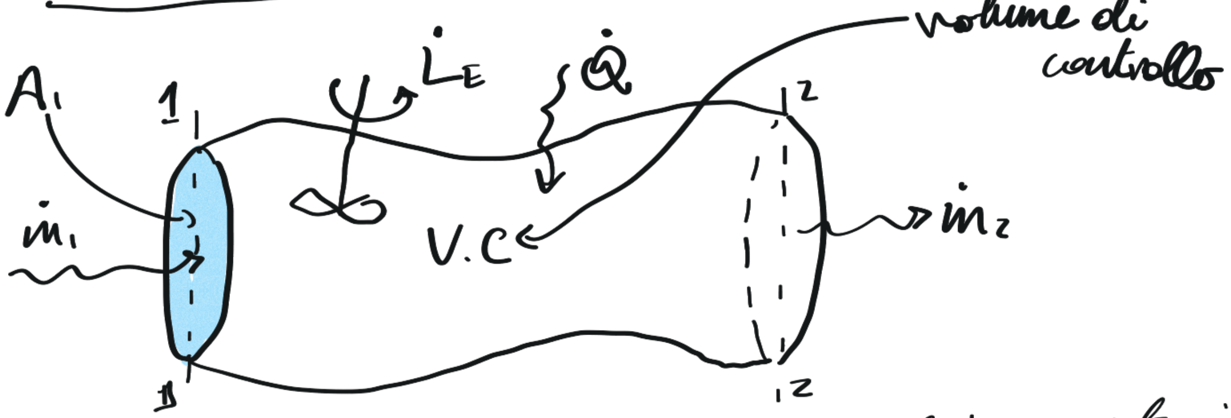
Lezione 11 - Sistemi Aperti

↳ $dN_i \gtrless 0$

Molti dispositivi termici possono esser modellati con sistemi aperti

Oltre l'equilibrio di energia, dobbiamo fare uno equilibrio di massa

Come schematizziamo: (Tubo)



Consideriamo pareti rigide, perchè consideriamo sistemi meccanici.

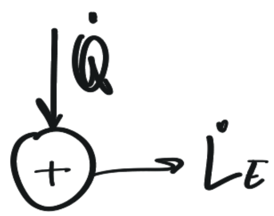
$\dot{m}_i$ = portata massica $\rightarrow \left[\frac{kg}{s}\right] = \frac{dm}{dt}$

$\dot{Q}$ = potenza termica $\quad \dot{L}_E \Rightarrow$ potenza meccanica d'elica

Consideriamo regime stazionario

↳ $\frac{dX}{dt} = 0 \quad X = \left\{ \text{GRANDEZZE TD} = 0 \right\}$

↳ include S



stessa convenzione

Bilancio di massa

$$\frac{dM_{VC}}{dt}=0 \qquad M_{V.C}=\text{cost}$$

← volume di controllo

Cambia la portata, ma non cambia la massa

$$\dot m_1=\dot m_2=\dot m \left[\frac{kg}{s}\right]$$

se $\bar W$ ← velocità media sulla sezione (d'ingresso)

$$\underbrace{\dot m_1}_{\rho_1\bar w_1 A_1} = \underbrace{\dot m_2}_{\rho_2\bar w_2 A_2} = \dot m$$

$$\rho_1\bar w_1 A_1=\rho_2\bar w_2 A_2$$

$$\frac{kg}{\cancel{m^3}}\cdot\frac{\cancel{m}}{s}\cdot\cancel{m^2}=\left[\frac{kg}{s}\right]$$

Casi particolari

Caso 1 – se $\underbrace{\text{fluidi incomprimibili}}_{\text{liquido, o gas e vapore } \bar w << c}$ → $\rho=\text{cost}$

