

PMT3532 -

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência I- Aula 03



Prof. Dr. Alfredo Alvim
CEN- Centro Engenharia Nuclear
IPEN/CNEN- MCTIC

1

Princípios Básicos de Termodinâmica *2ª Lei da Termodinâmica- Entropia*

Referência: Livro Termodinâmica Yunus Çengel 7ª Edição



Sadi Carnot
1796-1832

Carnot



1822-1888

Clausius



1824-1907

Lord Kelvin



1858-1947

Planck

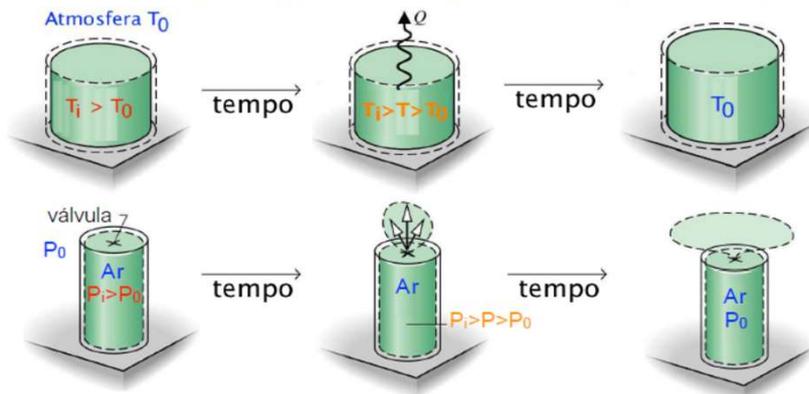
Prof. Alfredo Alvim

2

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Introdução

A 1ª lei da termodinâmica não estabelece restrições no sentido da interação de calor ou trabalho. De nossa experiência sabemos que há um único sentido para os processos *espontâneos*, veja os exemplos:



Prof. Alfredo Alvim

3

3

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Introdução

Aspectos importantes dos experimentos anteriores:

- * a condição inicial pode ser restaurada, mas não espontaneamente. Alguma mudança permanente na condição da vizinhança ocorreria;
- * existe a possibilidade de realização de trabalho à medida que o equilíbrio é atingido.

Perguntas:

- * Qual é o valor teórico máximo para o trabalho que poderia ser realizado?
- * Quais os fatores que poderiam impedir a realização desse valor máximo?

Prof. Alfredo Alvim

4

4

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Introdução

Aspectos da 2ª Lei da Termodinâmica:

- prever a direção de processos;
- estabelecer condições para o equilíbrio;
- determinar o melhor desempenho teórico de ciclos, motores e dispositivos;
- avaliar quantitativamente os fatores que impedem a obtenção do melhor desempenho teórico;
- definir uma escala de temperatura independente das propriedades de qualquer substância termométrica.

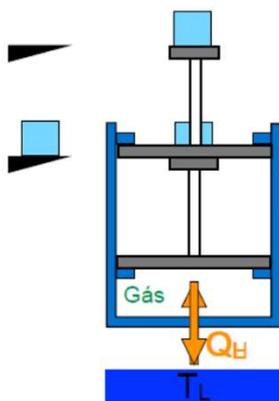
Prof. Alfredo Alvim

5

5

2ª Lei da Termodinâmica-Entropia

Exemplo de motor térmico



Aplicando a 1ª lei ao motor:

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

$$W_{\text{ciclo}} = Q_H - Q_L$$

Podemos definir um rendimento:

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{efeito desejado}}{\text{gasto}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_H}$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

*Note que para o motor operar $Q_L \neq 0$, o que significa que $\eta < 1$.

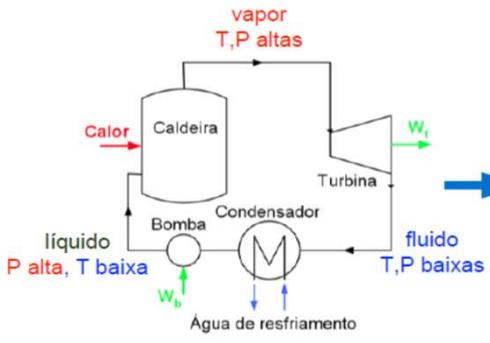
Prof. Alfredo Alvim

6

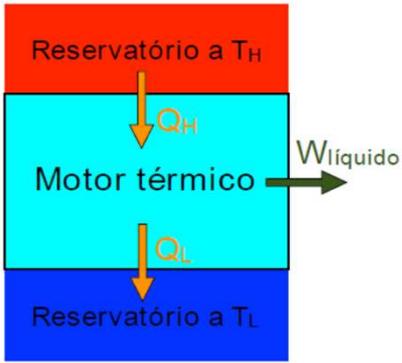
6

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo motor



Esquema



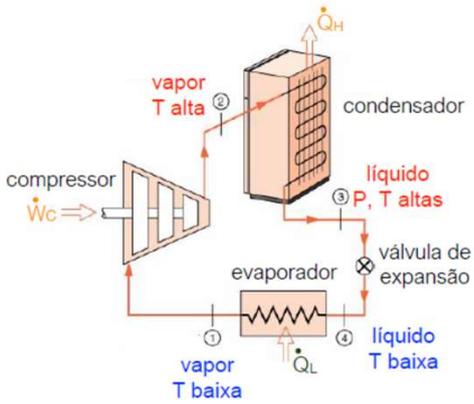
★Podemos trabalhar, também, com potências!

Prof. Alfredo Alvim 7

7

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo de refrigeração



Aplicando a 1ª lei ao refrigerador:

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

$$W_c = Q_H - Q_L$$

Coeficiente de desempenho:

$$\beta = \frac{Q_L}{W_c}$$

*Note que β pode, e de preferência deve, ser maior do que 1.

Nota: o balanço de energia é feito com base no sentido das setas. "Abandonamos" provisoriamente a convenção de sinais.

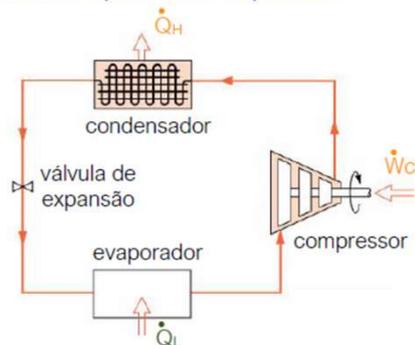
Prof. Alfredo Alvim 8

8

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Bomba de calor

Objetivo da bomba é aquecimento, por exemplo, de uma piscina.



