



Termodinâmica

2ª Lei da Termodinâmica para Volume de Controle

Introdução



Estenderemos o balanço de entropia desenvolvido para considerar entrada e saída de massa. Não nos ocuparemos da dedução da expressão e analisaremos casos particulares.

A expressão da 2ª Lei para Sistema:

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

A expressão da 2ª Lei para Volume de Controle:

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

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

3

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.

4



Com as simplificações anteriores:

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

Considerando, adicionalmente, uma entrada e uma saída:

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



Regime uniforme

- ★ O VC não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- ★ O estado da massa dentro do VC pode variar com o tempo, mas é uniforme ao longo de todo o VC;
- ★ o estado da massa que atravessa cada uma das áreas de fluxo na superfície de controle é constante e uniforme, embora as vazões possam variar com o tempo.

Hipótese principal



Vamos integrar a expressão a seguir de um instante inicial (1) até um instante t (2) de forma a eliminar a equação diferencial:

$$\int_1^2 \frac{dS_{vc}}{dt} = \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc}}{T} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger} dt$$

Obtemos:

$$S_2 - S_1 = \sum \left(\frac{Q_{1-2}}{T} \right) + \sum m_e s_e - \sum m_s s_s + S_{ger,1-2}$$

O que significa cada um dos termos?



Considere a expressão da 1ª lei para um volume de controle com uma entrada e uma saída através do qual escoa 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 na forma diferencial:

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

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



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:

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



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

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.

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

Simplificações:

Processo reversível;

Sem trabalho de eixo;

Fluido incompressível (v cte).

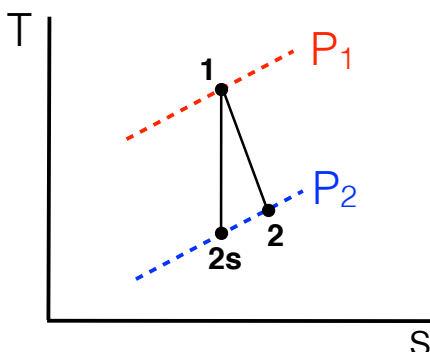
$$v(P_s - P_e) + \frac{V_s^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} + gz_s - gz_e = 0 \quad \text{que é a equação de Bernoulli!}$$

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:

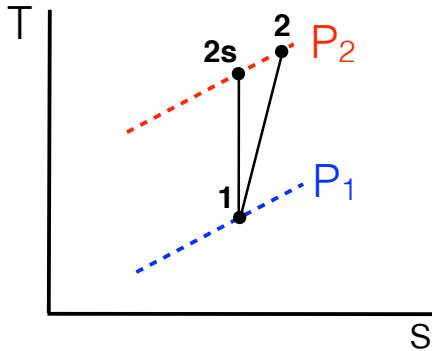


Podemos definir:

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

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

Analogamente para um compressor:



Podemos definir:

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

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