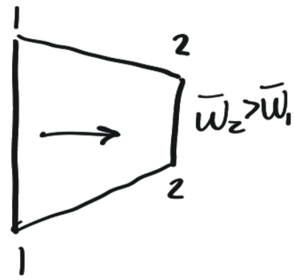
c ← velocità suono

e ΔP e ΔT limitate

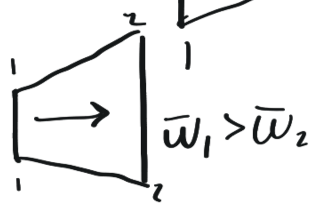
$$\rho_1=\rho_2 \qquad \bar w_1 A_1=\bar w_2 A_2$$

$$\bar w_2=\bar w_1\frac{A_1}{A_2}$$

se convergente $(A_2<A_1)$



se divergente $(A_1<A_2)$



la velocità agisce in modo opposto
che $d\bar{w} > 0 \Rightarrow dP < 0$ e se $d\bar{w} < 0 \Rightarrow dP > 0$

Caso due_ Fluidi comprimibili ma $A_1 = A_2 = A$

$$\Rightarrow \rho_1 \bar{w}_1 = \rho_2 \bar{w}_2 \rightarrow \bar{w}_2 = \bar{w}_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

Bilancio di energia

$$\frac{dE_{TOT}}{dt} = 0 \Rightarrow \dot{E}_1 = \dot{E}_2$$

$$\dot{E}_{TOT} = \dot{E}_M + \dot{E}_Q + \dot{E}_L$$

↳ Però ci sarà un altro tipo di lavoro, il lavoro di pulsione

Energia interna massica

$$\dot{E}_M \begin{cases} \dot{E}_{M1} = \dot{m}\left(u^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_1 \; [W] \\ \dot{E}_{M2} = \dot{m}\left(u^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_2 \; [W] \end{cases}$$

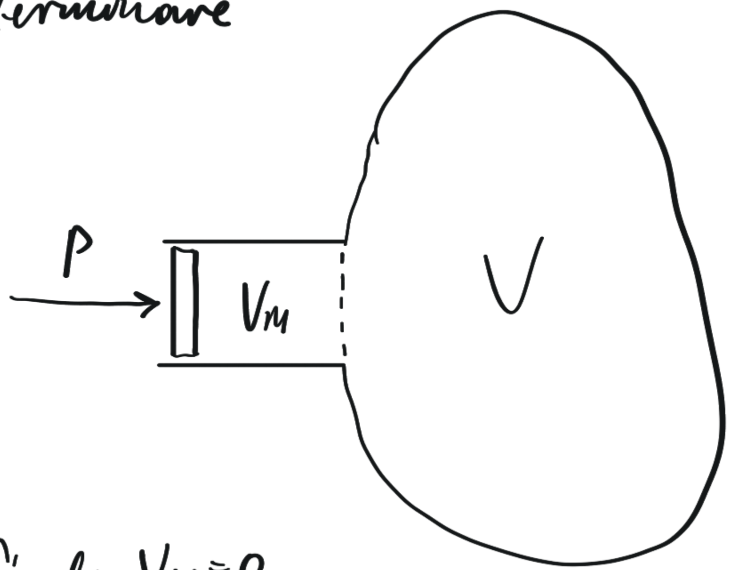
$$\dot{E}_Q = \dot{Q} \; [W]$$

$$\dot{E}_L = \dot{E}_{LE} + \dot{E}_{LP}$$

$\dot{E}_{LP}$: Lavoro di pulsione → Lavoro per muovere il sistema fluente

$\dot{E}_{LE}$: Lavoro d'elica

Come determinare $\dot{E}_{LP}$



Pressione finchè $V_M = 0$

stato finale

(−) perché positivo entrante

Positivo entrante

$$\xrightarrow{L_{p1}} \oplus$$

$$\boxed{L_{p1}} = -\int_{V+V_M}^{V} P\,dV = -P\left[V-(V+V_M)\right] = \boxed{PV_M}$$

stato iniziale

$$\dot{E}_{LP} = \dot{L}_p = \dot{m} P v^*$$

$$\dot{m}\left(u^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right) + \dot{m} P_1 v_1^* + \dot{Q} - \dot{L}_E =$$

$$= \dot{m}\left(u^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_2 + \dot{m} P_2 v_2^* \quad [W]$$

$$\dot{m}\left(u^* + Pv^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_1 + \dot{Q} - \dot{L}_E = \dot{m}\left(u^* + Pv^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_2$$

