

A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

2015-2016

-ENTROPIA-

SUMÁRIO

Neste capítulo, vamos aplicar a 2ª lei a processos de engenharia. A 2ª lei introduz uma nova propriedade designada por entropia. A entropia é melhor compreendida e avaliada pelo seu estudo em situações usuais que aparecem ligadas aos processos de engenharia, e será esta abordagem que irá ser seguida.

Este capítulo inicia-se com a discussão da inequação de Clausius, que é à base da definição da entropia, e continua com o princípio do aumento da entropia.

Contrariamente à energia, a entropia é uma propriedade não conservativa, não havendo, portanto, o princípio da conservação da entropia.

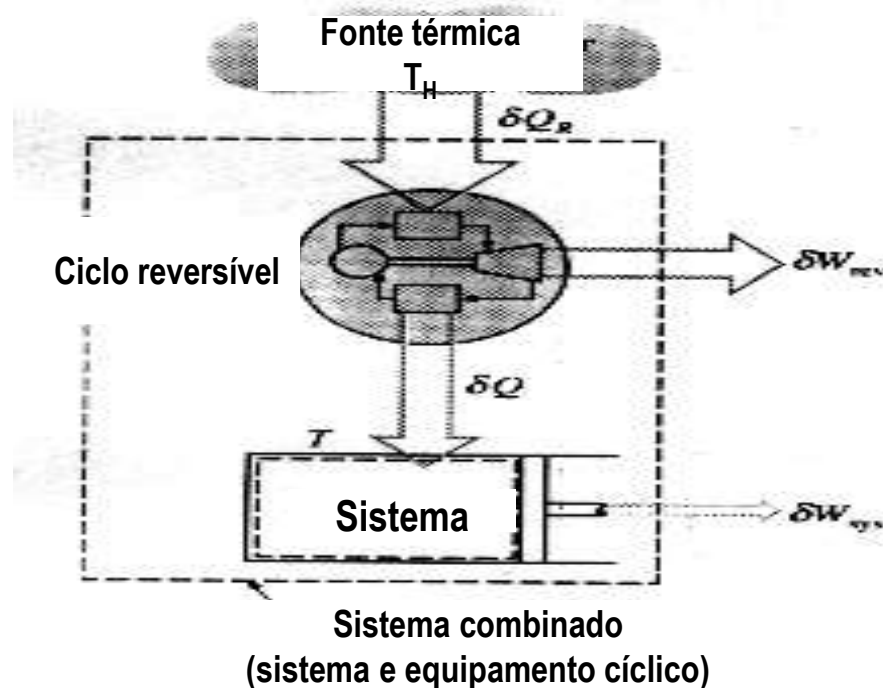
SUMÁRIO

Então, iremos discutir as variações de entropia durante os processos para substâncias puras, substâncias incompreensíveis, gases ideais, e uma classe especial "os processos ideais", designados por processos isentrópicos os quais serão analisados.

Finalmente, o trabalho reversível em regime estacionário e as eficiências isentrópicas de diferentes equipamentos em engenharia tais como turbinas e compressores serão discutidos

A Inequação de Clausius

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (\text{kJ/K})$$



O Equipamento Considerado na Inequação de Clausius

A Inequação de Clausius

- Aplicando o princípio da conservação de energia para o sistema combinado (identificado pelas linhas a tracejado):

$$\delta W_C = \delta Q_R - dE_c \quad \text{Equação 1.}$$

- Onde δW_C é o trabalho total do sistema combinado ($\delta W_{\text{rev}} + \delta W_{\text{sist}}$) e dE_c é a variação da energia total do sistema combinado.

- Considerando um processo reversível para o equipamento cíclico, temos que:

$$\delta Q_R/T_R = \delta Q/T \quad \text{Equação 2.}$$

- Eliminando δQ_R das duas relações acima descritas (Eq. 1. e Eq. 2.) temos:

$$\delta W_C = T_R \delta Q/T - dE_c$$

- Consideremos um sistema percorrendo um equipamento cíclico fazendo um determinado número de ciclos. A relação anterior pode se escrita:

$$W_C = T_R \oint \frac{\delta Q}{T}$$

A Inequação de Clausius

W_c não pode ser um trabalho de saída, e portanto não pode ser uma quantidade positiva, obrigatoriamente tem que ser:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (\text{kJ/K})$$

Que é a inequação de Clausius

Onde a igualdade é verdadeira para os ciclos internamente reversíveis e a desigualdade para os ciclos irreversíveis

Podemos eliminar a desigualdade de Clausius, rescrevendo:

$$S_{gen,ciclico} = - \oint \frac{\delta Q}{T}$$

A quantidade $S_{gen,ciclico}$ é a geração de entropia associada ao ciclo. A geração de entropia nunca pode ser negativa. É uma **quantidade positiva** para ciclos internamente irreversíveis e **zero** para processos internamente reversíveis.

