NUMERO: 1949A - ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Zago Carlotta

MATERIA: Fondamenti di macchine - Esercitazioni+temi di esame - prof. Poggio

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | Ing. A. Poggio

ESERCITAZIONE | Richiami di termodinamica

1. Una portata di aria (c_p = 1004,5 J/kgK, k = 1,4) di 2 kg/s, prelevata dall'ambiente a 15°C, viene compressa e successivamente raffreddata fino a 27°C attraverso uno scambio termico a superficie con acqua (c_p = 4186 J/kgK). Sapendo che il lavoro massico effettuato dal compressore è pari a 65 kJ/kg, determinare:
   - la temperatura di uscita dal compressore;
   - il calore massico sottratto nello scambiatore;
   - la portata di acqua necessaria per effettuare il raffreddamento richiesto, ipotizzando per quest'ultima un incremento di temperatura di 10°C

2. Una turbopompa deve sollevare acqua da un pozzo fino ad un serbatoio aperto posto 20 m sopra il pelo libero dell'acqua del pozzo. Il circuito idraulico in cui é inserita la pompa è costituito da condotti con diametro costante pari a 10 cm. L'acqua effluisce all'atmosfera con una velocità di 2 m/s. Calcolare la potenza del motore (rendimento meccanico η_m = 0.97) che aziona la pompa nei due casi seguenti:
   a) nel caso di resistenze passive nulle nella pompa e nei condotti;
   b) nel caso di resistenze passive complessive circuito-pompa pari al 15% del lavoro massico compiuto nella pompa

3. In un impianto di riscaldamento, un ventilatore (V) aspira una $\underbrace{\text{portata pari a 1,5 } m^3/s}_{\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}}$ di aria (c_p = 1004,5 J/kgK, k = 1,4) dall'ambiente esterno (E) che si trova alle condizioni di 1 bar e 5°C. Tale portata è inviata in una tubazione in cui è inserito un riscaldatore (R). L'aria effluisce nell'ambiente interno (A) con una pressione pari a quella dell'ambiente esterno e con una velocità trascurabile. Sapendo che il ventilatore è azionato da un motore (M) che eroga una potenza di 3,7 kW (rendimento meccanico η_m = 0.97), valutare la $\underbrace{\text{potenza termica}}_{\dot{Q} = \dot{m} Q_e}$ richiesta al riscaldatore affinché la temperatura di immissione dell'aria sia pari a 35°C.

4. Un turbocompressore aspira aria (c_p = 1004,5 J/kgK, k = 1,4) a 1 bar e 17 °C e la comprime fino a 2 bar. Ammettendo trascurabile la variazione di energia cinetica tra entrata e uscita della macchina, calcolare il lavoro interno massico (L_i), il calore massico scambiato (Q_e) e il lavoro delle resistenze passive (L_w) per ciascuna delle seguenti condizioni di evoluzione della compressione:
   a) isentropica (adiabatica reversibile); $m = k$
   b) adiabatica con attriti (esponente della politropica: m = 1,55); $\int_1^2 v\,dp = \frac{m}{m-1} R (T_2 - T_1)$
   c) refrigerazione senza attriti (esponente della politropica: m = 1,28);
   d) raffreddamento isotermo senza attriti;
   e) raffreddamento isotermo con attriti (L_w = 15,9 kJ/kg).

   Nel confronto tra i casi a) e b) mettere in evidenza il fenomeno del "controrecupero termico".

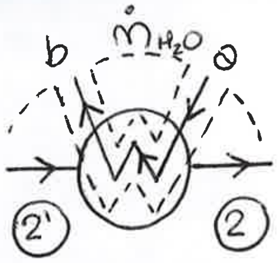
5. Determinare la temperatura media dei gas scaricati da un motore alternativo, note le condizioni di pressione e temperatura all'interno della camera di combustione al termine della fase di corsa/espansione (indicate come punto 4), 400 kPa e 1500 K. Supporre trascurabili lo spazio morto, gli scambi termici con le pareti e l'ambiente esterno; considerare inoltre che la pressione all'interno del cilindro si mantenga costante e pari a 110 kPa per tutta la durata della fase di esplusione, ipotizzando per semplicità che l'apertura e la chiusura della valvola di scarico avvengano istantaneamente in corrispondenza dei punti morti e che i gas combusti si comportino come un gas perfetto ideale (k = 1,4).