Sappiamo che $u^* + Pv^* = h^*$

Entalpia specifica

$$\dot{m}\left(h^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_1 + \underbrace{\dot{Q} - \dot{L}_E}_{\text{netti}} = \dot{m}\left(h^* + gz + \frac{1}{2}\bar{w}^2\right)_2 \, [W]$$

Alta h^*, alta P, alta v^*

Basso h^*, basso P, basso v^*

Patrimonio energetico : sistema chiuso : U

sistema aperto : h^*

$$h_1^* + gz_1 + \frac{1}{2}\bar{w}_1^2 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{L}_E}{\dot{m}} = h_2^* + gz_2 + \frac{1}{2}\bar{w}_2^2 \left[\frac{J}{kg}\right]$$

BILANCIO ENTROPICO

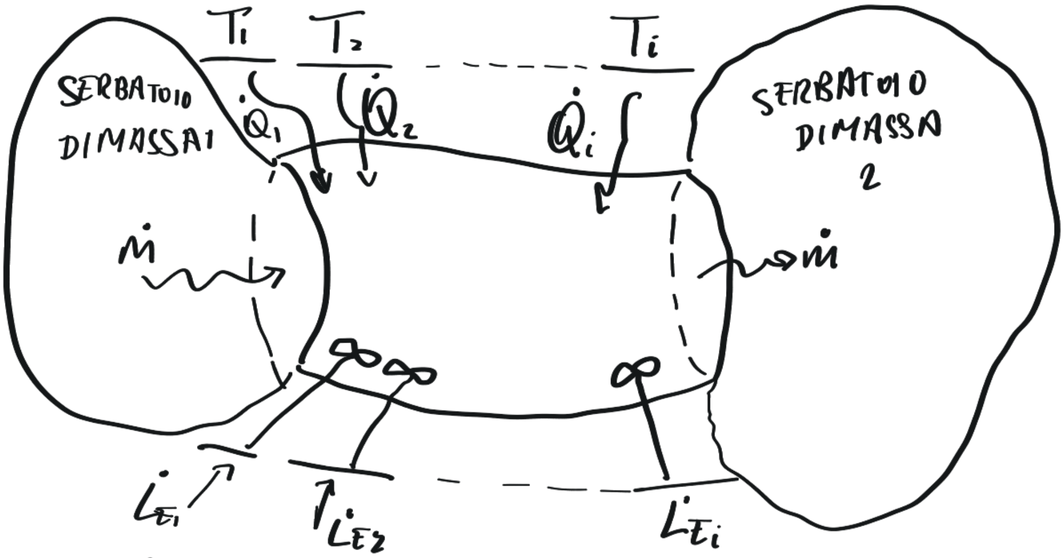
↳ sappiamo farlo solo per sistemi isolati.

$$\Delta S_{TOT} = \sum_i \Delta S_i = S_{IRR} \geq 0$$ SISTEMA COMPOSTO DA i sottosistemi ed isolato

esiste ΔS_{gen} ⇒ ogni sistema reale è irreversibile

Dobbiamo isolare dagli effetti degli scambi di massa, cioè scambi energetici.

Dobbiamo create sottosistemi



Sistema composto da volume di controllo e 2 serbatoi di massa, non entra più massa dall'ambiente solo dai serbatoi.