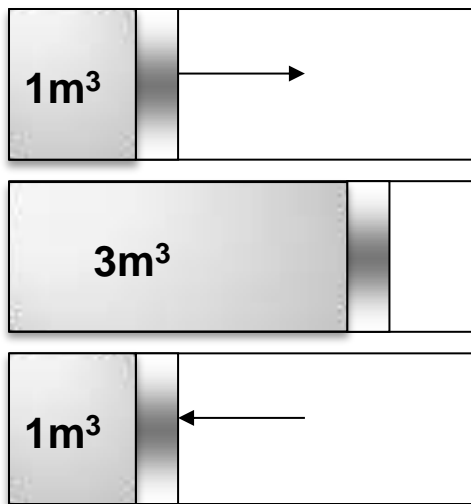
Geração de Entropia para um Motor Térmico Cíclico

- Num Motor Térmico Cíclico uma quantidade de calor Q_H é fornecida para o sistema a uma temperatura constante (T_H) na fronteira enquanto uma quantidade (Q_L) é rejeitada do sistema a uma temperatura constante (T_L) para a fronteira.

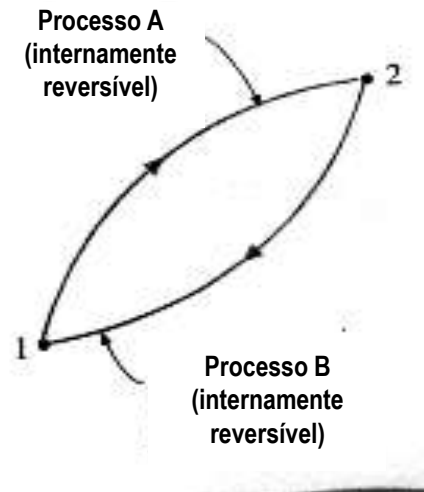
$$S_{gen,ciclo} = -\oint \frac{\partial Q}{T} = -\left[\int \frac{\partial Q_H}{T_H} - \int \frac{\partial Q_L}{T_L} \right] = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L}$$

Para ciclos internamente reversíveis $Q_H/T_H = Q_L/T_L$ então a entropia para este ciclo é zero

Entropia



A variação do volume líquido num processo cíclico é zero



Um ciclo internamente reversível composto por dois processos internamente reversíveis

- A variação da entropia de um sistema durante um processo pode ser determinada pela integração da equação :

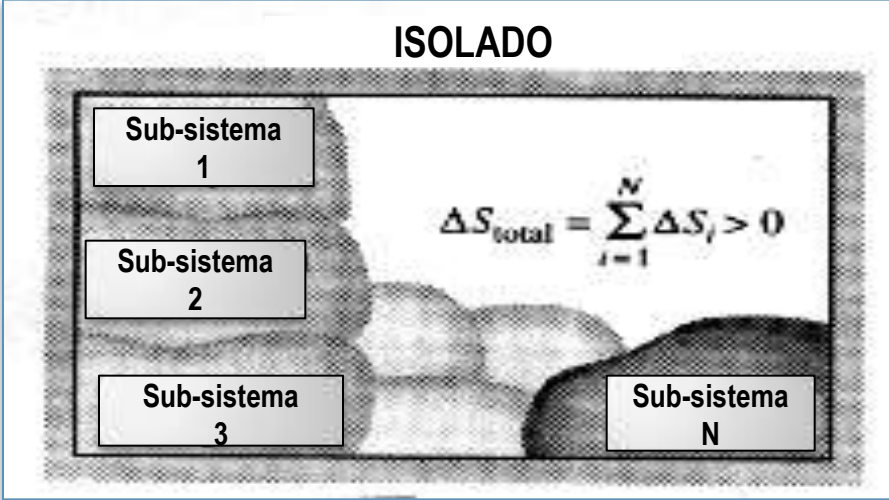
$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}}$$

- podendo ser expresso:

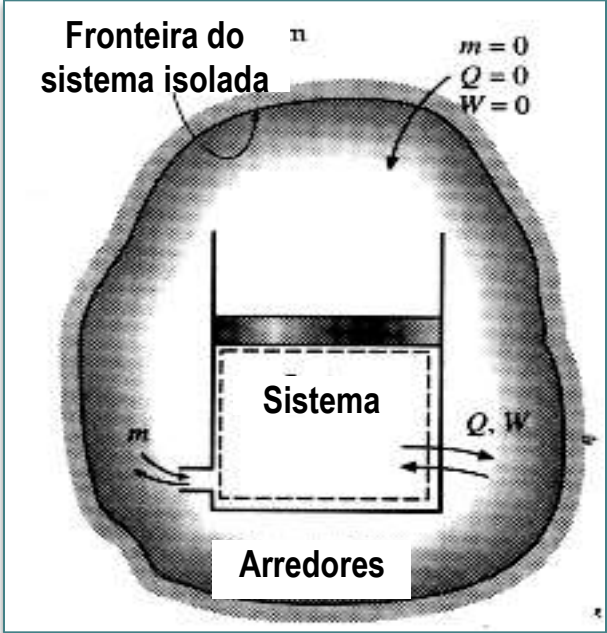
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \quad (\text{kJ/K})$$