EVOLUZIONI POLITROPICHE
$$\begin{cases} p v^m = cost \\ T p^{\frac{1-m}{m}} = cost \\ T v^{m-1} = cost \end{cases}$$

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italia
tel: +39 011.090.4485 fax: +39 011.090.4499
alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 118

$$Q_{e,\bar{5}} \; c_p \Delta T = c_p (T_2 - T_2') = 1004,5\,(27 - 79,7) \cong -53000 \; \frac{J}{kg}$$



$$_1|^2\; Q_e + L_i = \Delta i + \underbrace{\Delta E_{c,g,cf}}_{=0} \Rightarrow Q_e + L_i = \Delta i$$

$$Q_{e,\bar{5}} = \Delta i - L_i = c_p (T_2 - T_1) - L_i = 1004,5\,(27 - 15) - 65000 =$$

oppure

$$\cong -53000 \quad \frac{J}{kg}$$

$$_2|^2\; Q_e + \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \underbrace{\Delta E_{g,c,cf}}_{=0} \Rightarrow Q_e = \Delta i$$

flusso di calore

$$\dot{Q} = \dot{m}_{aria}\, Q_{e,aria} = \dot{m}_{H_2O}\, Q_{e,H_2O}$$

$$Q_{e,H_2O} + \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \underbrace{\Delta E_{c,g,cf}}_{=0} \Rightarrow Q_{e,H_2O} = \Delta i$$

$$Q_{e,H_2O} = c_{p\,H_2O}\, \Delta T$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{aria}\, Q_{e,aria}}{Q_{e,H_2O}} = \frac{\dot{m}_{aria}\, Q_{e,aria}}{c_{p\,H_2O}\, \Delta T} = \frac{2 \cdot 53000}{4186 \cdot 10} = 2,53 \; \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m} = \rho A_b C_b = 1000 \left(\frac{\pi \cdot 0{,}1^2}{4} \right) 2 = 15{,}7 \quad \frac{kg}{s}$$

$$P_{ass} = \frac{\dot{m} L_i}{\eta_m} = \frac{15{,}7 \cdot 198{,}2}{0{,}97} = 3207{,}98 \quad W$$

b) $L_W = 0{,}15 \cdot L_i$

$$L_i = 0{,}15\ L_i + gh + \frac{C_b^2}{2} \Rightarrow L_i = \frac{gh + \frac{C_b^2}{2}}{0{,}85} = 233{,}2 \ \frac{J}{kg}$$

$$P_{ass} = \frac{\dot{m} L_i}{\eta_m} = \frac{15{,}7 \cdot 233{,}2}{0{,}97} = 3774{,}5 \quad W$$