Aplicando a 1ª lei ao refrigerador:

$$Q_{\text{ciclo}} = W_{\text{ciclo}}$$

$$W_c = Q_H - Q_L$$

Coefficiente de desempenho:

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_c}$$

*Note que β' é maior do que 1.

Por que não utilizar um dispositivo mais simples e barato como um resistor?

Prof. Alfredo Alvim

9

9

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Enunciados da 2ª Lei

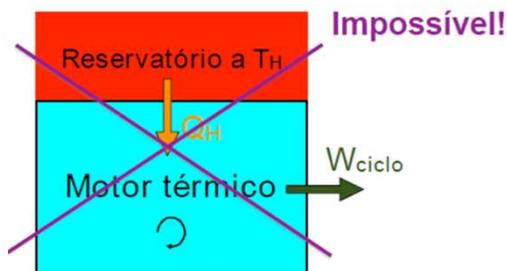


1824-1907

Enunciado de Kelvin-Planck: é impossível construir um dispositivo que opere em um ciclo termodinâmico e que não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e troca de calor com um único reservatório térmico.



1858-1947



1ª Lei: $W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}}$

2ª Lei: ~~$W_{\text{ciclo}} \leq 0$~~

$W_{\text{ciclo}} \leq 0$

Prof. Alfredo Alvim

10

10

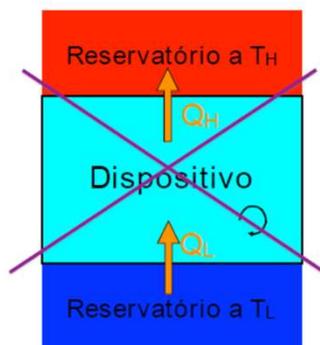
2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Enunciados da 2ª Lei



1822-1888

Enunciado de Clausius: é impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.



1ª Lei: $Q_{\text{ciclo}} = Q_H = Q_L$

2ª Lei: $W_{\text{ciclo}} \leq 0$

Prof. Alfredo Alvim

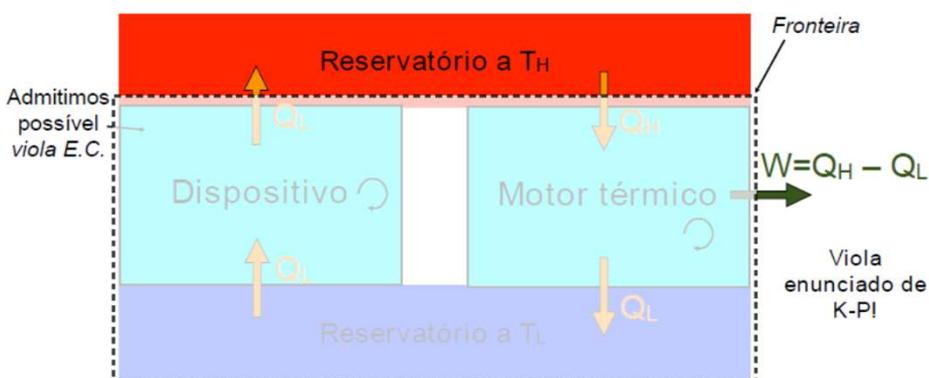
11

11

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Equivalência entre enunciados

Para demonstrar a equivalência entre os enunciados devemos provar que a violação do enunciado de Clausius implica na violação do enunciado de Kevin – Planck e vice-versa. Vamos fazer apenas a primeira demonstração.



Prof. Alfredo Alvim

12

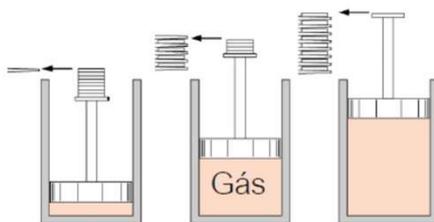
12

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Definição

- ♦ **Processo reversível:** processo que, depois de ocorrido, pode ser revertido sem deixar nenhum traço no sistema e nas redondezas.
- ♦ **Processo reversível:** processo em que o sistema e todas as partes que compõem sua vizinhança puderem ser restabelecidos exatamente aos seus respectivos estados iniciais.

Exemplo (expansão adiabática):



Note:

- ♦ um único valor de P e T descreve o estado do gás durante o processo de expansão;
- ♦ o processo pode ser revertido. Um processo de compressão seguindo o histórico de P e T , inversamente, pode ser realizado recolocando os pesos;
- ♦ a vizinhança retornou ao seu estado original (mesmo valor em módulo do trabalho na expansão e na compressão).

Prof. Alfredo Alvim

13

13

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Exemplos de irreversibilidades

- ★ Expansão não resistida;
- ★ Transferência de calor com diferença de temperatura;
- ★ Atrito;
- ★ Atrito no fluido em escoamento;
- ★ Mistura de duas substâncias;
- ★ Reação química espontânea;
- ★ Efeito Joule.

Prof. Alfredo Alvim

14

14

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Irreversibilidade externa x interna

Processo internamente reversível: é aquele que pode ser realizado de forma reversível, de pelo menos um modo, com outra vizinhança.

Exemplo (sistema \equiv vapor + líquido):



Prof. Alfredo Alvim

15

15

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Rendimentos Máximos

Os enunciados de Kelvin-Planck e de Clausius mostram que não é possível construir ciclos termodinâmicos com eficiência térmica de 100%.

Assim, retomando a pergunta do início da aula:

*** Qual é o valor teórico máximo para a eficiência térmica de um ciclo termodinâmico?**

Prof. Alfredo Alvim

16

16

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Corolários de Carnot

Primeiro Corolário

“A eficiência térmica de um ciclo irreversível é sempre menor que a eficiência térmica de um ciclo reversível quando os dois operam entre os mesmos reservatórios térmicos”



Sadi Carnot
1796-1832

Segundo Corolário

“Todos os ciclos reversíveis operando entre os mesmos dois reservatórios térmicos tem a mesma eficiência térmica”

Prof. Alfredo Alvim

17

17

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Corolários de Carnot

Primeiro Corolário

∴ Eficiência Máxima ⇒ Eficiência do Ciclo Reversível

Segundo Corolário

- η , β e β' só dependem das temperaturas dos reservatórios térmicos

$$\therefore \left(\frac{Q_L}{Q_H} \right)_{\text{ciclo reversível}} = \left(\frac{T_L}{T_H} \right)_{\text{temperaturas absolutas}}$$

Prof. Alfredo Alvim

18

18

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo de Carnot

- Ciclo reversível composto por quatro processos.
- Cada estado visitado pelo ciclo é um estado de equilíbrio.
- O sistema pode executar o mesmo ciclo no sentido inverso.