O Princípio do Aumento da Entropia

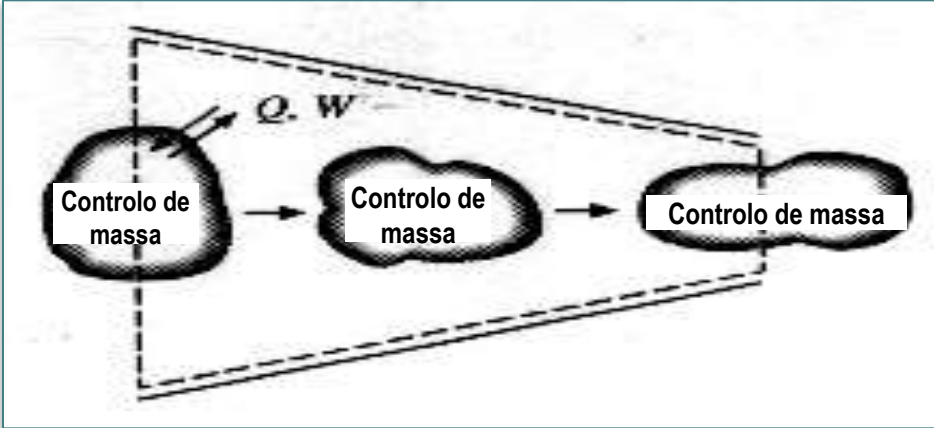
ISOLADO



A variação de entropia de um sistema isolado é a soma das variações de entropia dos seus sub-sistemas e nunca é menor que zero



Um sistema e os seus arredores formam um sistema isolado



Todas as relações desenvolvidas para sistemas fechados também podem ser aplicadas a fluxos constantes de massa através de um sistemas de controlo de volume

O Princípio do Aumento da Entropia

$$S_{gen} = \Delta S_{tot}$$

>0 processos irreversíveis

= 0 processos reversíveis

< 0 processos impossíveis

Balço de Entropia para um Sistema Fechado

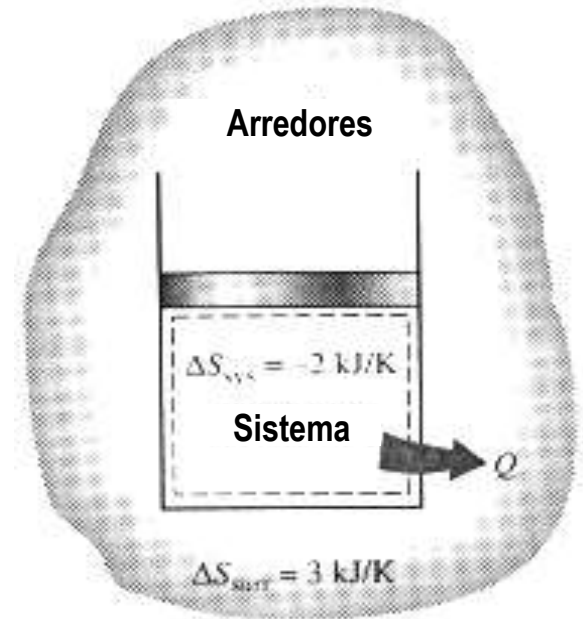


$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen,sys}$$

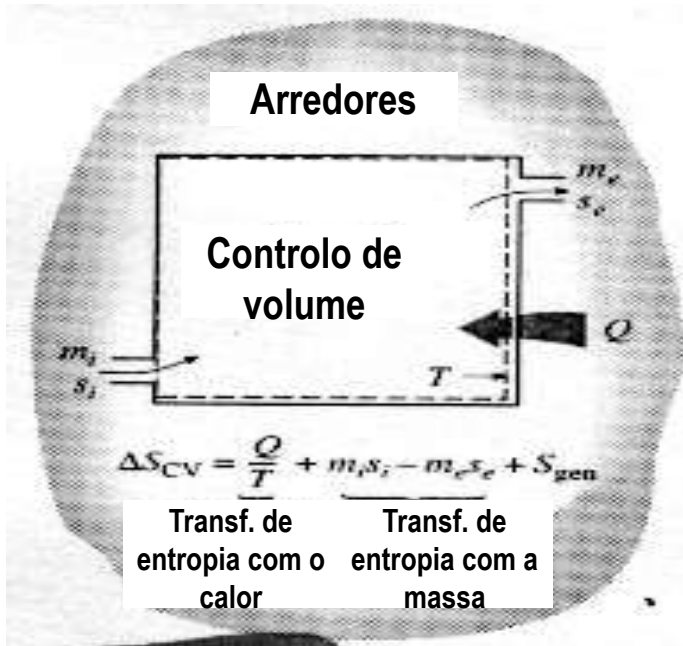
variação de entropia

Transferência de entropia resultante da transferência de calor

Geração de entropia pelo sistema



A variação de entropia de um sistema pode ser zero mas a soma $\Delta S_{sys} + \Delta S_{surr}$ não



A entropia de um sistema de controlo de volume varia como resultado do fluxo de massa e de calor

Expressão do balanço da entropia
Assumindo um fluxo unidirecional

$$\frac{dS_{CV}}{dt} = \underbrace{\sum \frac{\dot{Q}_K}{T_K}}_{\text{Taxa de variação de entropia}} + \underbrace{\sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e}_{\text{Taxa de transferência de entropia associada à transferência de calor}} + \underbrace{\dot{S}_{gen,CV}}_{\text{Taxa de transferência de entropia associada à transferência de massa}} + \underbrace{\dot{S}_{gen,CV}}_{\text{Taxa de geração de entropia associada aos sistemas de controlo de volume}}$$

Causas da Variação da Entropia

- **Transferência de Calor**

A transferência de calor para o sistema aumenta a entropia, a transferência de calor do sistema para as fronteiras diminui a entropia do sistema. Quando dois corpos estão em contacto a entropia transfere-se do corpo mais quente para o mais frio.