3 $\dot{V}_0 = 1{,}5 \ \frac{m^3}{s}$

$C_p = 1004{,}5 \ \frac{J}{kgK}$

$\dot{Q}_R = ?$

$k = 1{,}4$

$P_E = 1$ bar

$T_E = 5°C$

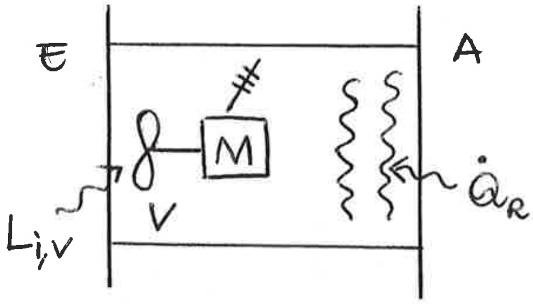
$P_A = P_E = 1$ bar

$C_A \cong 0$

$P_{ass} = 3{,}7$ kW

$\eta_m = 0{,}97$

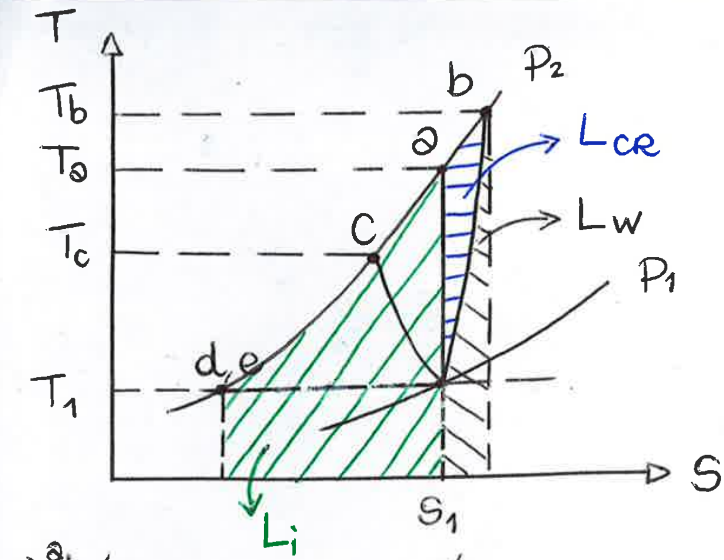
$T_A = 35°$ C

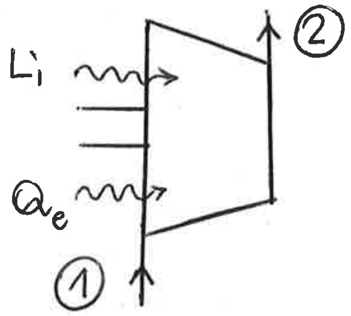


$$_E^A|Q_e + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E}_{g,c,cf}}_{=0} \Rightarrow {}_E^A|Q_e + L_i = \Delta i$$

$$_E^A|\underset{Q_R}{\underset{\parallel}{Q_e}} + \underset{L_{i,v}}{\underset{\parallel}{L_i}} = C_p (T_A - T_E) = 1004{,}5\ (35 - 5) = 30135$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 118





a) $\int_1^a \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta e_{g,c,cf}}}_{=0} \Rightarrow L_i = \Delta i = c_p(T_a - T_1)$

$$\begin{cases} m = k = 1{,}4 \\ T p^{\frac{1-m}{m}} = cost \end{cases}$$

$$T_1 P_1^{\frac{1-k}{k}} = T_a P_2^{\frac{1-k}{k}} \Rightarrow T_a = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-k}{k}} = (17+273)\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{-0{,}4}{1{,}4}} =$$

$$= 353{,}5 \ K = 80{,}5 \ °C$$

$L_i = 1004{,}5\,(80{,}5 - 17) = 63{,}8 \ \frac{kJ}{kg}$

$Q_e = 0$ poiché adiabatico

$L_W = 0$ poiché reversibile

b) $\int_1^b \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta e_{g,c,cf}}}_{=0} \Rightarrow L_i = \Delta i = c_p(T_b - T_1)$

$$\begin{cases} m = 1{,}55 \\ T p^{\frac{1-m}{m}} = cost \end{cases}$$

$$T_1 P_1^{\frac{1-m}{m}} = T_b P_2^{\frac{1-m}{m}} \Rightarrow T_b = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-m}{m}} = (17+273)\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{-0{,}55}{1{,}55}} =$$

$$= 370{,}86 \ K = 97{,}9 \ °C$$

e) $_1^e|\, Q_e + L_i = \underbrace{\Delta i}_{=0} + \underbrace{\Delta E_{g,c,cf}}_{=0} \Rightarrow Q_e = -L_i$

$$L_i = \int v\,dp + L_w + \underbrace{\Delta E_{g,c,cf}}_{=0} \Rightarrow L_i = \int v\,dp + L_w$$

$$L_i = RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1} + L_w = 287 \cdot (17+273) \ln 2 + 15\,900 =$$

$$= 73,6 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_e = -73,6 \ \frac{kJ}{kg}$$

confronto tra a) e b)

$$L_{i,a} = 63,8 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$L_{i,b} = 81,3 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$L_i - L_{i,is} = L_w$$

$$\underbrace{L_{i,b} - L_{i,a} = 81,3 - 63,8 = 17,5}_{\text{perdite reali}} \ \frac{kJ}{kg} \ \neq \ \underbrace{L_{w,b} = 15,9}_{\text{perdite ideali}} \ \frac{kJ}{kg}$$

perdite reali > perdite ideali

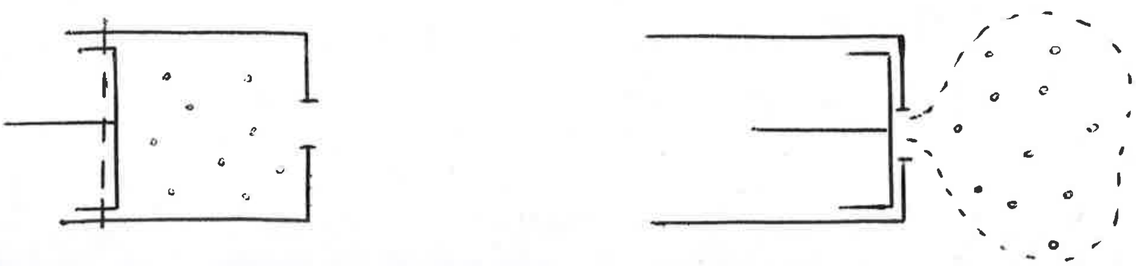
↳ tengo conto del lavoro di contro recupero!

