

Segunda Lei da Termodinâmica para Volumes de Controle

PME3398

Prof. Antonio Luiz Pacífico

1º Semestre de 2019

Conteúdo da Aula

- 1 Taxa de Variação de Entropia para Sistemas
- 2 2ª Lei da Termodinâmica para VC
- 3 Princípio do Aumento da Entropia para VC
- 4 Eficiência de Processos
- 5 Exercícios

Taxa de Variação de Entropia para Sistemas

Como visto no capítulo anterior, Entropia para Sistemas, a equação da taxa de variação da entropia é dada por:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{sistema} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T} \cdot \dot{Q} + \dot{\sigma}_{sistema}$$

onde:

- $(dS/dt)_{sistema}$ é a taxa de variação da entropia dentro do sistema. Esse termo é nulo quando a taxa de transferência de calor, \dot{Q} , não varia com o tempo, caracterizando o que se costuma chamar de *regime permanente*;
- $\sum_{i=1}^n (\dot{Q}/T)_i$ é a taxa de transferência de entropia para ou do sistema;
- $\dot{\sigma} = \dot{S}_{gerada}$ é a taxa de geração de entropia. Nula para processos reversíveis e maior que zero para processos irreversíveis.

2ª Lei da Termodinâmica para VC

Para o estabelecimento da equação de balanço de entropia para VC não se usa o Teorema do Transporte de Reynolds, porque entropia não é uma propriedade conservativa. Assim, este balanço é escrito em termos de taxas que entram e saem do VC e sua influência sobre a taxa de variação da entropia dentro do VC, mais as taxas de transferência de entropia devido à transferência de calor e, finalmente, a taxa de geração de entropia. Esta equação é escrita da seguinte forma:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} + \int_{SC} s.p. \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{\sigma}_{VC}$$

onde n_{stc} é o número de superfícies de troca de calor

2ª Lei da Termodinâmica para VC

Lembrando que $\int_{SC} s.p. \vec{V} \cdot d\vec{A}$ diz respeito às taxas de entropia que entram e saem do VC através das superfícies de controle (SC), a equação final do balanço de entropia para VC tem a seguinte forma:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} + \sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j \cdot s_j - \sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i \cdot s_i = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{\sigma}_{VC}$$

onde n_s e n_e são os números de saídas e entradas, respectivamente, através da SC: mesma notação utilizada no capítulo sobre 1ª Lei da Termodinâmica para VC.

2ª Lei da Termodinâmica para VC

No balanço de entropia para VC:

- dS_{VC}/dt é a taxa de variação de entropia no VC (pode ser $<$, $>$ ou $= 0$);
- $\sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j \cdot s_j - \sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i \cdot s_i$ são as taxas de transferência de entropia devido aos fluxos de massa que entram e saem através da SC (podem ser $<$, $>$ ou $= 0$);
- $\sum_{k=0}^{n_{stc}} (\dot{Q}_k / T_k)$ são as taxas de transferência de entropia devido às trocas de calor do VC com a vizinhança (podem ser $<$, $>$ ou $= 0$);
- $\dot{\sigma}_{VC}$ é a taxa de geração de entropia no VC (sempre ≥ 0);

2ª Lei da Termodinâmica para VC

Uma vez que o termo associado à geração de entropia é sempre positivo ou nulo, o balanço de entropia pode, também, ser escrito na forma de uma inequação:

$$\frac{dS_{VC}}{dt} \geq \sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i \cdot s_i - \sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j \cdot s_j + \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

reservando-se a igualdade para processos reversíveis.

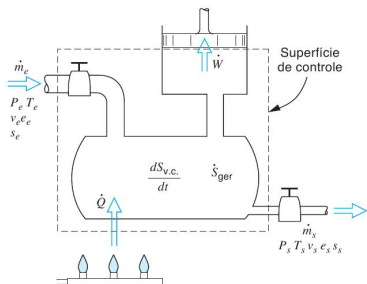


Figura: Balanço de entropia em um VC.

Processo em Regime Permanente

Para processos em regime permanente a entropia, em qualquer ponto do VC, não varia com o tempo. Assim, $dS_{VC}/dt = 0$. Logo,

$$\sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j \cdot s_j - \sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i \cdot s_i = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{\sigma}_{VC}$$

Simplificando, para VC's mais comuns, com uma entrada e uma saída:

$$\dot{m} \cdot (s_s - s_e) = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{\sigma}_{VC}$$

ou em termos específicos

$$s_s - s_e = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{q_k}{T_k} + \left(\frac{\dot{\sigma}}{\dot{m}} \right)_{VC}$$