Prof. Alfredo Alvim

19

19

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo de Carnot

Processos que compõem o ciclo

- ★ **Processo 1:** processo reversível isotérmico no qual calor é transferido de ou para o reservatório a alta temperatura;
- ★ **Processo 2:** processo adiabático reversível no qual a temperatura do fluido de trabalho decresce;
- ★ **Processo 3:** processo reversível isotérmico no qual calor é transferido para ou do reservatório a baixa temperatura;
- ★ **Processo 4:** processo adiabático reversível no qual a temperatura do fluido de trabalho aumenta.

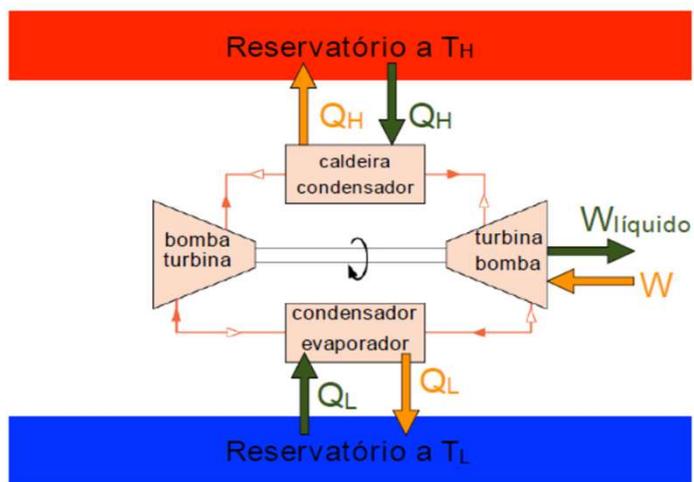
Prof. Alfredo Alvim

20

20

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Máquina de Carnot



Prof. Alfredo Alvim

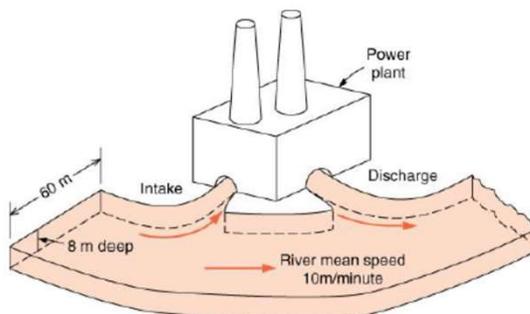
21

21

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ex. 7.67 – Van Wylen 7ª Ed.

Propõe-se construir uma central termoelétrica com potência de 1000 MW e utilizando vapor d'água como fluido de trabalho. Os condensadores devem ser resfriados com água de um rio. A temperatura máxima do vapor será de 550°C e a pressão no condensador de 10 kPa. Como consultor de engenharia você é solicitado a estimar o aumento de temperatura da água do rio. Qual é a sua estimativa.



Prof. Alfredo Alvim

22

22

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Hipóteses:

- A planta opera em regime permanente;
- O ciclo a vapor é reversível;
- O sistema é o ciclo a vapor;
- O volume de controle é o rio, incluindo a entrada e saída de água para a planta;
- A água comporta-se como incompressível, com calor específico independente da temperatura e igual ao valor a 25 °C.

Prof. Alfredo Alvim

23

23

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Solução:

$$T_H = 550 \text{ °C}$$

$$T_H = 823 \text{ K}$$

$$T_L = T_{\text{sat}} @ 10 \text{ kPa} = 45,81 \text{ °C}$$

$$T_L = 319 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{319}{823} = 0,612$$

Taxa com que calor rejeitado para o rio (\dot{Q}_L): $\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}$

$$\eta_{\text{rev}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_H = \frac{\dot{W}}{\eta_{\text{rev}}} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_L = (1/\eta_{\text{rev}} - 1)\dot{W}$$

$$\dot{Q}_L = 634 \text{ MW}$$

Prof. Alfredo Alvim

24

24

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Vazão mássica do rio:

$$\dot{m} = \frac{VA}{v} = \frac{10.8.60}{0,001} = 4,8 \times 10^6 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m} = 80.000 \text{ kg/s}$$

Aquecimento do rio:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c} = \frac{634 \times 10^6}{80.000 \cdot 4,184 \times 10^3}$$

$$\Delta T = 1,9^\circ \text{C}$$

Para um rendimento de 0,3 obteríamos: $\Delta T = 7^\circ \text{C}$

Prof. Alfredo Alvim

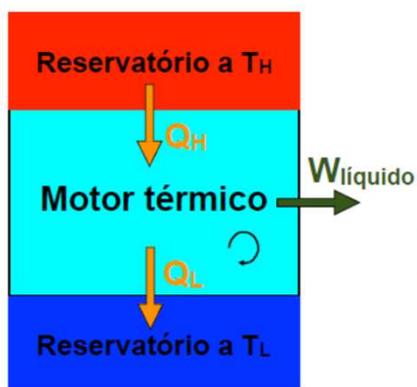
25

25

2ª Lei da Termodinâmica

Desigualdade de Clausius

Para escrever uma equação matemática para representar a 2ª Lei da Termodinâmica, considere um ciclo motor, reversível ou irreversível.