$$L_i - L_{i,is} = L_w + L_{CR}$$

(5) $P_4 = 400$ kPa, $T_4 = 1500$ K } camera combustione

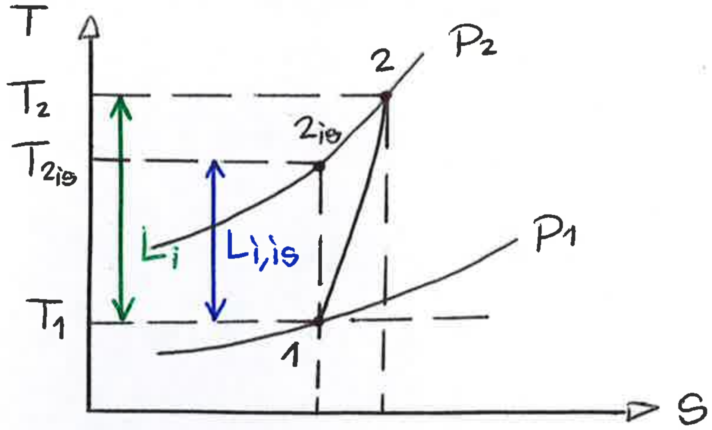
$P_c = 110$ kPa cilindro $\qquad P_{ext} = 120$ kPa

gas perfetto ideale: $k = 1,4$



RICHIAMI di TERMODINAMICA - cap 1

LAVORO di CONTRORECUPERO - compressione



TRASFORMAZIONE
- ▷ IDEALE ⇒ $L_W = 0$, $\Delta S = 0$, $Q_e = 0$ isentropico $1-2_{is}$
- ▷ REALE ⇒ $L_W > 0$, $\Delta S > 0$, $Q_e = 0$ adiabatico irreversibile $1-2$

$$\begin{cases} \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} \\ L_i = \int v\,dp + L_W + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_i = \Delta i \\ L_i = \int v\,dp + L_W \end{cases}$$

→ caso ideale isentropico

$L_{i,is} = \Delta i_{is} = c_p(T_{2,is} - T_1)$ rappresentato da un segmento

$L_W = 0$

→ caso reale, adiabatico irreversibile

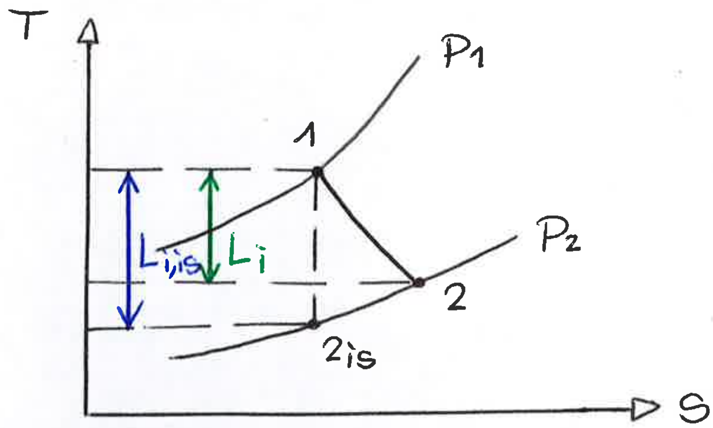
$L_i = \Delta i = c_p(T_2 - T_1)$ rappresentato da un segmento

$L_W = L_i - \int v\,dp$

$$\begin{cases} {}_6^{2is}|Q_e + \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} = c_p(T_{2is} - T_6) = c_p(T_{2is} - T_1) \\ {}_6^{2is}|Q_e + \underbrace{\cancel{L_W}}_{=0} = \int_6^{2is} T\,dS = \text{area}(2_{is}\,4\,5\,6) \end{cases}$$

$$\Rightarrow {}_6^{2is}|Q_e = L_{i,is} = c_p(T_{2is} - T_1) = \text{area}\ (2_{is}\,4\,5\,6)$$

