Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

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:

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

A expressão da 2ª Lei para Volume de Controle:

Taxa de variação da entropia no VC no instante *t* = Contribuição da taxa de interação de calor + Taxa com que entropia entra no VC − Taxa com que entropia sai do VC + Taxa com que entropia é gerada no VC

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

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.

Regime permanente

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:

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

Casos particulares

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

Regime uniforme

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:

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

O que significa cada um dos termos?

Trabalho associado ao escoamento

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:

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

obtém-se $\delta q = dh - vdP - T\delta s_{ger}$

Trabalho associado ao escoamento

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

obtém-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

$$q + h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e = w + h_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s$$

Obtém-se:

$$v\left(P_e - P_s\right) + \frac{1}{2}\left(V_e^2 - V_s^2\right) + g\left(z_e - z_s\right) = 0$$

Trabalho associado ao escoamento

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

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.

Caso Particular

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

Simplificações:

Processo reversível;

Sem trabalho de eixo;

Fluido incompressível (v cte).

$$v\left(P_e - P_s\right) + \frac{1}{2}\left(V_e^2 - V_s^2\right) + g\left(z_e - z_s\right) = 0$$

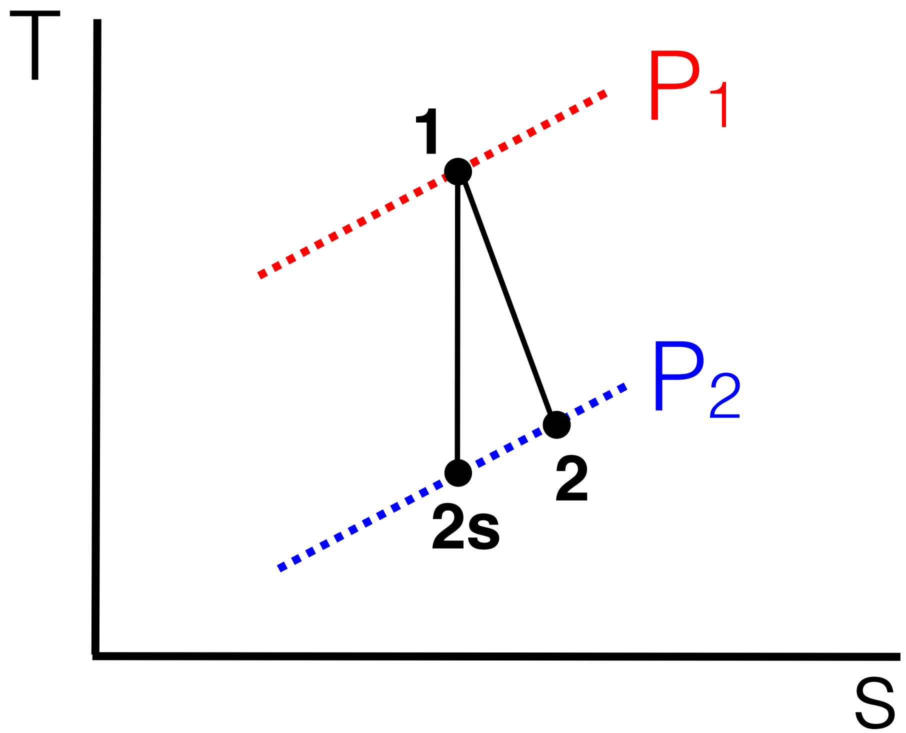
que é a equação de Bernoulli!

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:



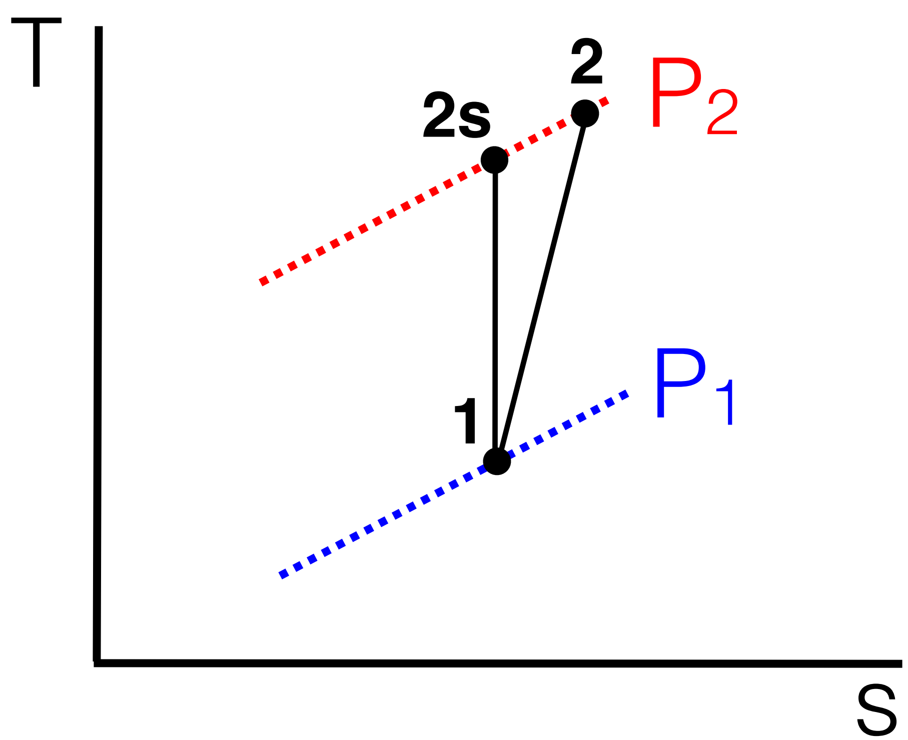
Podemos definir:

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

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

Eficiência isentrópica

Analogamente para um compressor:



Podemos definir:

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

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