- **Transporte de entropia através da taxa de fluxo de massa**

A transferência de entropia via fluxo de massa é designada por **entropia de transporte**. Sistemas fechados não tem entropia de transporte. A entropia de transporte aparece nos sistemas de controle de volume.

- **Irreversibilidades**

A geração de entropia durante um processo é devido às irreversibilidades, e $S_{gen} = 0$ para processos reversíveis.

Se um processo não envolver transferência de calor (adiabáticos) e não tiver irreversibilidades dentro do sistema, a entropia de uma massa fixa permanece constante durante o processo.

Tais processos são designados por internamente reversíveis (adiabáticos) ou **processos isentrópicos**.

Algumas considerações sobre a Entropia

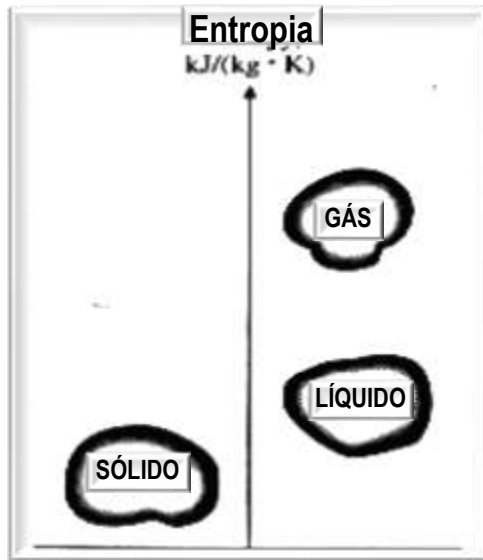
1. Os processos só podem ocorrer numa determinada direcção.

Um processo deve ocorrer na direcção que conduza a um aumento de entropia, isto é, $\Delta S_{\text{total}} \geq 0$. Um processo que viole este princípio é impossível

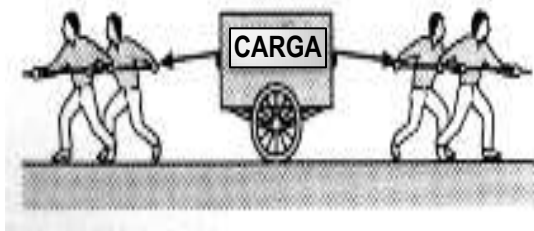
2. A entropia é uma propriedade não conservativa, e não existe portanto o princípio da conservação da entropia. A entropia é conservada durante os processos ideais (reversíveis) e aumenta em todos os processos reais. Portanto a entropia do Universo está constantemente a aumentar.

3. O desempenho (“Performance”) dos sistemas em engenharia é degradado pela presença de irreversibilidades, e a geração de entropia é uma medida de avaliar as irreversibilidades presentes durante o processo.

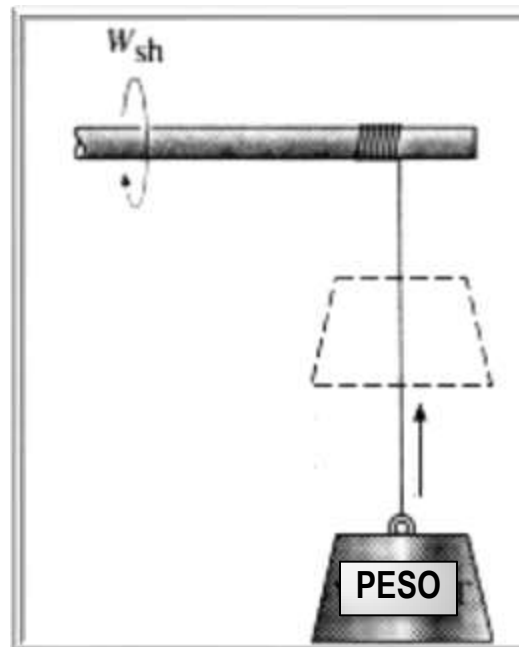
O que é a Entropia?