Para esse ciclo, a eficiência térmica é dada por:

$$\eta_{\text{motor}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Para um ciclo reversível vimos que o rendimento pode ser calculado por:

$$\eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Prof. Alfredo Alvim

26

26

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Desigualdade de Clausius

No caso do motor reversível podemos escrever:

$$1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \rightarrow \frac{T_L}{T_H} = \frac{Q_L}{Q_H} \rightarrow \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

Comparemos o rendimento de um ciclo irreversível com aquele de um reversível operando entre os mesmos reservatórios térmicos:

$$\eta_{\text{rev}} > \eta_{\text{irrev}} \rightarrow 1 - \frac{T_L}{T_H} > 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \rightarrow \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

Generalizando para qualquer motor operando ciclicamente:

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \leq 0$$

Prof. Alfredo Alvim

27

27

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Desigualdade de Clausius

Podíamos ter feito análise similar, comparando os coeficientes de desempenho de refrigeradores e bombas de calor reversíveis e irreversíveis, teríamos chegado à mesma conclusão:

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \leq 0$$

Demonstramos, assim, a desigualdade de Clausius:

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

Prof. Alfredo Alvim

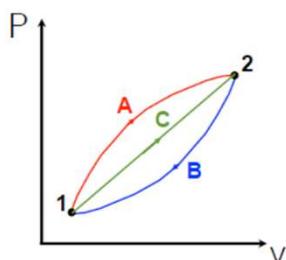
28

28

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

A propriedade entropia

Considere um sistema que percorre dois ciclos reversíveis. Ambos os ciclos começam no estado 1 e vão até o estado 2, sendo compostos por dois processos. O primeiro ciclo é formado por dois processos, A e B. O segundo pelos processos B e C.



Como os ciclos são compostos por processos reversíveis podemos escrever:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0$$

29

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

A propriedade entropia

Combinando as equações anteriores:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_B = 0$$

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_C$$

Observe que como a integral não depende do caminho para qualquer processo reversível, ela só depende dos estados inicial e final!

Prof. Alfredo Alvim

30

30

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

A propriedade entropia

Assim sendo, quando resolvemos a integral de linha ao longo de um processo reversível estamos calculando a variação de uma propriedade termodinâmica!

$$\Delta \text{Propriedade} = \Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

A essa propriedade dá-se o nome de entropia (S), que, como pode ser observado na expressão, é dada em kJ / K no S.I.

Na forma diferencial: $dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$

Prof. Alfredo Alvim

31

31

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo de Carnot

O ciclo de Carnot é composto apenas por processos reversíveis. Podemos, então, calcular variações de entropia usando a integral anterior.

♦ **Processo 1-2:** Isotérmico / interação de calor com o reservatório H.

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \rightarrow S_2 - S_1 = \frac{Q_H}{T_H}$$

♦ **Processo 2-3:** Adiabático / expansão. $S_3 = S_2$

♦ **Processo 3-4:** Isotérmico / interação de calor com o reservatório L.

$$\rightarrow S_4 - S_3 = -\frac{Q_L}{T_L}$$

♦ **Processo 4-1:** Adiabático / compressão. $S_4 = S_1$

Prof. Alfredo Alvim

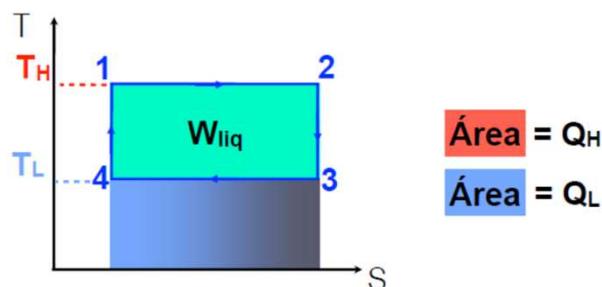
32

32

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Ciclo de Carnot

As características do Ciclo de Carnot sugerem a utilização de um diagrama T-s para visualização dos processos, observe:



Como aumentar o trabalho realizado e o rendimento do ciclo?

Importante: essa relação com as áreas só é válida quando todos os processos que compõem o ciclo forem reversíveis.

Prof. Alfredo Alvim

33

33

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Relação entre propriedades termodinâmicas

Agora precisamos aprender a calcular variações de entropia a partir de outras propriedades não mensuráveis, energia e entalpia, e de propriedades mensuráveis como pressão e temperatura...

Considere a 1ª Lei para um sistema na forma diferencial: $dU = \delta Q - \delta W$

Para uma substância compressível simples que passa por um processo reversível: $\delta W_{rev} = pdV$

Para um processo reversível: $dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$

Combinando as expressões anteriores: $dU = TdS - pdV$

A primeira relação procurada é: $TdS = dU + pdV$

Prof. Alfredo Alvim

34

34

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Relação entre propriedades termodinâmicas

A segunda relação pode ser obtida usando a definição de entalpia.

Definição de entalpia: $H = U + PV$

Derivando: $dH = dU + d(PV)$

Pela regra do produto: $dH = dU + VdP + PdV$

Substituindo a expressão anterior na relação: $TdS = dU + PdV$

obtemos a segunda relação: $TdS = dH - VdP$

Prof. Alfredo Alvim

35

35

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Relação entre propriedades termodinâmicas

As duas relações obtidas foram:

$$TdS = dU + PdV$$

$$TdS = dH - VdP$$

Podemos escrevê-las em termos de propriedades intensivas:

$$Tds = du + Pdv$$

$$Tds = dh - vdP$$

Prof. Alfredo Alvim

36

36

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Variações de entropia

As variações de entropia de substâncias puras compressíveis simples podem ser obtidas a partir da integração das relações anteriores:

$$Tds = du + Pdv \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv$$

$$Tds = dh - vdP \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dh}{T} - \int_1^2 \frac{v}{T} dP$$

Prof. Alfredo Alvim

37

37

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Variações de entropia

•líquido saturado para vapor saturado:

$$s_v - s_l = \int_l^v \frac{dh}{T} - \int_l^v \frac{v}{T} dP \quad \rightarrow \quad s_v - s_l = \frac{h_v - h_l}{T_{sat}}$$

processo isobárico

•entropia de uma mistura saturada:

$$s = (1 - x)s_l + xs_v$$

•entropia do líquido comprimido (aproximação):

$$s_{liq. comp.}(T,P) \cong s_l(T)$$

Prof. Alfredo Alvim

38

38

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Variações de entropia

•líquido ou sólido (modelo incompressível):

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv \rightarrow \Delta s = \int_1^2 \frac{du}{T} \rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{cdT}{T}$$

incompressível

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Prof. Alfredo Alvim

39

39

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Variações de entropia

•gás perfeito:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{P}{T} dv \rightarrow s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + \int_1^2 \frac{R}{v} dv$$

integrando $s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Prof. Alfredo Alvim