Calor e Trabalho em Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

Calor transferido, por unidade de massa, para processos internamente reversíveis em regime permanente:

$$\left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{int_rev} = \int_1^2 T \cdot ds \rightarrow \text{via balanço de entropia para VC}$$

Trabalho, por unidade de massa, para as mesmas condições:

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{int_rev} = \frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g \cdot (z_1 - z_2)$$

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}}\right)_{int_rev} = \int_1^2 T \cdot ds + (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2}\right) + g \cdot (z_1 - z_2)$$

Calor e Trabalho em Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

Relação $T.ds$: $T.ds = dh - v.dp$. Na forma integral:

$$\int_1^2 T.ds = (h_2 - h_1) - \int_1^2 v.dp$$

Assim,

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} \right)_{int.rev} = - \int_1^2 v.dp + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + g.(z_1 - z_2)$$

Aplicação, por exemplo, em processos de bombeamento de fluidos incompressíveis, com variações de energias cinética e potencial desprezíveis:

Calor e Trabalho em Processos Internamente Reversíveis em Regime Permanente

$$\left(\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} \right)_{int_rev} = -v \cdot (p_2 - p_1)$$

Note que, se $\dot{W}_{VC} = 0$, chega-se à conhecida Equação de Bernoulli:

$$0 = -v \cdot (p_2 - p_1) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2)$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho V_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho V_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2$$

Calor e Trabalho em Processos Irreversíveis em Regime Permanente

Na dedução anterior, caso haja irreversibilidades presentes no processo, basta acrescentar um termo relativo a este fenômeno e a equação final é:

$$\frac{\dot{W}_{VC}}{\dot{m}} = - \int_1^2 v \cdot dp + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + g \cdot (z_1 - z_2) - \int_1^2 T \cdot \delta\sigma$$

Note que o último termo acrescentado é sempre a subtração de um termo positivo, uma vez que $T > 0$ e $\delta\sigma \geq 0$, significando, portanto, que para um processo irreversível haverá uma redução na quantidade de trabalho produzida em função das irreversibilidades presentes

Processo em Regime Uniforme

O procedimento para determinação do balanço de entropia para VC em regime uniforme (transiente) é o mesmo adotado no equacionamento da 1ª Lei da Termodinâmica para VC. Parte-se da equação geral do balanço de entropia para VC e faz-se a integração num intervalo de tempo genérico: $t_{inicial} = t_1 = 0$ e $t_{final} = t_2 = t$.

O balanço de entropia para VC pode ser escrito como¹:

$$\frac{d(m.s)_{VC}}{dt} + \sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j \cdot s_j - \sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i \cdot s_i = \sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{\sigma}_{VC}$$

¹Lembrando que $dS_{VC}/dt = d(m.s)_{VC}/dt$.

Processo em Regime Uniforme

Integrando termo a termo, conforme especificado:

$$\int_0^t \left[\frac{d(m.s)_{VC}}{dt} \right] .dt = (m_2.s_2 - m_1.s_1)_{VC}$$

$$\int_0^t \left(\sum_{j=0}^{n_s} \dot{m}_j . s_j \right) .dt = \sum_{j=0}^{n_s} m_j . s_j$$

$$\int_0^t \left(\sum_{i=0}^{n_e} \dot{m}_i . s_i \right) .dt = \sum_{i=0}^{n_e} m_i . s_i$$

$$\int_0^t \left(\sum_{k=0}^{n_{stc}} \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \right) .dt = \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{T} \right) .dt$$

Processo em Regime Uniforme

$$\int_0^t \dot{\sigma}_{VC} \cdot dt = {}_1 \sigma_2 = ({}_1 S_2)_{gerada}$$

Agrupando os termos,

$$(m_2 \cdot s_2 - m_1 \cdot s_1)_{VC} + \sum_{j=0}^{n_s} m_j \cdot s_j - \sum_{i=0}^{n_e} m_i \cdot s_i = \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{T} \right) \cdot dt + {}_1 \sigma_2$$

Na grande maioria dos casos, o termo da transferência de entropia devido a troca de calor será dado por:

$$\int_0^t \left(\frac{\dot{Q}_{VC}}{T} \right) \cdot dt = \frac{Q_{VC}}{T}$$

ou seja, toda a SC considerada à uma única temperatura T.

Princípio do Aumento da Entropia para VC

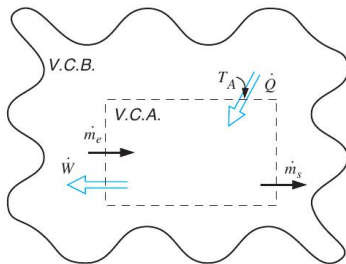


Figura: ΔS em um VC e suas vizinhanças. **Atenção:** O que é saída para um VC torna-se entrada para o outro e vice-versa.

