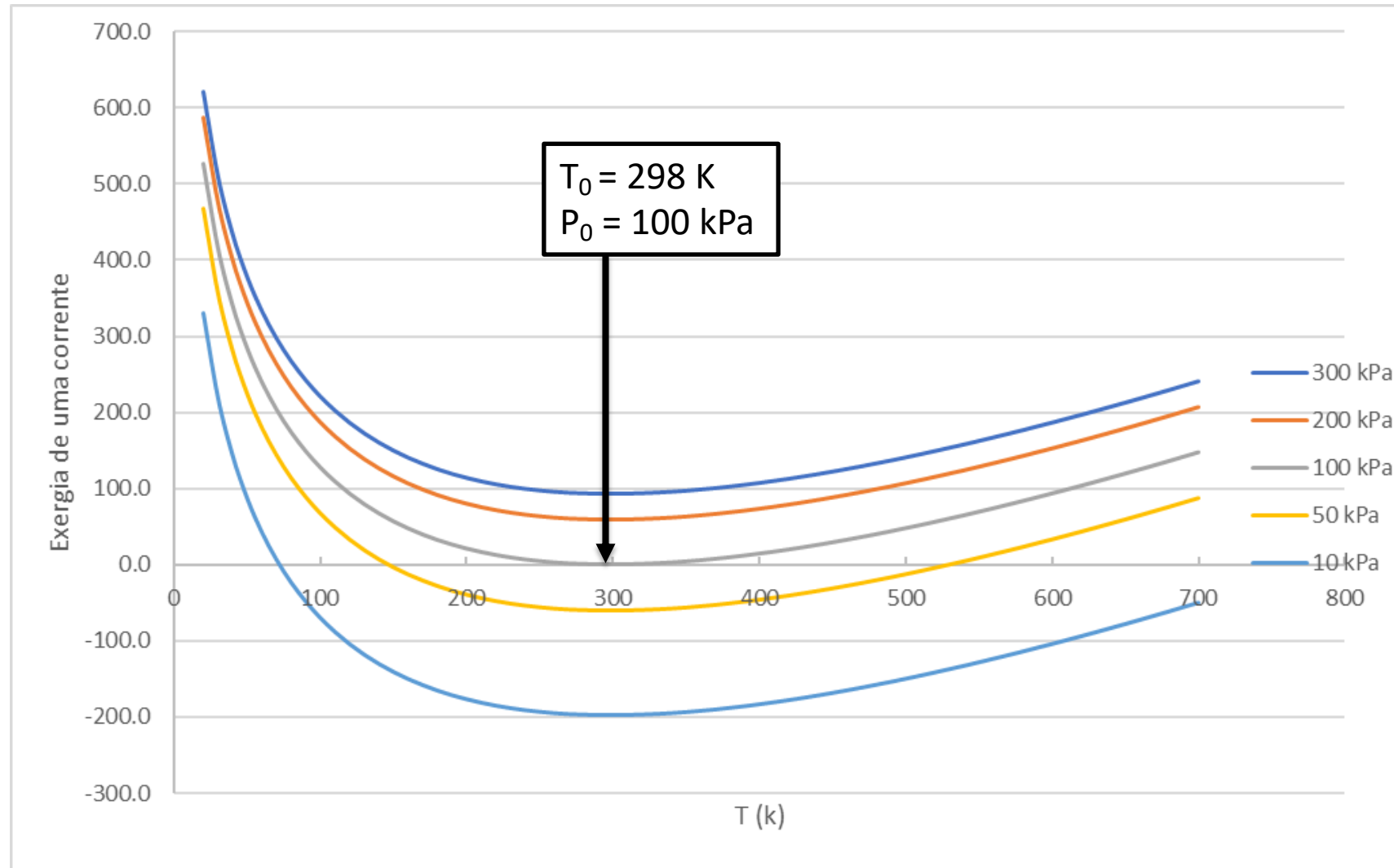
Com interpretar?

- Fluxo de massa está em um estado genérico (p, T, h, s). Sua exergia é o trabalho máximo (reversível) que seria obtido para levar até o estado inativo (p_0, T_0, h_0, s_0).



Exergia associada a uma corrente ou vazão mássica

Evitar ao máximo o termo exergia de fluxo, por que? -> Fluxo = [Unidade]/m²



Conceituação de Exergia física – VC

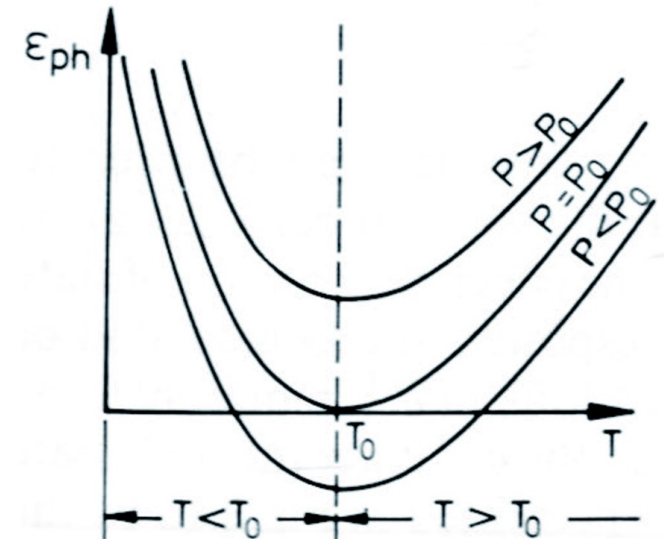
- Exergia associada a um **fluxo de massa entrando ou saindo de um volume de controle**
- Em um processo entre dois estados quaisquer, a **variação da exergia de fluxo** será:

$$b_{f2} - b_{f1} = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1)$$

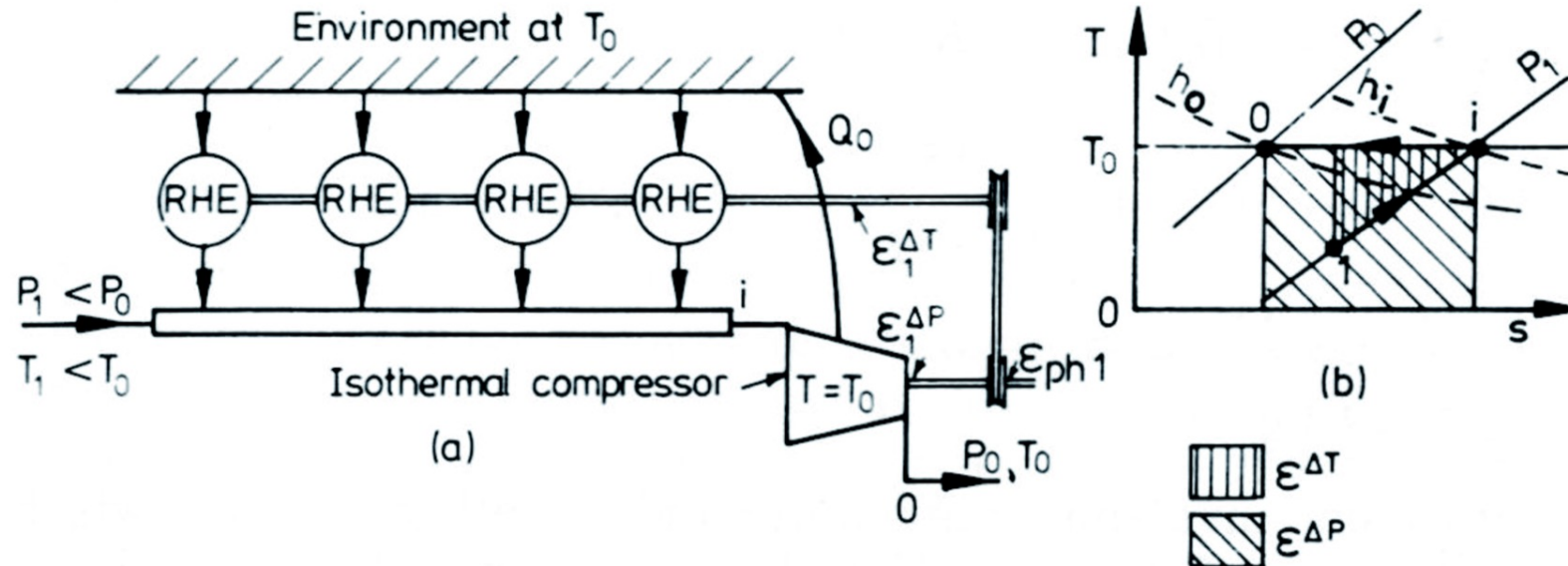
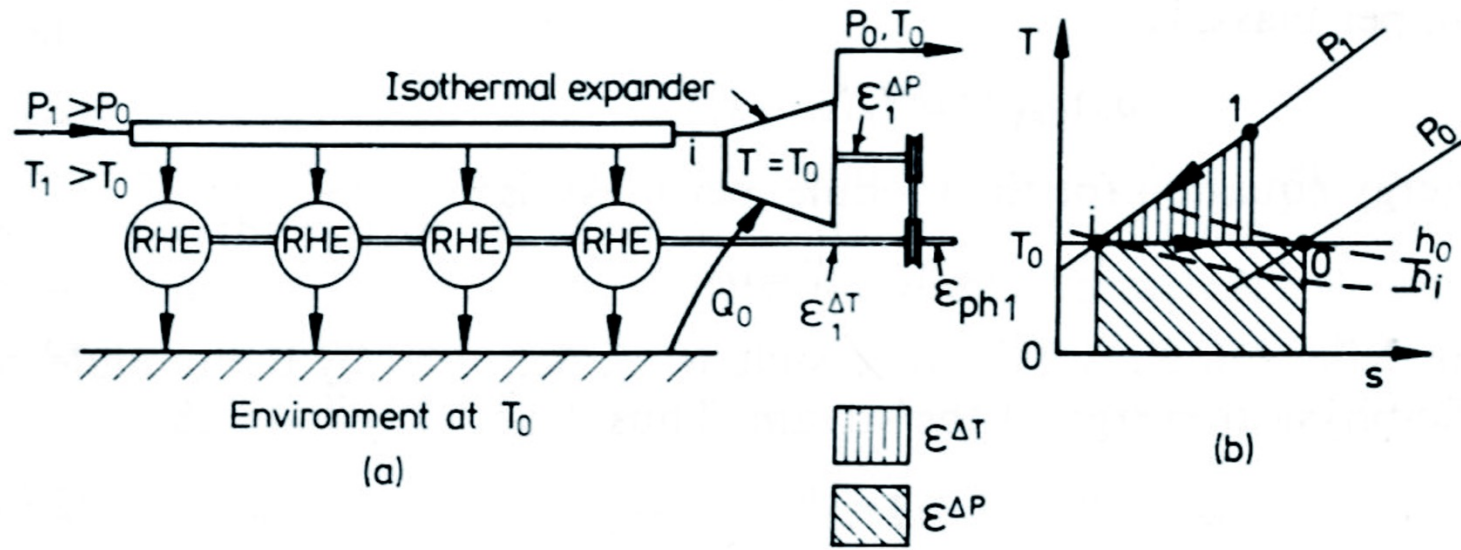
Qual a diferença com Energia de Gibbs?