O nível de desordem molecular (entropia) de uma substância aumenta à medida que esta caminha para o estado gasoso

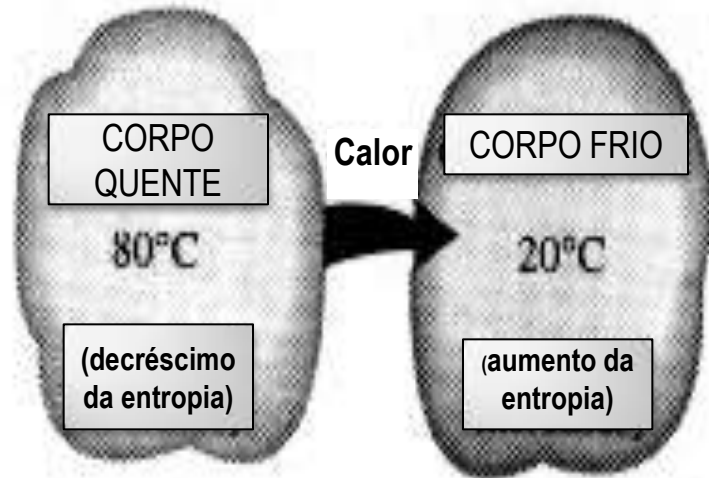


A energia desorganizada não é útil, mesmo que apresente uma grande quantidade

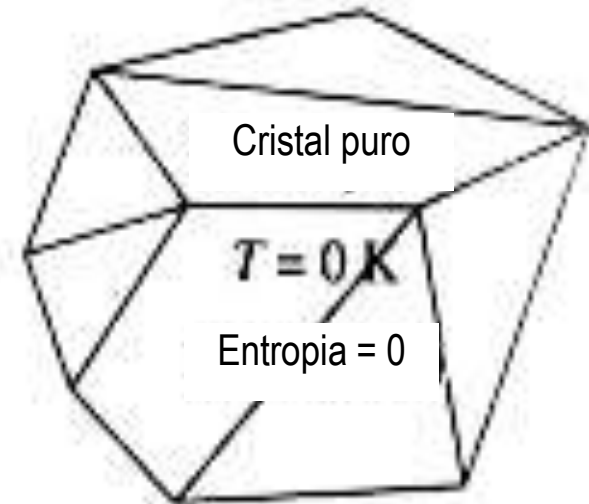


Na ausência de fricção, elevar um peso através de um veio rotativo não cria desordem (entropia), logo a energia não é degradada neste processo

O que é a Entropia?

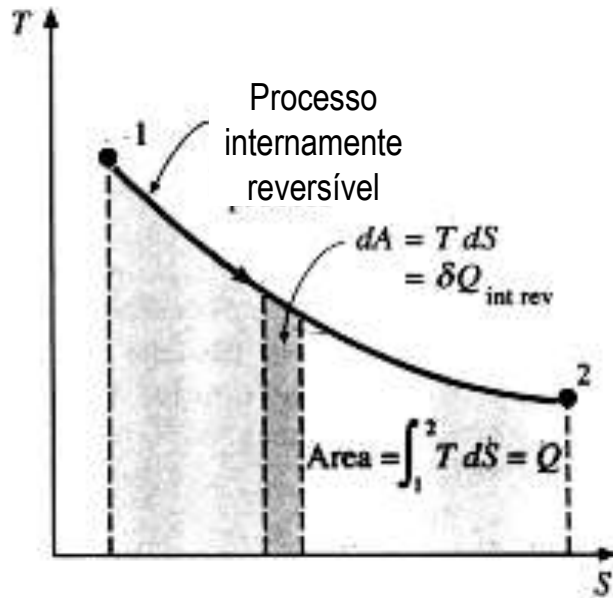


Durante a transferência de calor, a desordem total aumenta (entropia). O aumento da desordem no corpo frio é maior que a diminuição da desordem no corpo quente.



Uma substância pura à temperatura de zero absoluto tem entropia zero

Diagrama de Propriedades Envolvendo Entropia



Num diagrama T- s, a área por baixo da curva de processo representa o calor transferido para processos internamente reversíveis