Os balanços de entropia para os dois VC's são:

$$\frac{dS_{VC,A}}{dt} + \dot{m}_s \cdot s_s - \dot{m}_e \cdot s_e \geq \frac{\dot{Q}}{T_A}$$

$$\frac{dS_{VC,B}}{dt} = -\dot{m}_e \cdot s_e + \dot{m}_s \cdot s_s - \frac{\dot{Q}}{T_B}$$

com $T_B > T_A$, e B é um VC extremamente maior que A tal que pode ser considerado como meio, ou vizinhança de A .

A taxa de variação de entropia total (do universo) será dada pela soma das duas taxas acima.

Princípio do Aumento da Entropia para VC

$$\frac{dS_{liq}}{dt} = \frac{dS_{VC,A}}{dt} + \frac{dS_{VC,B}}{dt}$$

$$\frac{dS_{liq}}{dt} \geq \dot{m}_e \cdot s_e - \dot{m}_s \cdot s_s + \frac{\dot{Q}}{T_A} - \dot{m}_e \cdot s_e + \dot{m}_s \cdot s_s - \frac{\dot{Q}}{T_B}$$

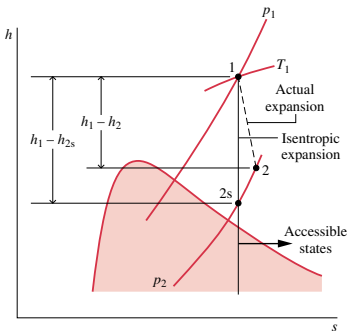
$$\frac{dS_{liq}}{dt} \geq \dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right)$$

Como $T_A < T_B$ segue-se que:

$$\frac{dS_{liq}}{dt} = \frac{dS_{universo}}{dt} \geq 0$$

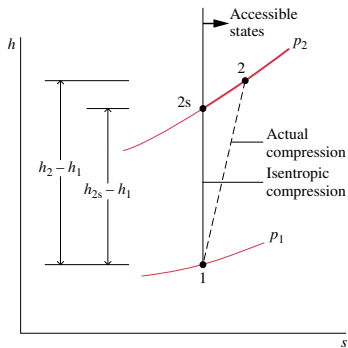
Eficiências Isoentrópicas

Turbina



$$\eta_t = \frac{(\dot{W}_{VC}/\dot{m})_{real}}{(\dot{W}_{VC}/\dot{m})_{isoen}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Compressor



$$\eta_c = \frac{(-\dot{W}_{VC}/\dot{m})_{isoen}}{(-\dot{W}_{VC}/\dot{m})_{real}} = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2}$$

Eficiências Isoentrópicas

Para bombas a eficiência isoentrópica é calculada da mesma forma que para compressores.

Para bocais é dada por:

$$\eta_{bocal} = \left(\frac{V_s}{V_{s_s}} \right)^2$$

onde V_s é a velocidade à saída do bocal na condição real (com irreversibilidades presentes) e V_{s_s} é a velocidade à saída do bocal na condição ideal: processo isoentrópico.

Exercício de Aula 1

Enunciado: Vapor expande-se isentropicamente através de uma turbina de 6 MPa e 600 °C para 10 kPa. Calcule a potência se a vazão de massa for de 2 kg/s.

Exercício de Aula 2

Enunciado: Um recipiente com volume interno de $0,2 \text{ m}^3$ inicialmente está vazio. O recipiente então é carregado com He proveniente de uma linha onde o fluido escoia a 500 K e 1 MPa . O processo de carga termina quando a pressão no recipiente atinge 1 MPa e é bastante rápido (pode ser considerado adiabático). Determine a massa e a temperatura finais do He no recipiente e a entropia total gerada neste processo.

Exercício de Aula 3

Enunciado: Um tanque rígido, com volume interno de 1 m^3 , contém 100 kg de R-134a a temperatura ambiente ($20 \text{ }^\circ\text{C}$). Uma válvula situada no topo do tanque é, então, aberta, e vapor saturado é estrangulado até 100 kPa e descarregado num coletor. Durante esse processo, a temperatura interna do tanque permanece constante e igual a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A válvula é fechada quando não existe mais líquido no tanque. Nestas condições, determine o calor transferido ao tanque e a geração de entropia no processo.

Exercício de Aula 4

Enunciado: Uma turbina é alimentada com um escoamento de ar a 1500 K e 1 MPa. A pressão na seção de descarga do equipamento é 100 kPa e a eficiência isentrópica da turbina igual a 0,85. Determine a temperatura na seção de descarga da turbina e o aumento na entropia específica no escoamento através da turbina, considerando que o processo seja adiabático.