40

40

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Variações de entropia

• gás perfeito:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dh}{T} - \int_1^2 \frac{v}{T} dp \quad \rightarrow \quad s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - \int_1^2 \frac{R}{P} dP$$

$$\text{integrando } s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Considerando calor específico independente da temperatura:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Prof. Alfredo Alvim

41

41

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Processo politrópico reversível

As equações desenvolvidas para a variação de entropia de um gás ideal com c_p e c_v constantes podem ser usadas para obter expressões que relacionam em pares P , T e v em um processo isentrópico ($\Delta s = 0$):

$$0 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad \rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

$$0 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Combinando as equações anteriores:

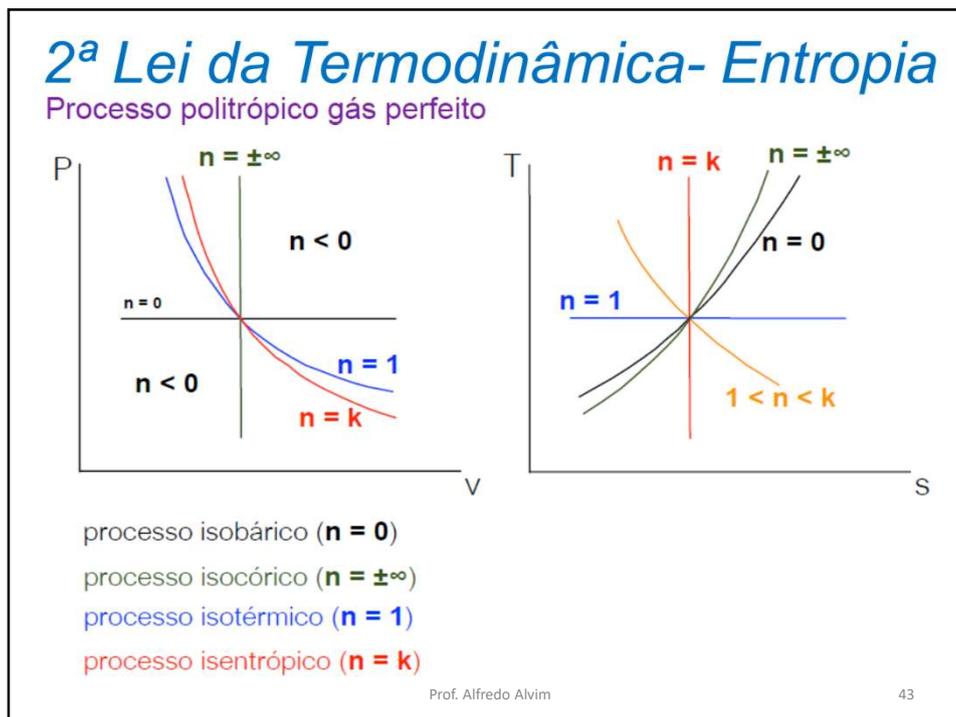
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

Trata-se de um processo politrópico ($PV^n = \text{cte}$) com $n = k$

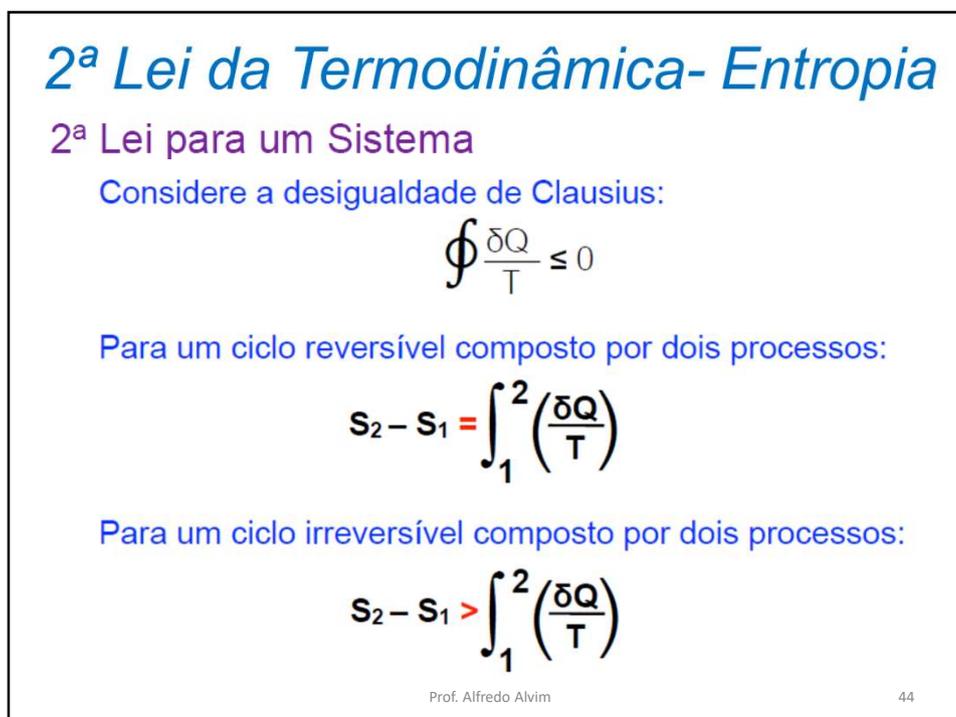
Prof. Alfredo Alvim

42

42



43



44

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

2ª Lei para um Sistema

Chegamos em:

$$s_2 - s_1 > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$$

Podemos eliminar a desigualdade introduzindo a entropia gerada (S_{ger}):

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{ger}$$

Finalmente chegamos em uma expressão da 2ª Lei para um sistema!

Prof. Alfredo Alvim

45

45

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Entropia gerada

Notas:

- ❖ S_{ger} não é uma propriedade termodinâmica;
- ❖ $S_{ger} = 0$ para um processo reversível;
- ❖ $S_{ger} > 0$ para um processo irreversível;
- ❖ S_{ger} não pode ser menor que 0;
- ❖ S_{ger} tem unidade de entropia.