LAVORO di RECUPERO - espansione



TRASFORMAZIONE
- ▷ IDEALE ⇒ $L_W = 0$, $\Delta S = 0$, $Q_e = 0$ isentropico $1-2_{is}$
- ▷ REALE ⇒ $L_W > 0$, $\Delta S > 0$, $Q_e = 0$ adiabatico irreversibile $1-2$

$$\begin{cases} \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} - L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} \\ -L_i = \int v\,dp + L_W + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_i = -\Delta i \\ L_i + L_W = -\int_1^2 v\,dp \end{cases}$$

→ caso ideale, isentropico

$$L_{i,is} = -\Delta i_{is} = c_p (T_1 - T_{2is}) = c_p T_1 \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-k}{k}}\right)$$

$$L_W = 0$$

→ caso reale, adiabatico irreversibile

$$L_i = -\Delta i = c_p (T_1 - T_2) = c_p T_1 \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-m}{m}}\right)$$

$$L_W + L_i = \frac{m}{m-1} R T_1 \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-m}{m}}\right)$$

GAS $\to$ monoatomico $1{,}667 = k$
$\to$ biatomico $1{,}4 = k$

POLITECNICO
DI TORINO

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | ing. A. Poggio

ESERCITAZIONE | Moto dei fluidi nei condotti

1. Un ugello semplicemente convergente, del quale sono note le condizioni di monte (5 bar, 150 °C e velocità trascurabile) e la pressione di valle (2 bar), lascia passare una portata di 3 kg/s di aria (R = 287 J/kgK, k = 1,4). Considerando che nell'ugello si svolga un'espansione isentropica, calcolare la velocità e la temperatura nella sezione di sbocco; calcolare inoltre la nuova portata dell'ugello si trovi ad operare con differenti condizioni di monte pari a 10 bar e 300°C, e con una pressione di valle di 4 bar.

2. In un ugello semplicemente convergente, si espande elio (massa atomica μ = 4 kg/kmol, k = 1.667) che si trova a 8 bar e 25°C con una velocità di ingresso di 120 m/s. Sono noti la pressione nell'ambiente di valle, pari a 2 bar, e il diametro dell'ugello nella sezione circolare di sbocco, pari a 4 cm. Calcolare la velocità e la portata in uscita nell'ipotesi di espansione isentropica all'interno dell'ugello. Calcolare inoltre la pressione di laminazione necessaria per ridurre la portata del 30% rispetto alle condizioni iniziali, a parità di condizioni a monte e a valle dell'ugello.

3. Un ugello convergente-divergente opera in condizioni di progetto espandendo isentropicamente aria (R = 287 J/kgK, k = 1,4). Nella sezione ristretta, di area A_r = 100 cm², si ha una velocità pari a 400 m/s e una pressione di 1 bar. La pressione allo sbocco è pari a 0.1 bar. Calcolare la portata, la velocità dell'aria e l'area della sezione di sbocco; determinare inoltre la pressione e la velocità nella sezione di sbocco qualora l'ugello lavori in condizioni limite.

4. In un ugello convergente-divergente del distributore di una turbina a vapore si fanno espandere 3.5 kg/s di vapore d'acqua da 30 bar e 500°C (con velocità in ingresso trascurabile) fino a 10 bar. Ammettendo isentropica l'espansione, calcolare la sezione finale del condotto e valutare l'area della sezione ristretta.

$\mu = 32 \frac{kg}{kmol}$ $k = 1{,}4$

5. Un ugello isentropico smaltisce una portata di 10 kg/s di ossigeno ($\mathcal{R}$ = 8314 J/kmolK), a partire dalle condizioni di ingresso 10 bar e 300°C (con velocità trascurabile) fino alla pressione di uscita di 1 bar. Sapendo che in tali condizioni l'ugello è adattato, determinarne la geometria e calcolare la temperatura e la velocità di efflusso.

$\mu = 28 \frac{kg}{kmol}$ $k = 1{,}4$

6. Ad un ugello adiabatico con resistenze passive perviene azoto a 7 bar e 500°C con velocità di ingresso pari a 100 m/s. Sapendo che la sezione di sbocco é pari a 2 cm² e che le condizioni di adattamento si verificano per una pressione di sbocco di 2 bar e 300°C, trovare la portata, la velocità di sbocco e il valore di L_w.