ou seja, depende das propriedades do sistema e temperatura T_0 do ambiente.

- A exergia de fluxo entrando ou saindo de um volume de controle **PODE SER** negativa.
- Quero que me explique depois que deduzir para gás perfeito

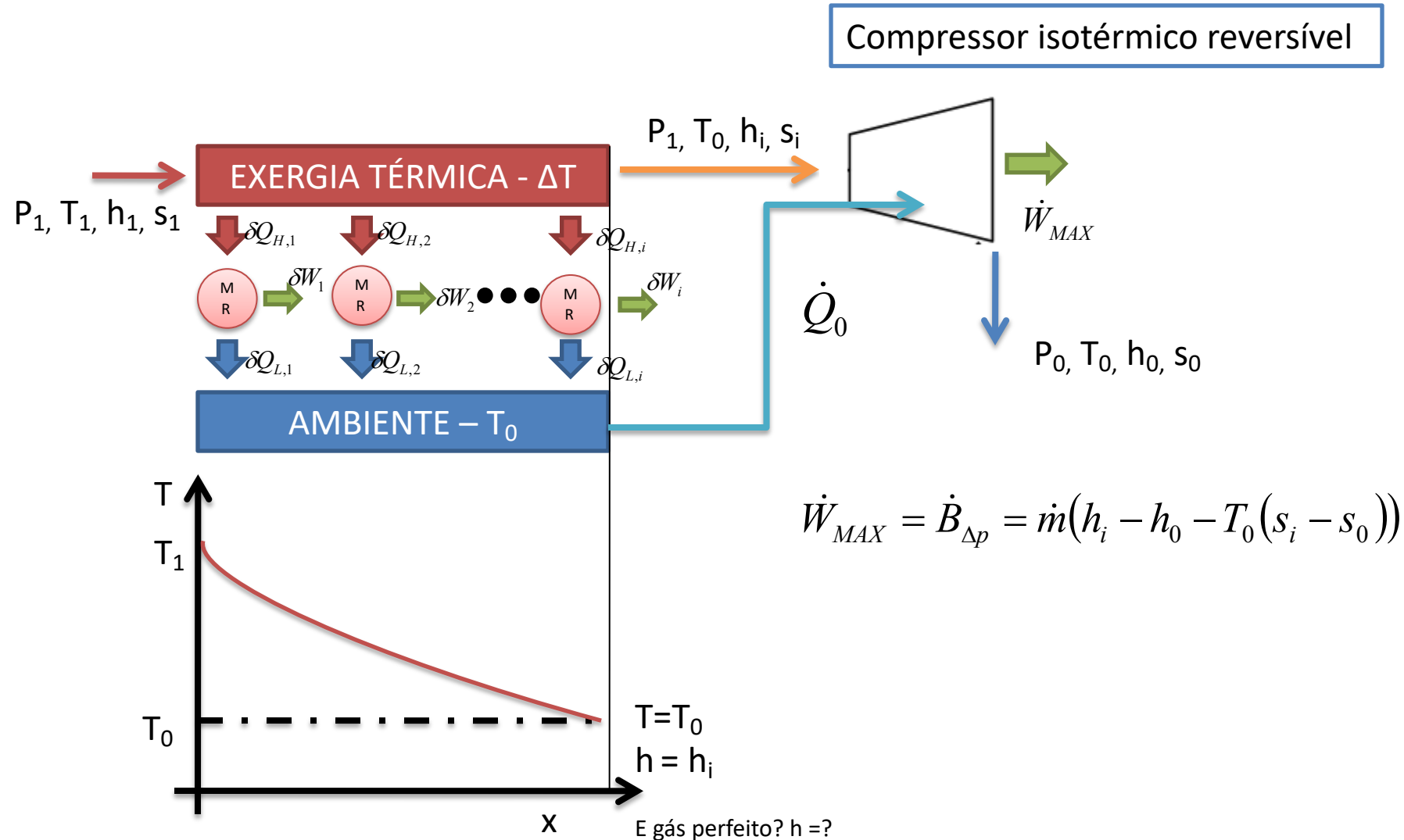


T < T₀ qual a diferença com T > T₀

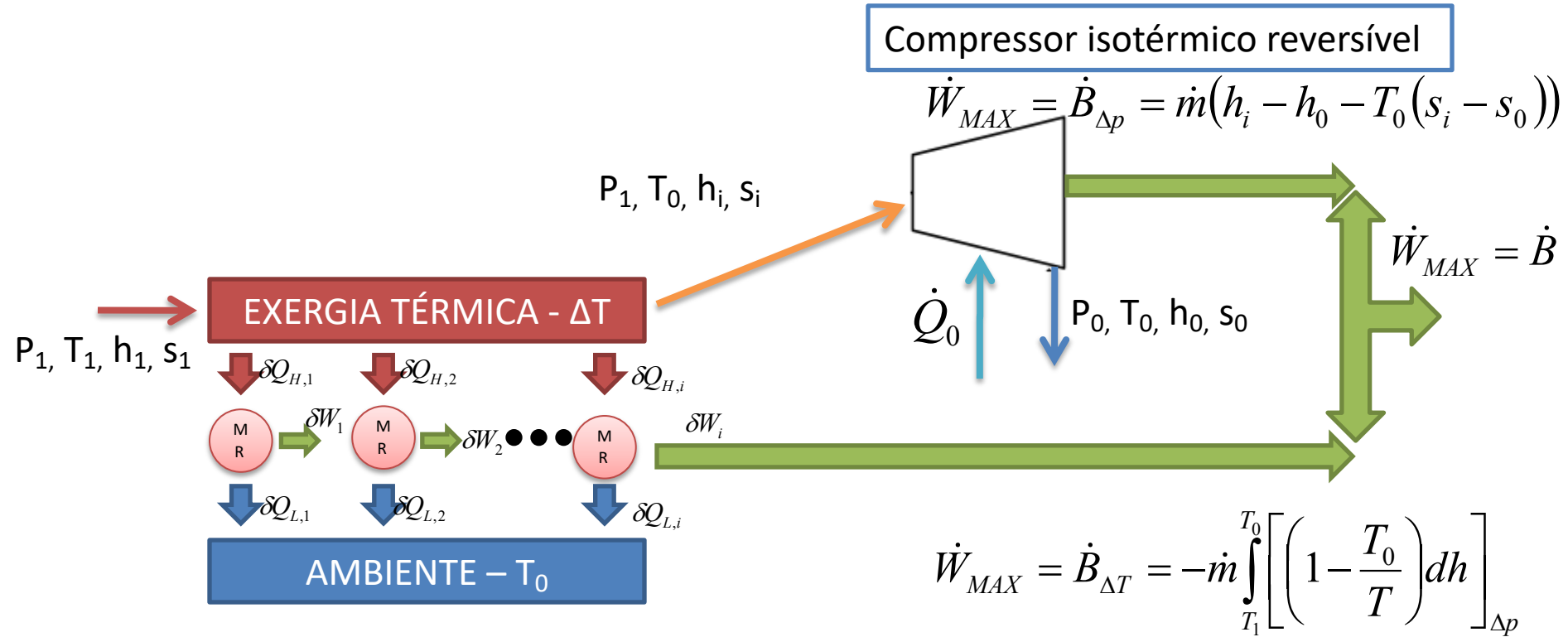


Com interpretar?

- Fluxo de massa está em um estado genérico (p, T, h, s). Sua exergia é o trabalho máximo (reversível) que seria obtido para levar até o estado inativo (p_0, T_0, h_0, s_0).



Com interpretar?



$$Tds = dh - vdp$$

$$dp = 0$$

$$Tds = dh$$

$$\dot{B}_{\Delta T} = -\dot{m} \int_{T_1}^{T_0} \left[\left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dh \right]_{\Delta p} = -\dot{m} \left[h_i - h_1 - \frac{T_0}{T} (h_i - h_1) \right]$$

$$\dot{B}_{\Delta T} = -\dot{m} [h_1 - h_i - T_0(s_1 - s_i)]$$

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) = b^{\Delta T} + b^{\Delta p}$$

$$\dot{B} = \dot{m}(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0))$$

Disponibilidade – Corrente EUA

OBSERVAÇÃO: Na literatura técnica norte-americana são definidos

$$\cdot \text{Availability (A, a)} = E - T_0S + p_0 \nabla \quad (\text{III.13})$$

$$\cdot \text{Flow Availability (B, b)} = H - T_0S \quad (\text{III.14})$$

- No cálculo da exergia física basta que o meio seja caracterizado por p_0 e T_0 , ou seja, há equilíbrio térmico e mecânico com o meio. Este estado é chamado de Estado de Referência Restrito.