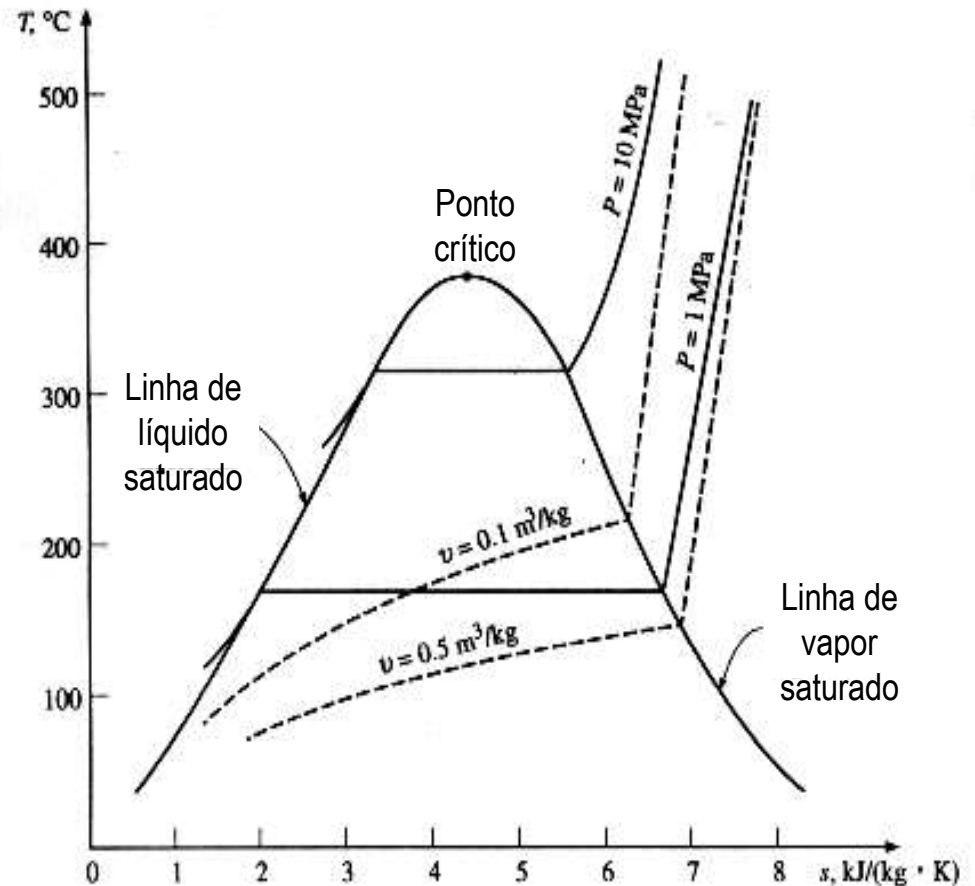


Diagrama T- s para a água

Diagrama de Propriedades Envolvendo Entropia

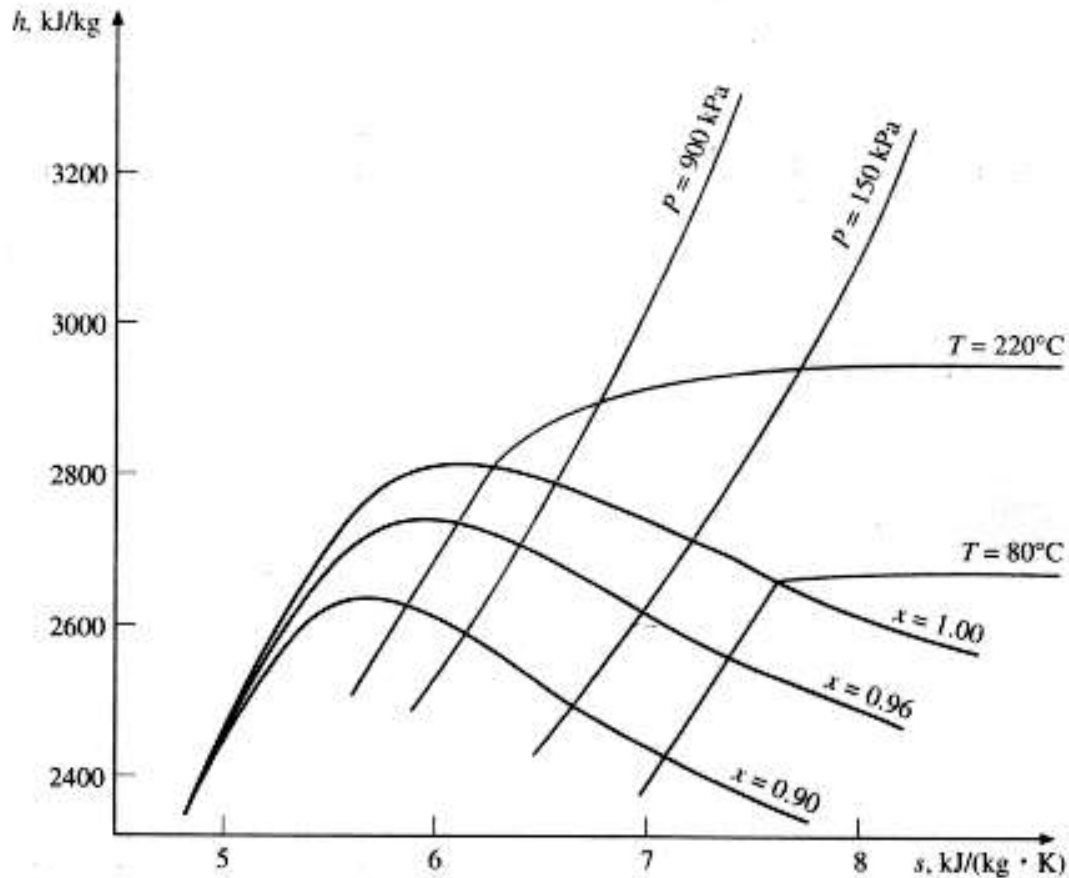


Diagrama h- s para a água

As relações T dS

A forma diferencial da equação da conservação da energia para um sistema fechado estacionário (massa fixa) contendo uma substância simples compressível pode ser expressa por um processo internamente reversível:

$$\partial Q_{\text{int rev}} - \partial W_{\text{int rev}} = dU$$

$$\partial Q_{\text{int rev}} = Tds$$

$$\partial W_{\text{int rev}} = PdV$$

$$TdS = dU + PdV$$

Tds = du + Pdv Equação de Gibbs

Usando a definição da Entalpia ($h = u + Pv$):