Prof. Alfredo Alvim

46

46

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

2ª Lei para sistema

Resumo das equações para sistema:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{\text{ger}}$$

Na forma de taxas:

$$\frac{dS}{dt} = \int_1^2 \left(\frac{\delta \dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{\text{ger}}$$

Prof. Alfredo Alvim

47

47

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Casos particulares

Processo reversível: $\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{\text{ger}}$ ~~→~~ $\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$

Processo adiabático reversível: $\Delta s = 0$

Perguntas:

1ª) Δs pode ser menor que zero?

2ª) Quando $\Delta s = 0$ o processo é necessariamente adiabático reversível ?

Regime permanente: $\frac{dS_{\text{vc}}}{dt} = \int_1^2 \left(\frac{\delta \dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{\text{ger}}$

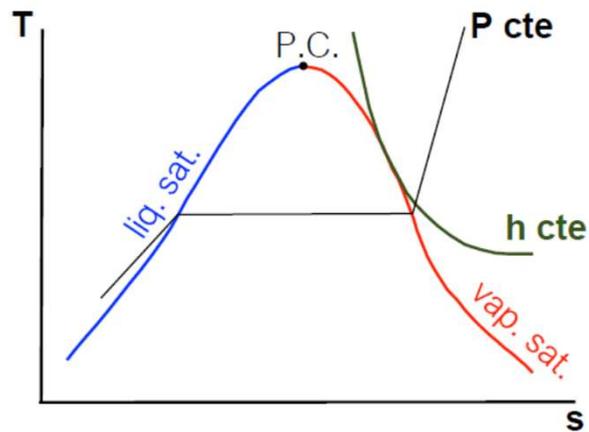
Prof. Alfredo Alvim

48

48

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Representação em diagramas



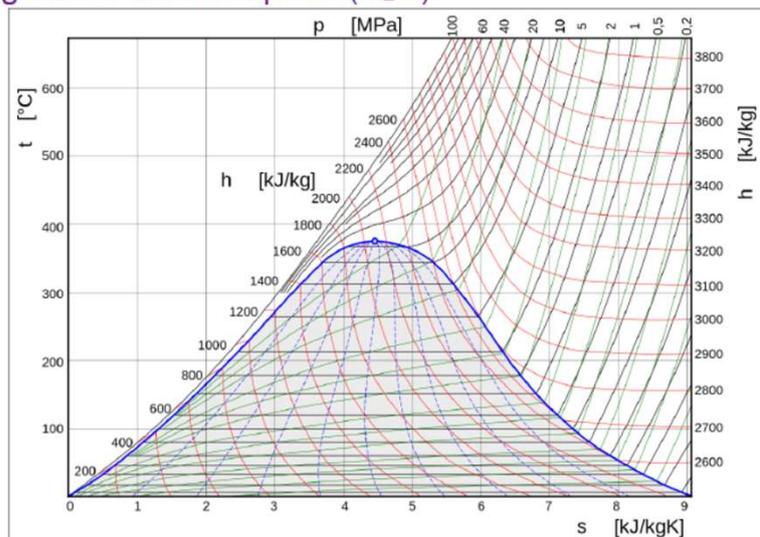
Prof. Alfredo Alvim

49

49

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Diagrama T-s: isentálpicas (H₂O)



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:T-s_diagram.svg Prof. Alfredo Alvim

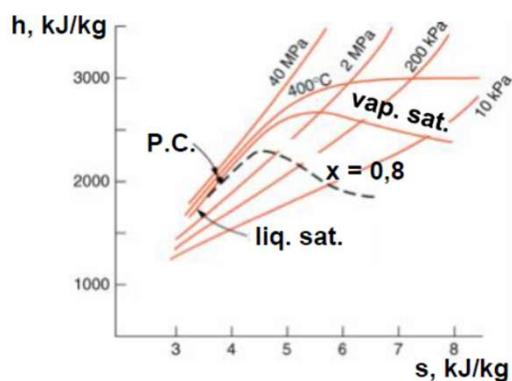
50

50

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Representação em diagramas

Em algumas situações o diagrama h-s também pode ser útil. Em particular, é mostrado o da água:



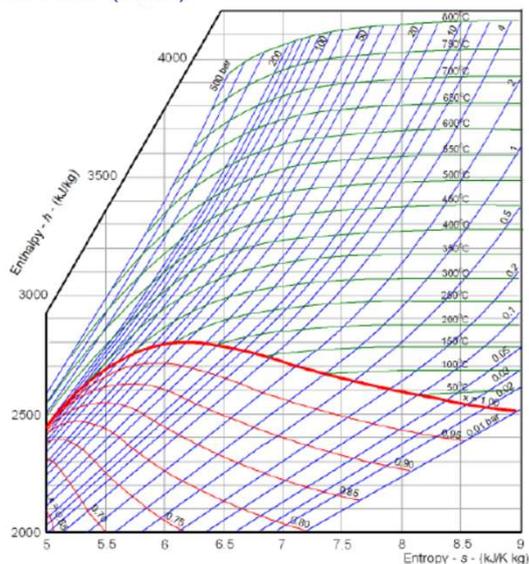
Prof. Alfredo Alvim

51

51

2ª Lei da Termodinâmica- Entropia

Diagrama h-s: Mollier (H₂O)



Prof. Alfredo Alvim

52

http://www.engineeringtoolbox.com/mollier-diagram-water-d_308.html

52

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

A expressão da 2ª Lei para Volume de Controle:

$$\begin{array}{c}
 \text{Taxa de variação da} \\
 \text{entropia no VC no} \\
 \text{instante } t
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{Contribuição da} \\
 \text{taxa de interação} \\
 \text{de calor}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \text{Taxa com que} \\
 \text{entropia entra no} \\
 \text{VC}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{c}
 \text{Taxa com que} \\
 \text{entropia sai do} \\
 \text{VC}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \text{Taxa com que} \\
 \text{entropia é} \\
 \text{gerada no VC}
 \end{array}$$

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum \left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{T} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger}$$

Prof. Alfredo Alvim

53

53

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Casos particulares

Regime permanente:

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa em cada ponto do VC não varia com o tempo;
- ★ O fluxo e o estado da massa em cada área discreta de escoamento na superfície de controle não variam com o tempo;
- ★ As taxas nas quais calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.