Eficiência Exergética

- Segundo Szargut et al. (1988), todos os componentes do balanço de exergia devem ser alocados dentro de três grupos: exergia útil dos produtos, perdas de exergia e exergia de alimentação. Pode-se definir rendimento exergético como:

$$\eta_b = \frac{B_{ali} - B_d}{B_{ali}}$$

- Para motores térmicos e sistemas de refrigeração que interagem com o ambiente, pode-se escrever:

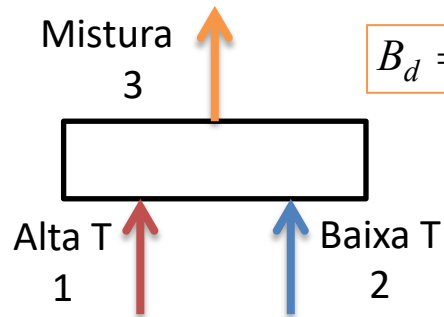
$$\eta_b = \frac{B_{util}}{B_{ali}}$$

Componentes Usuais

Trocador de Calor com Mistura

$$B_d = \sum \dot{m}_e b_e - \sum \dot{m}_s b_s + \dot{Q}_{VC} + \dot{W}_{VC}$$

$$B_d = \dot{m}_1 b_1 + \dot{m}_2 b_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_3) b_3$$



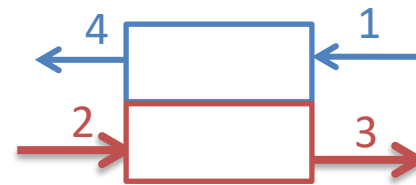
$$B_d = \dot{m}_1(b_1 - b_3) + \dot{m}_2(b_2 - b_3)$$

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_2(b_3 - b_2)}{\dot{m}_1(b_1 - b_3)}$$

Trocador de Calor sem Mistura

$$B_d = \sum \dot{m}_e b_e - \sum \dot{m}_s b_s + \dot{Q}_{VC} + \dot{W}_{VC}$$

$$B_d = \dot{m}_1 b_1 + \dot{m}_2 b_2 - \dot{m}_3 b_3 - \dot{m}_4 b_4$$

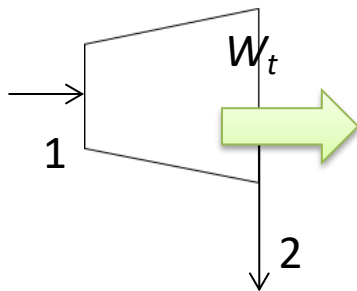


$$B_d = \dot{m}_b(b_1 - b_4)_{baixaT} + \dot{m}_a(b_2 - b_3)_{altaT}$$

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_b(b_4 - b_1)}{\dot{m}_a(b_2 - b_3)}$$

Turbina

$$B_d = \dot{m}_e b_e - \dot{m}_s b_s + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC}$$

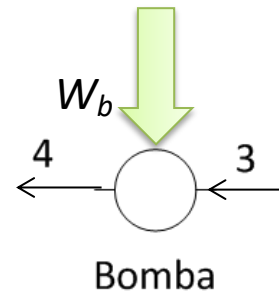


$$\dot{B}_d = \dot{m}(b_1 - b_2) - \dot{W}_t$$

$$\eta_b = \frac{B_{util}}{B_{ali}} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}(b_1 - b_2)}$$

Bomba

$$B_d = \dot{m}_e b_e - \dot{m}_s b_s + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC}$$

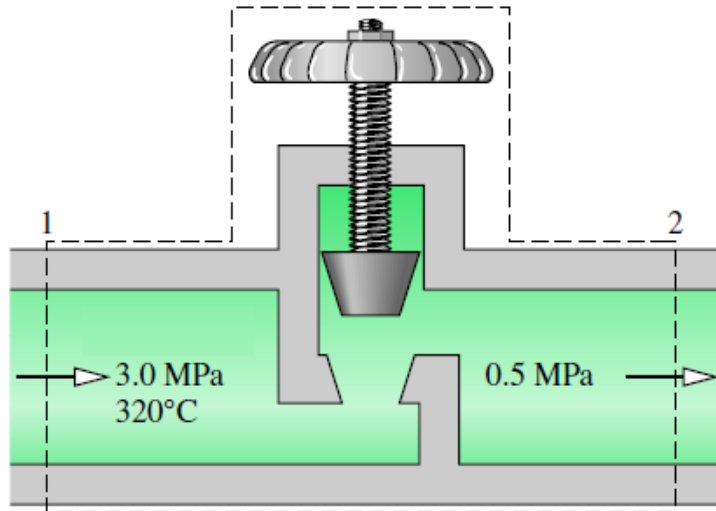


$$\dot{B}_d = (-\dot{W}_b) - \dot{m}(b_4 - b_3)$$

$$\eta_b = \frac{B_{util}}{B_{ali}} = \frac{|\dot{m}(b_3 - b_4)|}{|\dot{W}_b|}$$

Exemplo

- Vapor de água superaquecido passa por uma válvula como indicado na Figura. Calcule a exergia destruída.