vedi portate pag 2.6 e 2.9

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$c_u = c_s = \sqrt{kRT_u}$$ ← sbocco/sez. ristretta

$$\frac{T_u}{T_1^o} = \frac{2}{k+1}$$

$$\frac{T_u}{T_1^o} = \left(\frac{p_{u,cr}}{p_1^o}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow \frac{p_{u,cr}}{p_1^o} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$R = \frac{\mathcal{R}}{\mu} \quad \text{con} \quad \mathcal{R} = 8314 \frac{J}{kmol\,K}$$

$$c_p = R\frac{k}{k-1}$$

$$c_u = \sqrt{2c_p(T_1^o - T_u)} \quad \text{gas}$$

$$c_u = \sqrt{2(i_1^o - i_2)}$$

$$T_1^o = T_1 + \frac{c_1^2}{2c_p}$$

$$p_1^o = p_1\left(\frac{T_1^o}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$p_1 v_1^k = p v^k \Rightarrow k = \frac{\ln\frac{p_1}{p}}{\ln\frac{\rho_1}{\rho}}$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-m}{m}} = T p^{\frac{1-m}{m}} \Rightarrow \frac{1-m}{m} = \frac{\ln T_1/T}{\ln P/P_1}$$

$$\rho_0 = \rho\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italia
tel: +39 011.090.4485 fax: +39 011.090.4499
alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

ESERCITAZIONE 2 - Moto dei fluidi nei condotti

① ugello semplicemente convergente

$P_1^\circ = 5$ bar

$T_1^\circ = 150\,°C$

$c_1 \cong 0$

$P_2 = 2$ bar

$\dot{m} = 3\ \frac{kg}{s}$

$R = 287\ \frac{J}{kg K}$

$k = 1{,}4$

espansione isentropica

$c_u = ?$

$T_u = ?$

$\dot{m}'$ \ $P_1'^\circ = 10$ bar, $T_1'^\circ = 300\,°C$, $P_2' = 4$ bar

$$\beta = \frac{P_{u,cr}}{P_1^\circ} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0{,}528$$

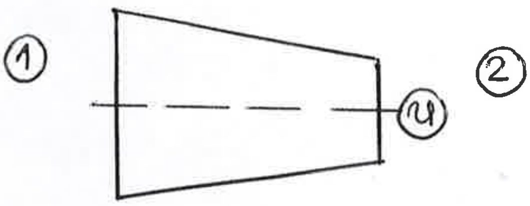
$1{,}66 < k < 1{,}135$

$0{,}487 < \beta < 0{,}58$

$$\frac{P_2}{P_1^\circ} = \frac{2}{5} = 0{,}4 < \beta$$

ugello è critico!

$P_2 \cong \frac{1}{2} P_1 \Rightarrow \beta \cong 0{,}5$



$$\begin{cases} P_u = P_{u,cr} \neq P_2 \\ T_2 = T_{2,cr} \\ \dot{m} = \dot{m}_{cr} \\ C_u = C_{u,cr} = C_s \end{cases}$$

$$T_{u,cr} = T_1^\circ \frac{2}{k+1} = (150+273)\frac{2}{1{,}4+1} = 352{,}5\ K = 79{,}5\,°C$$

$$C_u = C_{u,cr} = C_s = \sqrt{kRT_{u,cr}} = 376{,}3\ \frac{m}{s}$$

$$\frac{P_2'}{P_1'^\circ} = \frac{4}{10} = 0{,}4$$

sempre in condizioni critiche

$$\dot{m}_{cr} = A_u \frac{P_1^\circ}{\sqrt{P_1^\circ v_1^\circ}} \sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 118

$$T_{u,cr} = T_1^\circ \frac{2}{k+1} = 299,4 \frac{2}{1,667+1} = 224,5 \ K$$

$$c_{u,cr} = \sqrt{kRT_{u,cr}} = \sqrt{1,667 \cdot 2078,5 \cdot 224,5} = 882 \ \frac{m}{s}$$

$$p_{u,cr} = p_1^\circ \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 8,1 \cdot \left(\frac{2}{1,667+1}\right)^{\frac{1,667}{0,667}} = 3,945 \ bar$$

$$\dot{m} = \rho_u A_u c_u = A_u \frac{p_1^\circ}{\sqrt{RT_1^\circ}} \sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$pv = RT \Rightarrow \frac{p}{\rho} = RT \Rightarrow \rho_u = \frac{p_u}{RT_{u,cr}} = \frac{3,945 \cdot 10^5}{2078,5 \cdot 224,5} = 0,84 \ \frac{kg}{m^3}$$