Diferenciando $dh = du + Pdv + vdP$ e substituindo $Tds = du + Pdv$ resulta \rightarrow

$$Tds = dh - vdP$$

A variação de Entropia para substâncias Puras

O valor da entropia para um determinado estado específico é determinado tal como outra propriedade. Nas regiões de líquido comprimido e de vapor sobreaquecido, a entropia pode ser obtida directamente a partir dos valores registados nas tabelas de propriedades. Na região de mistura líquido – vapor saturado, o valor da entropia é determinado:

$$s = s_f + x s_{fg} \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

A entropia do líquido comprimido pode ser calculada a partir da entropia do líquido saturado a uma determinada temperatura:

$$s_{@P,T} \cong s_{f@T}$$

A variação da entropia de uma substância pura durante um processo é simplesmente a diferença entre a entropia do estado final e do estado inicial:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1) \quad [\text{kJ/K}]$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

Para processos isentrópicos de substâncias puras pode-se escrever a seguinte relação:

$$s_2 = s_1 \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

A variação da Entropia para Sólidos e Líquidos

Os sólidos e os líquidos podem ser considerados idealmente como substâncias incompressíveis uma vez que o seu volume permanece constante durante o processo. Então $dv=0$ e a equação $TdS = dU + PdV$ pode ser simplificada uma vez que $C_p = C_v = C$ e $du = C dt$.

A variação da entropia pode ser calculada pela seguinte equação:

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{CdT}{T}$$

A variação da entropia para um determinado processo é determinado por:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C(T) \frac{dT}{T}$$

Então da integração desta equação

resulta:

$$s_2 - s_1 = C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad [\text{kJ/kg.K}]$$

Para processos isentrópicos para sólidos e líquidos a equação anterior reduz-se a:

$$C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \quad \text{logo } T_2 = T_1$$

A Variação de Entropia de Gases Ideais

A expressão da variação da entropia de um gás ideal pode ser obtida através das a equação 1 e 2

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} \quad \text{Eq. 1}$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T} \quad \text{Eq. 2}$$

Substituído $du = C_v dT$ e $P=RT/v$ na eq. 1, a variação diferencial da entropia para os gases ideais toma a forma de:

$$ds = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

A Variação de Entropia de Gases Ideais

A variação da entropia para um processo é obtida através da integração entre os estados 1 e 2.

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

outra expressão semelhante é obtida a partir do uso de $dh = C_p dT$ e $v = RT/P$ na equação 2 Integrando

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

A Variação de Entropia de Gases Ideais

Processos Isentrópicos de Gases Ideais Calores Específicos Constantes

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

uma vez que $R = C_p - C_v$, $k = C_p/C_v$, logo $R/C_v = k - 1$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$$

$$Tv^{k-1} = const.$$

$$TP^{(1-k)/k} = const.$$

$$Pv^k = const.$$

Eficiência adiabática de Turbinas Compressores e Bombas

Eficiência adiabática de uma turbina (trabalho real sobre o trabalho isentrópico ideal)

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

Eficiência adiabática de um compressor (trabalho isentrópico ideal sobre o trabalho real)

$$\eta_T \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

Eficiência adiabática de uma bomba é definida como:

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1}$$

Eficiência Adiabática de Tuberias

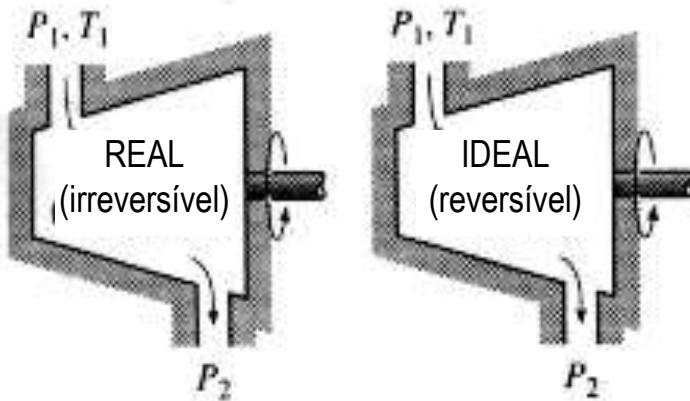
- A eficiência adiabática da tubeira é definida como a razão da energia cinética real do fluido à saída da tubeira e a energia cinética do fluido assumindo que a tubeira tinha um desempenho isentrópico para as mesmas condições de entrada.

$$\eta_N = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2}$$

A eficiência adiabática da tubeira pode também ser expressa em termos de entalpias

$$\eta_N = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

Eficiências adiabáticas de alguns equipamentos trabalhando em regime estacionário



Os processos isentrópicos não envolvem irreversibilidades e correspondem aos processos adiabáticos ideais