Hipóteses:

- Regime permanente.
- Sem perdas de calor para o ambiente (volume de controle isolado).
- $\Delta E_c \approx \Delta E_p \approx 0$.
- Considera-se o ambiente em que a válvula está a T_0 e p_0

Conclusões das hipóteses e da constatação que não há realização de trabalho: Válvula isoentálpica :

$$h_1 = h_2 = 3044 \text{ kJ/kg (tabelas termodinâmicas)}$$

$$T_2 = 290,1^\circ\text{C (superaquecido - } T_{\text{sat}} = 151,8^\circ\text{C)}$$

$$s_1 = 6,627 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_2 = 7,426 \text{ kJ/kgK}$$

$$\frac{dB}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) - \dot{W}_{ef} - T_0 \dot{S}_{ger} - \left(\sum_s \dot{H}_s - \sum_e \dot{H}_e - T_0 \left(\sum_s \dot{S}_s - \sum_e \dot{S}_e \right) \right)$$

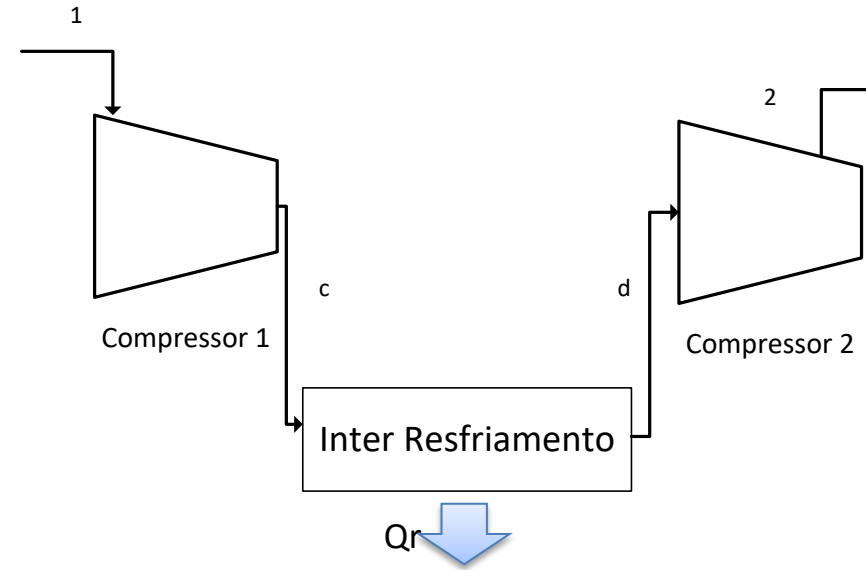
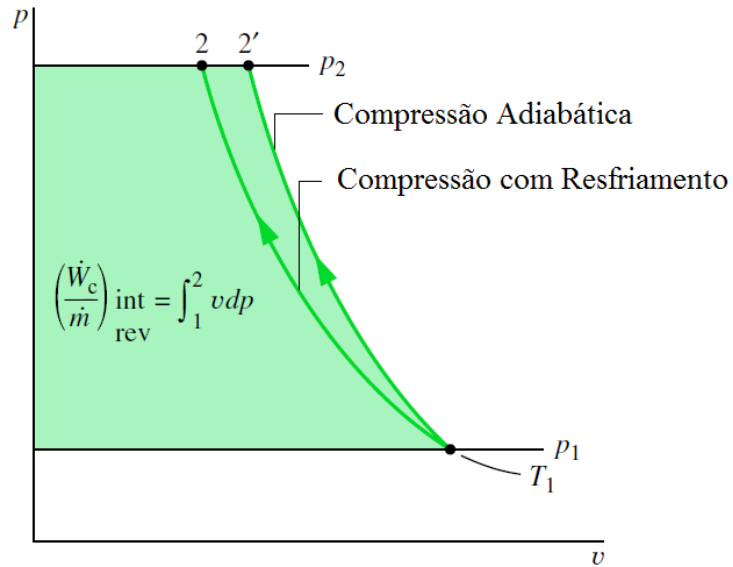
$$\dot{B}_d / \dot{m} = (b_2 - b_1) / \dot{m} = T_0 (s_2 - s_1) = 238,1 \text{ kJ/kg}$$

3) Considere uma indústria onde vapor a 30 bar e 700°C é disponível. Num dos processos desta indústria deve-se utilizar vapor a 20 bar e 400°C . Um engenheiro sugere que o vapor nas condições requeridas pode ser obtido expandindo o vapor a 30 bar através de uma válvula até 20 bar e a seguir resfriando-o até 400°C , através de uma troca de calor para o meio a 20°C .