Aggiungiamo i serbatoi di temperatura isolando il volume di controllo e controllando il calore

Usiamo i serbatoi di lavoro per isolare dall' lavoro esterno, perchè non scambiamo lavoro con l'ambiente

o perchè ideali

$$\Delta \dot S_{TOT} = \Delta \dot S_{SM1,2} + \Delta \dot S_{V.C.} + \sum_{i=1}^{n} \Delta \dot S_{Qi} + \sum_{j=1}^{m} \cancel{\Delta \dot S_{LEj}} = \dot S_{IRR} \geq 0$$

serbatoi di massa 1 e 2

perchè regime stazionario

$$= \underbrace{-\dot m S_1^*}_{\text{serbatoio di massa 1}} + \underbrace{\dot m S_2^*}_{\text{serbatoi di massa 2}} + 0 - \sum_{i=1}^{n} \frac{\dot Q_i}{T_i} = S_{IRR} \geq 0$$

(-) perchè entropia di ogni serbatoi di calore

Se sistema è adiabatico

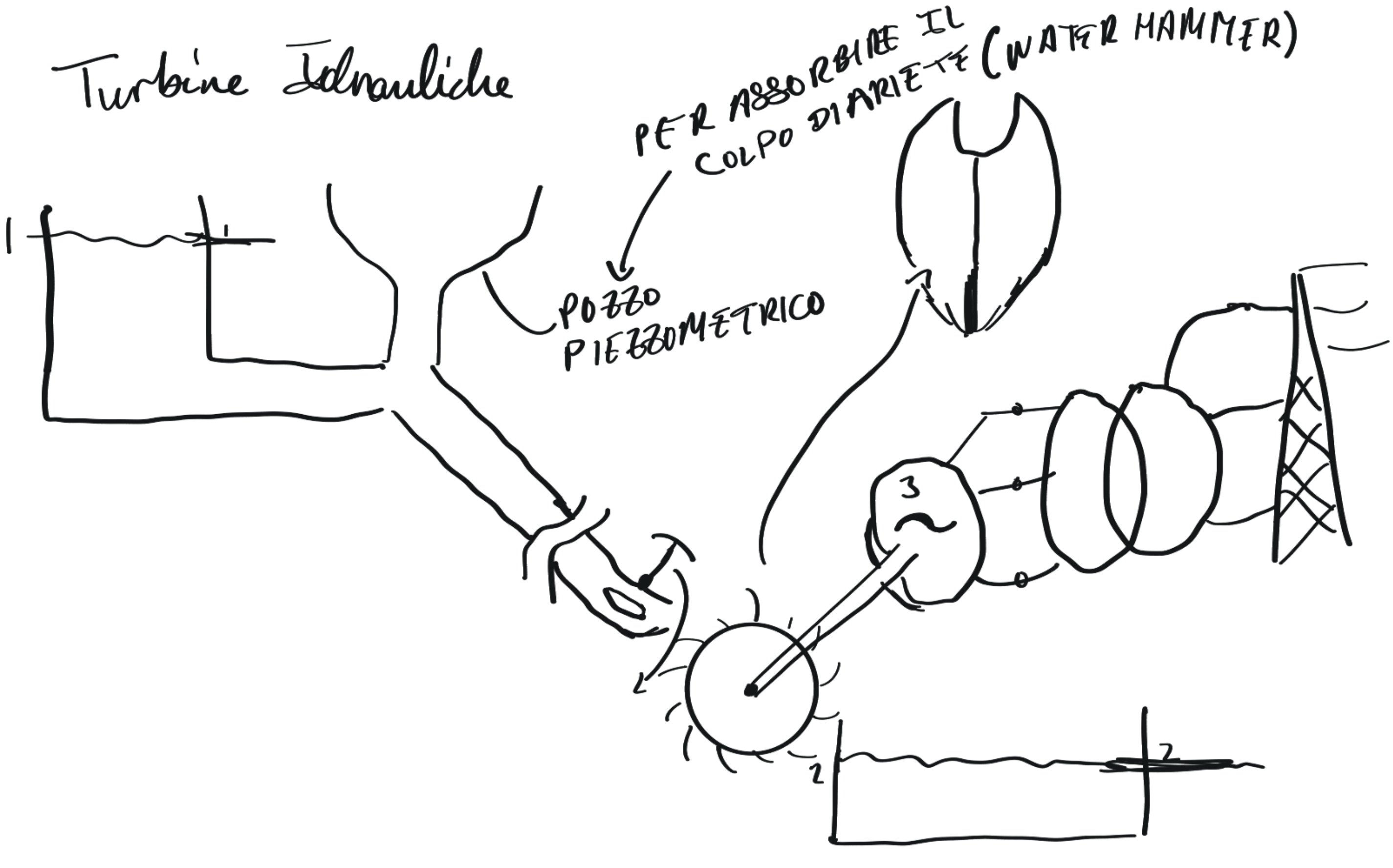
$$\hookrightarrow \dot{Q}_i = 0 \Rightarrow \dot{m}(s_2^* - s_1^*) = \dot{S}_{IRR} \geq 0$$