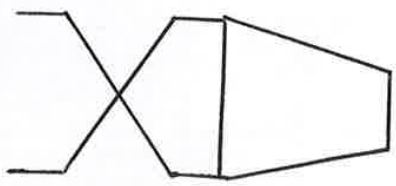
$$A_u = \frac{\pi \, 0,04^2}{4} = 1,256 \cdot 10^{-3} \ m^2$$

$$\dot{m}_u = 0,84 \cdot 1,256 \cdot 10^{-3} \cdot 882 = 0,93 \ \frac{kg}{s}$$

con laminazione resto in condizioni critiche perché le condizioni a monte e a valle non variano

$$\frac{\dot{m}'_u}{\dot{m}_u} = \frac{\cancel{A_u} \ p_1^{\circ\prime} / \cancel{\sqrt{RT_1^{\circ\prime}}}}{\cancel{A_u} \ p_1^\circ / \cancel{\sqrt{RT_1^\circ}}} \frac{\cancel{\sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}}{\cancel{\sqrt{k\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}} = \frac{p_1^{\circ\prime}}{p_1^\circ}$$

$$p_1^{\circ\prime} = p_1^\circ \frac{\dot{m}'_u}{\dot{m}_u} = 8,1 \frac{0,7 \cancel{\dot{m}_u}}{\cancel{\dot{m}_u}} = 8,1 \cdot 0,7 = 5,67 \ bar$$



$$\rho_1^\circ = \frac{1}{v_1^\circ} = \frac{P_1^\circ}{RT_1^\circ} = \frac{1{,}89 \cdot 10^5}{287 \cdot 477{,}84} = 1{,}38 \quad \frac{kg}{m^3}$$

condizioni a valle

$$\rho_u = \rho_1^\circ \left(\frac{P_u}{P_1^\circ}\right)^{\frac{1}{k}} = 1{,}38 \left(\frac{0{,}1}{1{,}89}\right)^{\frac{1}{1{,}4}} = 0{,}169 \quad \frac{kg}{m^3}$$

$$T_u = T_{cr} \left(\frac{P_u}{P_{cr}}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 206{,}5 \quad K$$

$$\rho_u = \frac{P_u}{RT_u} = \frac{0{,}1 \cdot 10^5}{287 \cdot 206{,}5} = 0{,}169 \quad \frac{kg}{m^3}$$

$$T^\circ = \text{cost} \Rightarrow T_r + \frac{C_r^2}{2C_p} = T_u + \frac{C_u^2}{2C_p}$$

$$C_u = \sqrt{2C_pT_r + C_r^2 - 2C_pT_u} = \sqrt{2C_p(T_r - T_u) + C_r^2} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 1004{,}5 (398{,}2 - 206{,}5) + 400^2} = 738{,}3 \quad \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho_u A_u C_u \Rightarrow A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u C_u} = \frac{3{,}5}{0{,}169 \cdot 738{,}3} = 0{,}028 \quad m^2$$

$$\left(\frac{\cancel{\dot{m}} A_r}{\cancel{\dot{m}}_{cr} A_u}\right)^2 + \left(\frac{P_u - P_{cr}}{P_1^\circ - P_{cr}}\right)^2 = 1 \qquad \text{con } \dot{m} = \dot{m}_{cr}$$

$$\left(\frac{100 \cdot \cancel{10^{-4}}}{280 \cdot \cancel{10^{-4}}}\right)^2 + \left(\frac{(P_u - 1) \cdot \cancel{10^5}}{(1{,}89 - 1) \cdot \cancel{10^5}}\right)^2 = 1$$

$$(P_u - 1)^2 = 0{,}691 \Rightarrow P_u^2 + 1 - 2P_u = 0{,}691$$

$$P_u^2 - 2P_u + 0{,}309 = 0$$

$$P_{u_{1,2}} = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 1{,}2357}}{2} = \begin{cases} P_{u_1} = 1{,}83 \text{ bar} = P_{u,lim} \\ P_{u_2} = 0{,}168 \text{ bar} \end{cases}$$

$$\dot{m} = \rho_u A_u C_u \Rightarrow A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u C_u} = \frac{3,5}{3,85 \cdot 825} = 1,1 \cdot 10^{-3} \quad m^2$$

$$p_1 v_1^k = p_u v_u^k \Rightarrow \frac{p_u}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_u}\right)^k \Rightarrow \ln \frac{p_u}{p_1} = \ln\left(\frac{v_1}{v_u}\right)^k$$

$$k = \frac{\ln \frac{p_u}{p_1}}{\ln \frac{v_1}{v_u}} = \frac{\ln \frac{10}{30}}{\ln \frac{0,112}{0,26}} = 1,304$$

non corretto, viene 0,545

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{1,304+1}\right)^{\frac{1,304}{0,304}} = 0,585$$