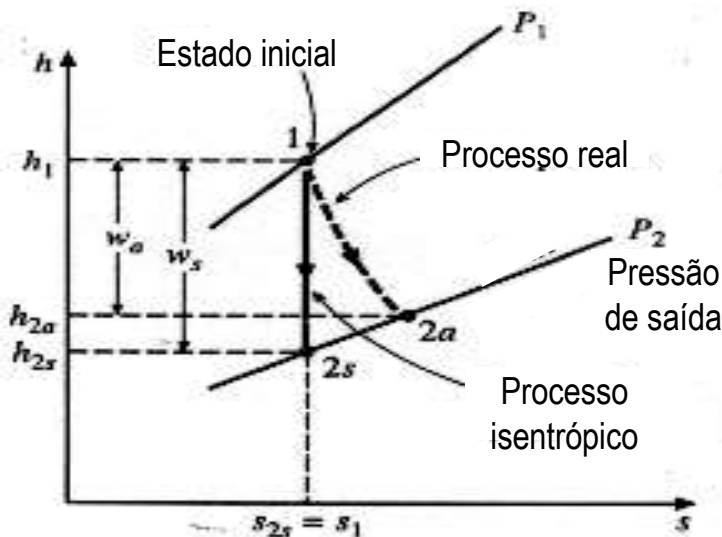


Diagrama $h-s$ para os processos reais e isentrópicos de uma turbina adiabática

Eficiências adiabáticas de alguns equipamentos trabalhando em regime estacionário

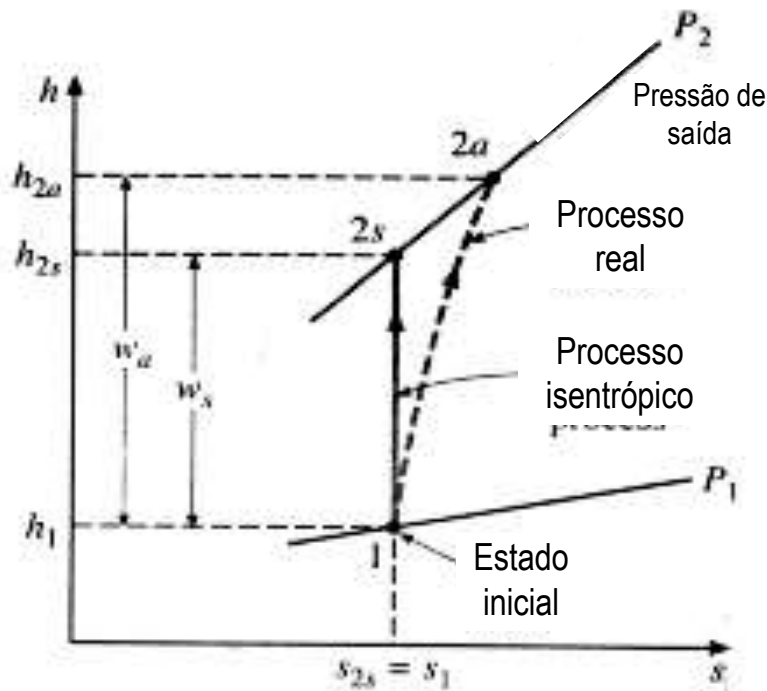


Diagrama h- s para os processos reais e isentrópicos de um compressor adiabático

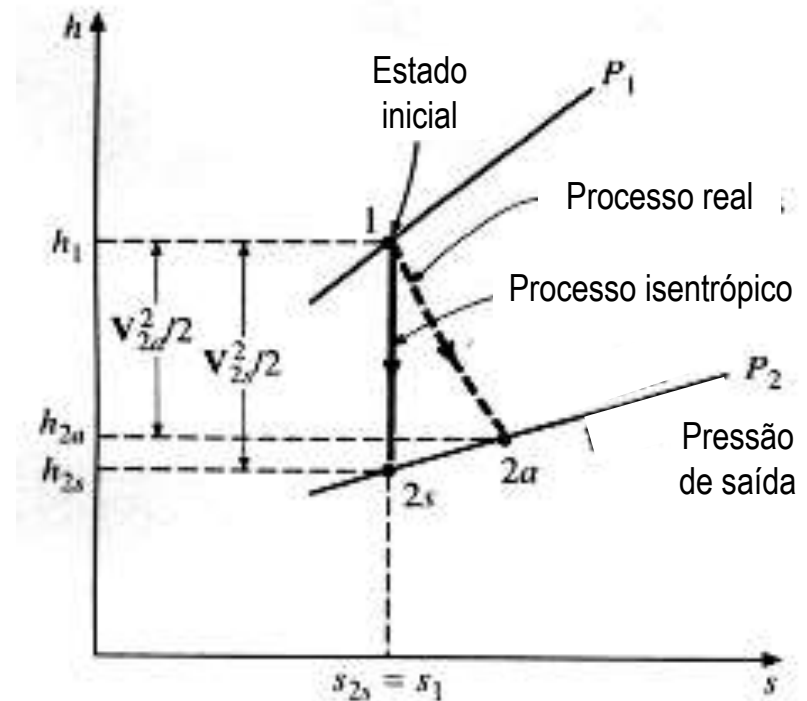


Diagrama h- s para os processos reais e isentrópicos de uma tubeira adiabática