Prof. Alfredo Alvim

54

54

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Regime permanente

Com as simplificações anteriores:

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e - \sum \left(\frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T} \right)$$

Considerando, adicionalmente, uma entrada e uma saída:

$$\dot{S}_{\text{ger}} = \sum \dot{m} (s_s - s_e) - \sum \left(\frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T} \right)$$

Prof. Alfredo Alvim

55

55

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Trabalho associado ao escoamento

Considere a expressão da 1ª lei para um volume de controle com uma entrada e uma saída através do qual escoar um fluido em regime permanente:

$$q + h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e = w + h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Desejamos eliminar q da expressão. Para isso considere a expressão da 2ª lei em regime permanente na forma diferencial:

$$ds = \frac{\delta q}{T} + \delta s_{\text{ger}} \quad \text{combinando com} \quad Tds = dh - v dP$$

$$\text{obtem-se} \quad \delta q = dh - v dP - T \delta s_{\text{ger}}$$

Prof. Alfredo Alvim

56

56

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Trabalho associado ao escoamento

Integrando a expressão a seguir $\delta q = dh - v dP - T \delta s_{ger}$

$$\text{obtem-se } q = h_s - h_e - \int_e^s v dP - \int_e^s T \delta s_{ger}$$

Combinando com a expressão da 1a Lei

$$q + h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e = w + h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s$$

Obtem-se:

$$w = - \int_e^s v dP + \frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s T \delta s_{ger}$$

Prof. Alfredo Alvim

57

57

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Trabalho associado ao escoamento

$$w = - \int_e^s v dP + \frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s T \delta s_{ger}$$

Observe que:

a integral não tem nada a ver com trabalho de fronteira (pdV);

aparece variação de energia cinética / massa de fluido;

aparece variação de energia potencial / massa de fluido;

o último termo é sempre positivo.

Prof. Alfredo Alvim

58

58

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Caso Particular

$$\cancel{w} = - \int_e^s v dP + \frac{V_e^2}{2} - \frac{V_s^2}{2} + gz_e - gz_s - \int_e^s T \delta s_{ger}$$

Simplificações:

- Processo reversível;
- Sem trabalho de eixo;
- Fluido incompressível (v cte).

$$v(P_s - P_e) + \frac{V_s^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} + gz_s - gz_e = 0 \quad \text{que é a equação de Bernoulli!}$$

Prof. Alfredo Alvim

59

59

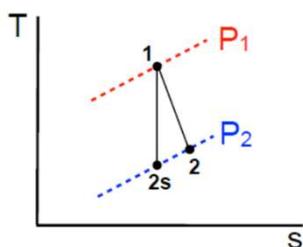
2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Eficiência isentrópica

Como avaliar o desempenho de uma máquina real?

Comparando seu desempenho com o de uma máquina ideal operando sob as mesmas condições.

O desempenho é dado pela eficiência isentrópica. Consideremos inicialmente, 2 turbinas adiabáticas, uma reversível e outra não:



Podemos definir:

$$\eta_{s,tur} = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{ideal}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2)}{\dot{m}(h_1 - h_{2s})}$$

$$\eta_{s,tur} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2s})} \quad 0,7 < \eta_{s,tur} < 0,88$$

Prof. Alfredo Alvim

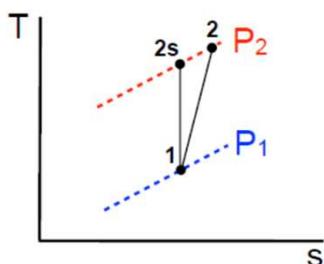
60

60

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Eficiência isentrópica

Analogamente para um compressor:



Podemos definir:

$$\eta_{s,\text{com}} = \frac{\dot{W}_{\text{ideal}}}{\dot{W}_{\text{real}}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_{2s})}{\dot{m}(h_1 - h_2)}$$

$$\eta_{s,\text{com}} = \frac{(h_1 - h_{2s})}{(h_1 - h_2)} \quad 0,7 < \eta_{s,\text{com}} < 0,88$$

Prof. Alfredo Alvim

61

61

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

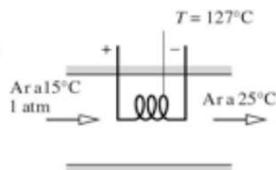
1) Na figura é mostrada uma resistência elétrica localizada em um duto isolado pelo qual escoar ar. Em regime permanente uma corrente elétrica passa através da resistência. Nessa condição a potência dissipada é igual a 6,75 kW e a temperatura da superfície da resistência é uniforme e igual a 127 °C. O ar entra no duto a 15 °C, 1 atm e sai a 25 °C, com perda de carga desprezível. Variações de energia cinética e potencial podem ser desprezadas.

a) considerando a resistência como o sistema, determine a taxa de geração de entropia.

b) para um volume de controle envolvendo o ar no duto e a resistência, determine a vazão volumétrica de ar entrando no duto e a taxa de geração de entropia.

c) Por que os valores de geração de entropia calculados nos itens (a) e (b) são diferentes?

(Ex. 6.17 – Moran & Shapiro, 4ª ed)



Prof. Alfredo Alvim

62

62

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia

Volume de Controle

Exercícios

a) Sistema é a resistência

Balanco de energia em R.P., ΔE_c e ΔE_p desprezíveis:

$$\dot{Q} = \dot{W}_{elet} = -6,75 \text{ kW}$$

Balanco de entropia em RP:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{ger}$$

$$\Rightarrow \dot{S}_{ger} = -\frac{\dot{Q}}{T} = \frac{6,75}{400} = 0,0169 \text{ kW/K}$$

Prof. Alfredo Alvim

63

63

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia

Volume de Controle

Exercícios

b) Sistema = resistência + ar no duto

Balanco de energia em RP, ΔE_c e ΔE_p desprezíveis:

$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \Rightarrow -\dot{W}_{VC} + \dot{m}(h_e - h_s) = 0 \Rightarrow \dot{m} = \frac{-\dot{W}_{VC}}{h_s - h_e}$$

Considerando g.p. e c_p constante: $\dot{m} = \frac{-\dot{W}_{VC}}{c_p (T_s - T_e)}$

com $c_p = 1,004 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ (298 K): $\dot{m} = \frac{-(-6,75)}{1,004(25 - 15)} = 0,672 \text{ kg/s}$

$$\dot{V} = \dot{m} v_1 = \dot{m} \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,672 \text{ kg/s} \cdot 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 288 \text{ K}}{101,325 \text{ kPa}} = 0,548 \text{ m}^3/\text{s}$$