$$\Rightarrow \boxed{s_2^* \geq s_1^*}$$

Applicazione

MACCHINE IDRAULICHE: TURBINE E POMPE

Turbine Idrauliche



BILANCIO ENERGETICO

$$\cancel{h_1^*} + gz_1 + \frac{1}{2}\bar{w}_1^2 + \frac{\cancel{\dot{Q}}^{\,0}}{\dot{m}} - \frac{\dot{L}_E}{\dot{m}} = \cancel{h_2^*} + g z_2 + \frac{1}{2}\bar{w}_2^2$$

$$dh^* = \cancel{du}^{\,0} + \cancel{Pdv}^{\,\simeq 0} + \cancel{vdP}^{\,\simeq 0} = 0 \rightarrow h_1^* = h_2^*$$

↳ Incomprimibile

$u = u(s, v)$ $\rightarrow \cancel{du}^{\,0} = \ldots \cancel{dv}^{\,0} + \ldots + \cancel{ds}^{\,0}$

$ds = 0$ perché $Q = 0 \Rightarrow S^F = 0$ E FLUIDO IDEALE $S_{IRR} = 0$

$$\dot{L}_T = \dot{m} g (z_1 - z_2)$$

Di nota $L_p = - \dot{m} g (z_1 - z_2)$

pompa

Macchine Termiche $\rightarrow$ Turbine a gas e vapore e compressione

centrali termoelettriche

aeronautici a reazione

aeronautica a reazione

GAS $\rightarrow$ ARIA Standard $\boxed{c_p^* \simeq 1 \frac{kJ}{kg}}$ $\Delta T = 10°C$

$$\rightarrow \boxed{\Delta h^* = c_p^* \Delta T} = 1 \cdot 10 = 10 \frac{kJ}{kg} = 10000 \frac{J}{kg}$$

$$\Delta e_p^* = g \Delta z = \Delta h^* = 10000 \frac{J}{kg} \rightarrow \Delta z ? \rightarrow \Delta z = \frac{\overset{10000 \frac{J}{kg}}{\Delta e_p^* (= \Delta h^*)}}{g_{=10 \frac{m}{s^2}}}$$

$= 1000 \text{ m}$

Per avere una differenza di energia uguale al entalpia, di 10°C, serve 1000 m

$\boxed{\text{Per questa ragione } \Delta e_p^* \text{ sarà sempre trascurabile rispetto a } \Delta h^*}$

In macchine termiche

$$\Delta e_c^* = \frac{1}{2}\bar{w}_2^2 - \frac{1}{2}\bar{w}_1^2 = \Delta h^* = 10000 \frac{J}{kg} \rightarrow \Delta w ?$$

Poniamo $w_1 \simeq 0 \frac{m}{s}$ $\quad w_2 = \sqrt{2 \cdot 10000} \approx 140 \frac{m}{s}$