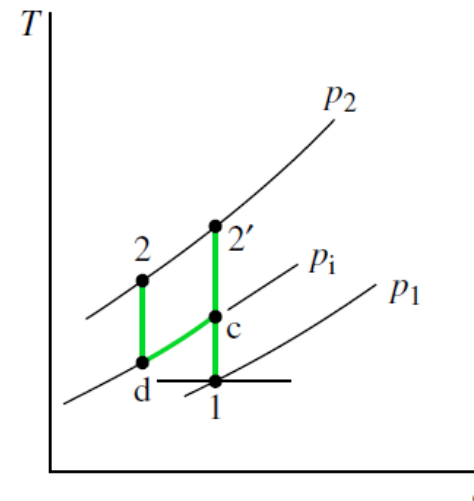
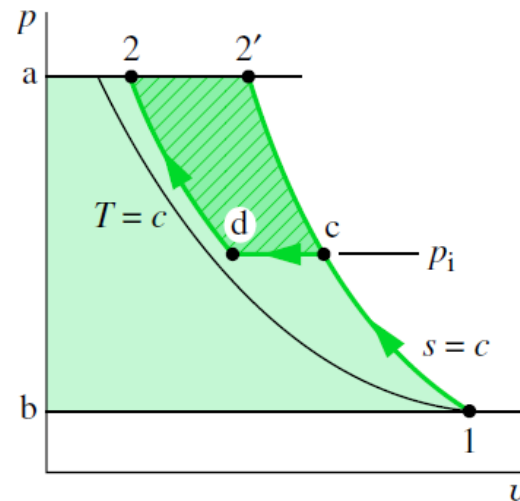
- a) Analise esta sugestão a partir dos conceitos de exergia e irreversibilidade.
- b) Estimando o custo da exergia a 0,08 US\$ por kWh, calcule o custo anual desta alternativa para uma vazão mássica de vapor de 1 kg/s e supondo que a indústria opera 8000 horas por ano.
- c) Proponha um método alternativo para obter vapor nas condições requeridas que seja "termodinamicamente mais atrativo".

DADOS: Temperatura do meio, $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$
 Pressão do meio, $P_0 = 1 \text{ atm}$

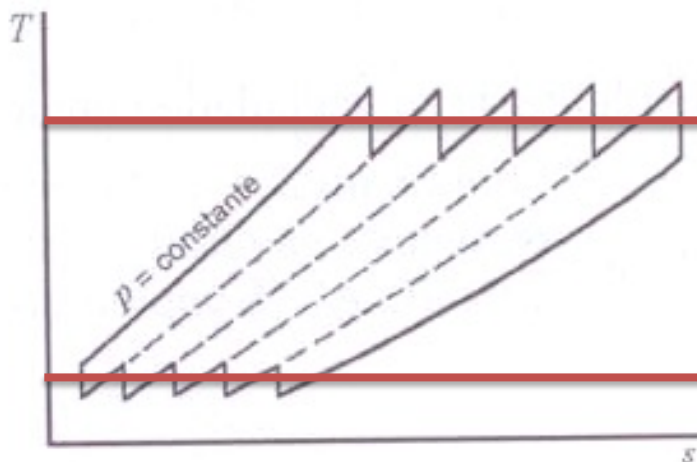
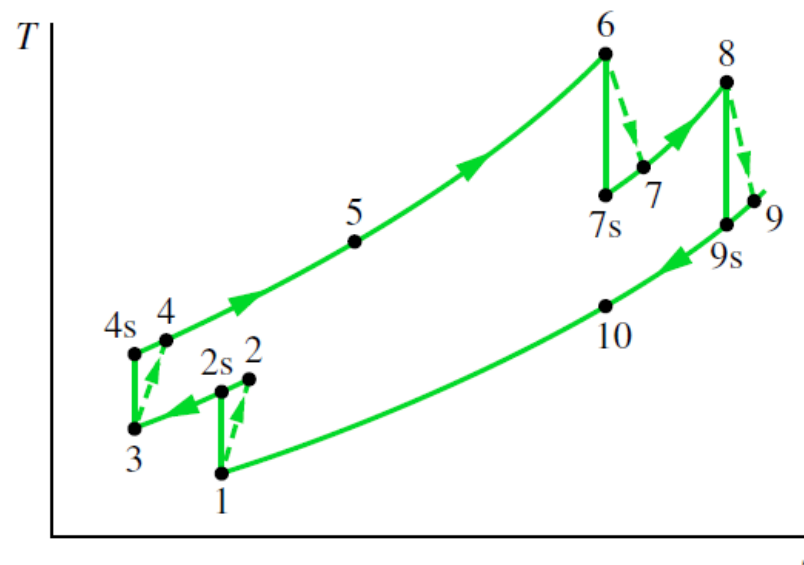
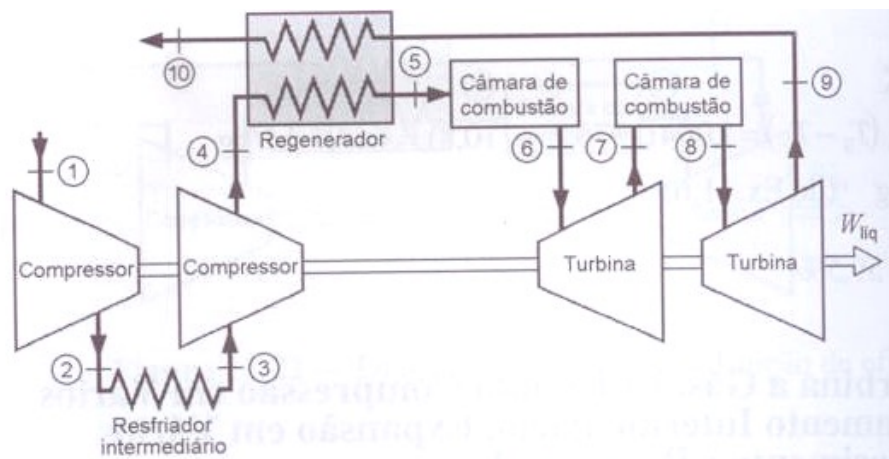
Compressão com Inter-Resfriamento



Trabalho com troca de calor é menor do que aquele adiabático e reversível, ou seja, isentrópico.