Prof. Alfredo Alvim

64

64

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

b) Sistema = resistência + ar no duto

Balço de entropia em RP:

$$\dot{S}_{ger} = \frac{dS_{VC}}{dt} - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{sai} \dot{m}_s s_s - \sum_{entra} \dot{m}_e s_e \Rightarrow \dot{S}_{ger} = \dot{m}(s_s - s_e)$$

Considerando g.p. e c_p constante: $\dot{S}_{ger} = \dot{m} \left(c_p \ln \frac{T_e}{T_s} - R \ln \frac{P_s}{P_e} \right)$

$$\Rightarrow \dot{S}_{ger} = \dot{m} c_p \ln \frac{T_e}{T_s} = 0,672 \cdot 1,004 \cdot \ln \frac{298}{288} = 0,023 \text{ kW/K}$$

Prof. Alfredo Alvim

65

65

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

c) Por que os valores de geração de entropia calculados nos itens (a) e (b) são diferentes?

(a) a entropia gerada diz respeito à irreversibilidade associada à passagem da corrente elétrica pelo resistor (efeito Joule).

(b) a entropia gerada também inclui a irreversibilidade oriunda da transferência de calor da resistência para o ar.

Prof. Alfredo Alvim

66

66

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

Solução (a):

Para verificar se o dispositivo é possível precisamos verificar se ele atende à Primeira e à Segunda Leis da Termodinâmica.

Analisando a Primeira Lei

- Balanços de Massa e Energia para o volume de controle:

$$\dot{m}_A = \dot{m}_B + \dot{m}_C \quad 0 = \dot{m}_A h_A - \dot{m}_B h_B - \dot{m}_C h_C$$

- a partir dessas equações podemos obter os valores de \dot{m}_B e \dot{m}_C que satisfazem aos balanços.

Prof. Alfredo Alvim

69

69

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

Solução (a):

$$0 = \dot{m}_A h_A - \dot{m}_B h_B - \dot{m}_C h_C = \dot{m}_A c_p T_A - \dot{m}_B c_p T_B - (\dot{m}_A - \dot{m}_B) c_p T_C$$

$$\dot{m}_A (T_A - T_C) = \dot{m}_B (T_B - T_C)$$

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{m}_A (T_A - T_C)}{(T_B - T_C)} = \frac{30 \times 10^{-3} (300 - 310)}{(250 - 310)}$$

$$\dot{m}_B = 5 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \Rightarrow \dot{m}_C = 25 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Prof. Alfredo Alvim

70

70

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

Solução (a):

Analisando a Segunda Lei

$$0 = \cancel{\sum \frac{\dot{Q}}{T}} + \dot{m}_A s_A - \dot{m}_B s_B - \dot{m}_C s_C + \dot{S}_{ger}$$

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m}_B (s_B - s_A) + \dot{m}_C (s_C - s_A)$$

$$\dot{S}_{ger} = \dot{m}_B \left(c_p \ln \frac{T_B}{T_A} - R \ln \frac{p_B}{p_A} \right) + \dot{m}_C \left(c_p \ln \frac{T_C}{T_A} - R \ln \frac{p_C}{p_A} \right)$$

Prof. Alfredo Alvim

71

71

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia Volume de Controle

Exercícios

Solução (a):

Analisando a Segunda Lei:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{ger} &= 5 \times 10^{-3} \left(1,004 \ln \frac{250}{300} - 0,287 \ln \frac{1}{5} \right) \\ &\quad + 25 \times 10^{-3} \left(1,004 \ln \frac{310}{300} - 0,287 \ln \frac{1}{5} \right) \\ &= 0,014 \text{kJ/kg} \cdot \text{K} > 0 \end{aligned}$$

Como a taxa de geração de entropia é positiva, a Segunda Lei é satisfeita. Logo, o dispositivo é possível. Na verdade ele **existe**, e é também conhecido como Tubo de Ranque-Hilsch

Prof. Alfredo Alvim

72

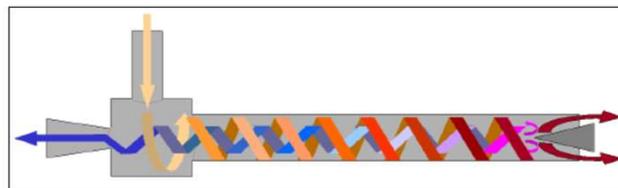
72

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia

Exercícios Volume de Controle

Tubos de Vórtice ou de Ranque-Hilsch

- Dispositivo mecânico sem partes móveis que separa um gás comprimido em um fluxo quente e outro frio. O fluxo frio pode atingir temperaturas dezenas de graus abaixo daquela do gás que entra no tubo.
- O tubo de vórtice foi inventado em 1933 pelo físico francês Georges J. Ranque. O físico alemão Rudolf Hilsch melhorou o projeto e publicou em 1947 um trabalho que atingiu um público maior. Chamou o dispositivo de "Wirbelrohr" (tubo de vórtice)



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_v%C3%B3rtice

Prof. Alfredo Alvim

73

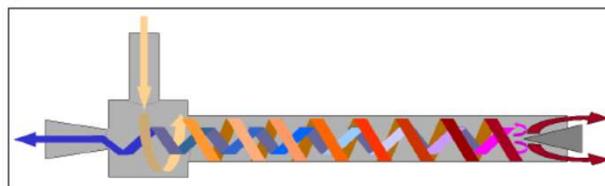
73

2ª Lei da Termodinâmica – Entropia

Exercícios Volume de Controle

Tubos de Vórtice ou de Ranque-Hilsch

- O gás pressurizado é injetado tangencialmente em uma câmara de giro e é acelerado até uma rotação muito alta, gerando um vórtice junto à parede do tubo.
- Devido a um fechamento cônico regulável no final do tubo, somente a camada mais externa do ar comprimido em rotação consegue escapar naquela extremidade.
- O restante do gás é forçado a retornar em um vórtice interno, de menor diâmetro. Este vórtice interno é composto de gás mais frio do que aquele que entra no tubo, e escapa por um orifício próximo ao ponto de entrada do ar comprimido.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_v%C3%B3rtice

Prof. Alfredo Alvim

74

74