$= 500 \frac{km}{h}$

Anche Δe_c^* può esser trascurata all'entalpia

Bilancio Energetico con trascurazioni

$$\dot{m} h_1^* + \dot{Q} - \dot{L}_E = \dot{m} h_2^*$$

se dispositivo è adiabatico $\quad \dot{m} h_1^* - \dot{L}_E = \dot{m} h_2^*$

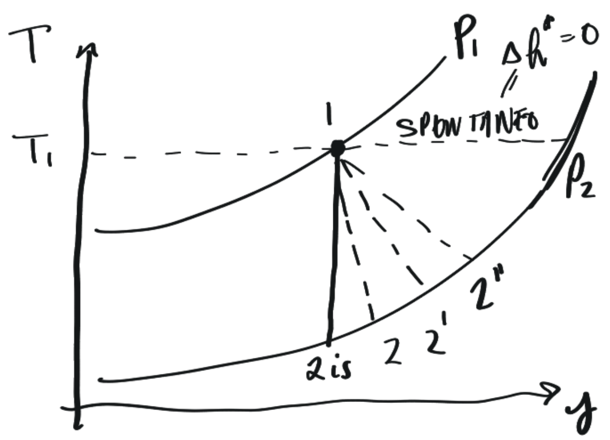
$$\boxed{\dot{L} = \dot{m}(h_1^* - h_2^*)}$$

Bilancio Entropico $\quad \boxed{s_2^* \geq s_1^*}$

Turbine a gas o a vapore, conosco

T_1 e P_1

conosco anche P_2



Sappiamo che:

$$\dot{L}_T = \underbrace{\dot{m}(h_1^* - h_2^*)}$$

Molto importante, deve esser massimizzato per massimizzare $\dot{L}_T$

2is → stato 2 isoentropico → punto di max L_T

2, 2', 2'' trasformazioni reali, vogliamo vadino il più vicino possibile a 2is

Studiare h_2^* sulla isobara P_2 al variare della temperatura.

$$\left(\frac{\partial h^*}{\partial s^*}\right)_{P=P_2} > 0 \qquad dh^* = T ds^* + v^* dP$$

$$\left(\frac{\partial h^*}{\partial s^*}\right)_P = T \cancel{\left(\frac{\partial s^*}{\partial s^*}\right)_P}^{1} + v^* \cancel{\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_P}^{0} = T > 0$$

perché

$\Rightarrow$ h_2^* aumenta all'aumentare di s^*

$\hookrightarrow \dot{L}_T = \dot{m}(h_1^* - h_2^*)$ Diminuisce

<u>Rendimento isoentropico</u>

$$\eta_{is} = \frac{\dot{L}_T}{\dot{L}_{Tis}} = \frac{\dot{m}(h_1^* - h_2^*)}{\dot{m}(h_1^* - h_{2is}^*)} \leq 1$$