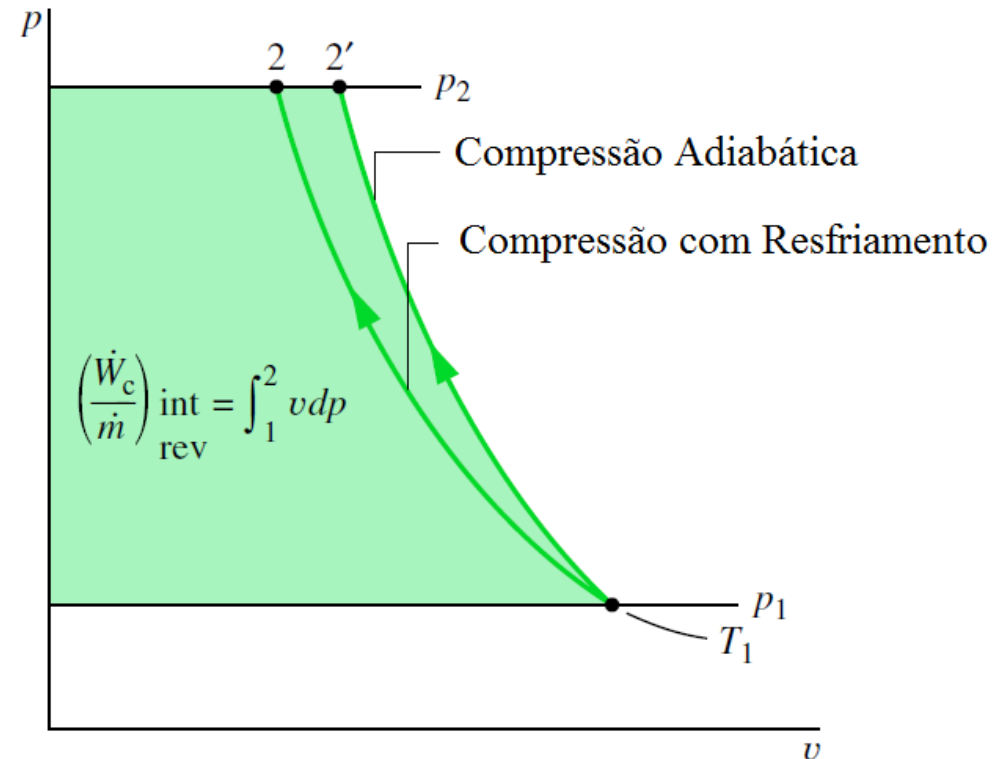
Reaquecimento e Inter-Resfriamento



No limite tende a eficiência de Carnot para n compressores e turbinas.

Comparar o trabalho Isentrópico com Isotérmico

- Os dois são reversíveis, porém um é isotérmico e reversível e outro é adiabático e reversível, certo?
- ✓ Como avalio a diferença se ambos são reversíveis.
 - ✓ Vamos, então imaginar um compressor, e a entrada de ambos é a mesma sendo eu o estado de saída não é definido.



Exemplos

Calculate the specific physical exergy of air for a state defined by $P_1 = 2$ bar and $T_1 = 393.15$ K when the environmental parameters are $P_0 = 1.0$ bar, $T_0 = 293.15$ K.

Solution: Assuming air to be a perfect gas and taking $c_p = 1.0$ kJ/kgK and $R = 0.2871$ kJ/kgK, (2.16) gives:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ph1}} &= c_p \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) + R T_0 \ln \frac{P_1}{P_0} \\ &= 1.0 \left(100 - 293.15 \ln \frac{393.15}{293.15} \right) + 0.2871 \times 293.15 \ln 2 \\ &= 13.97 + 58.34 \\ &= \underline{72.31 \text{ kJ/kg}}\end{aligned}$$

Exemplo

Example 2.3

Calculate the specific physical exergy of CO_2 ($c_p = 0.8659 \text{ kJ/kgK}$, $R = 0.1889 \text{ kJ/kgK}$) for a state defined by $P_1 = 0.7 \text{ bar}$ and $T_1 = 268.15 \text{ K}$ and for the environment $P_0 = 1.0 \text{ bar}$, $T_0 = 293.15 \text{ K}$.

Solution: Using the general expression for the physical exergy of a perfect gas:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ph1}} &= c_p \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{P_1}{P_0} \\ &= 0.8659 \left(-25 - 293.15 \ln \frac{268.15}{293.15} \right) + 0.1889 \times 293.15 \ln 0.7 \\ &= 0.9791 - 19.751 \\ &= \underline{\underline{-18.772 \text{ kJ/kg}}}\end{aligned}$$