reali

isoentropiche

per le turbine a gas → non vapore → bisognano le tabelle

se gas ideale

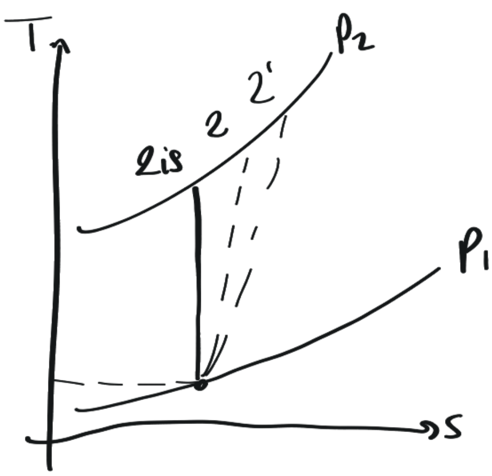
$$\boxed{\Delta h^* = c_p^* \Delta T}$$

$$\eta_{is} = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_{2is})}$$

$\Delta H = m c_p^* \Delta T$

$\hookrightarrow \Delta h^* = c_p^* \Delta T$

COMPRESSORI CONOSCIAMO T_1, P_1, P_2



$$\dot{L}_c = \dot{m}\left(h_1^* - h_2^*\right) < 0$$

$$s_2^* \geq s_1^*$$

h_2^* continua ad aumentare per l'aumento di s^*, quindi serve sempre più lavoro

$$\left(\frac{\partial h^*}{\partial s}\right)_p = T > 0$$ ALL'AUMENTARE DI S_2^* (IRREVERSIBILITÀ) h_2^* AUMENTA

$$|\dot{L}_c| = |-\dot{m}(h_1^* - h_2^*)| \text{ aumenta}$$

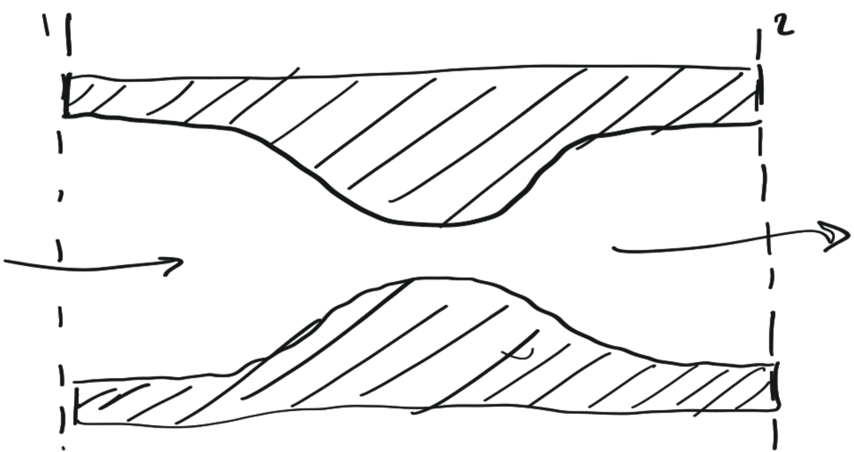
più irreversibile più aumenta T

lavoro minimo

$$\eta_{is} = \frac{\dot{L}_{c_{is}}}{\dot{L}_c} = \frac{\cancel{\dot{m}}(h_1^* - h_{2is}^*)}{\dot{m}(h_1^* - h_2^*)} \leq 1$$

lavoro → compressione reale

Laminazione Isoentalpica



1 | Adiabatico | 2

$$h_1^* + \cancel{\frac{1}{2}\bar{w}_1^2} + \cancel{g z_1} + \cancel{\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}} - \cancel{\frac{\dot{L}}{\dot{m}}} = h_2^* + \cancel{g z_2} + \cancel{\frac{1}{2}\bar{w}_2^2}$$

$z_1 \simeq z_2$ $\quad \bar{w}_1 \simeq \bar{w}_2$

Tra 1 e 2 non sitanno stati di equilibrio, quindi con 1 e 2 abbastanza lontani dall'restingimento possiamo prendere stati di equilibrio e fare il bilancio

$h_1^* = h_2^*$ $\qquad \boxed{s_2^* \geq s_1^*}$

$dh^* = T ds^* + v^* dP \qquad \Delta h^*_{1-2} = \int_1^2 T ds^* + \int_1^2 v^* dP = 0$

$$\int_1^2 \underbrace{T}_{>0}\underbrace{ds^*}_{>0 \text{ perche } s_2^* > s_1^*} = -\int_1^2 \underbrace{v^*}_{>0} dP \Rightarrow \boxed{dP < 0}$$

Passando per il laminatore, la pressione e temperature diminiscono

$\boxed{P_2 < P_1}$

$\delta = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h > 0 \rightarrow \Rightarrow dT < 0$

DIMINUZIONE DI TEMPERATURA