$$\frac{P_{cr}}{P_1^\circ} = \beta \Rightarrow P_{cr} = \beta P_1^\circ = 0,585 \cdot 30 \cdot 10^5 = 17,55 \quad bar$$

$$\frac{P_2}{P_1^\circ} = \frac{10}{30} = 0,333 < \beta$$

condizioni di adattamento

$$P_r = P_{cr} \Rightarrow \begin{cases} i_r = 3280 & \frac{kJ}{kg} \\ v_r = 0,178 & \frac{m^3}{kg} \\ \rho_r = 5,618 & \frac{kg}{m^3} \end{cases}$$

$$(i_r - i_1) + \frac{c_r^2}{2} - \underbrace{\cancel{\frac{c_1^2}{2}}}_{=0} = 0$$

$$c_r = \sqrt{2(i_1 - i_r)} = \sqrt{2(3460 - 3280) \cdot 10^3} = 600 \quad \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho_r A_r C_r \Rightarrow A_r = \frac{\dot{m}}{\rho_r C_r} = \frac{3,5}{5,618 \cdot 600} = 1,04 \cdot 10^{-3} \quad m^2$$

$$C_r = C_{cr} = \sqrt{kRT_r} = \sqrt{1{,}4 \cdot 259{,}8 \cdot 478} = 417 \quad \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho_r A_r C_r \Rightarrow A_r = \frac{\dot{m}}{\rho_r C_r} = 5{,}62 \cdot 10^{-3} \quad m^2$$

$$\frac{T_u}{T_1^\circ} = \left(\frac{P_u}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_u = T_1^\circ \left(\frac{P_u}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = (300+273)\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} =$$

$$= 296{,}8 \quad K$$

$$\rho_u = \frac{P_u}{RT_u} = \frac{1 \cdot 10^5}{259{,}8 \cdot 296{,}8} = 1{,}297 \quad \frac{kg}{m^3}$$

$$C_u = \sqrt{2c_p(T_1^\circ - T_u)} = \sqrt{2 \cdot 909{,}3\,(573 - 296{,}8)} = 708{,}9 \quad \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho_u A_u C_u \Rightarrow A_u = \frac{\dot{m}}{\rho_u C_u} = 0{,}01 \quad m^2$$

posso anche trovarlo con la formula $\dot{m} = A_u \frac{P_1^\circ}{\sqrt{P_1^\circ v_1^\circ}} f\left(k, \frac{P_u}{P_1^\circ}\right)$ ma molto più lungo!

6 ugello adiabatico

$P_1 = 7$ bar

$T_1 = 500\,°C$

$C_1 = 100$ m/s

$A_u = 2$ cm^2

$P_u = 2$ bar

$T_u = 300\,°C$

N_2

$\dot{m} = ?$

$C_u = ?$

$L_w = ?$

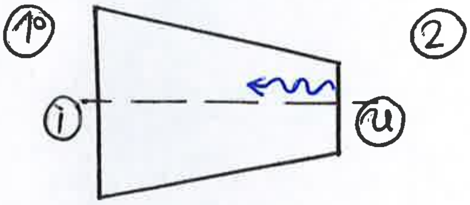
$$\begin{cases} R = \dfrac{\mathcal{R}}{\mu} = \dfrac{8314}{28} = 296{,}93 \quad \dfrac{J}{kg\,K} \\ k = 1{,}4 \\ c_p = R\dfrac{k}{k-1} = 1039{,}25 \quad \dfrac{J}{kg\,K} \end{cases}$$

$$\rho_u = \frac{P_u}{RT_u} = \frac{2 \cdot 10^5}{296{,}93 \cdot (300+273)} = 1{,}175 \quad \frac{kg}{m^3}$$

FLUSSO di AREIFORMI nei CONDOTTI - cap 2

UGELLO SEMPLICEMENTE CONVERGENTE

È un effusore subsonico, condotto in cui l'effetto utile è costituito da un aumento della velocità in uscita rispetto a quella in ingresso grazie alla riduzione di pressione fra monte e valle del sistema.



impongo arresto isentropico in ⓘ e assumo ⓤ = ②, vario progressivamente p_2 a partire da un valore pari a p_1° fino ad un valore nullo

$p_2 = p_1^\circ \Rightarrow \dot{m} = 0$ non ho portata

$p_2 < p_1^\circ \Rightarrow \dot{m} \uparrow$ il fluido si espande nel condotto

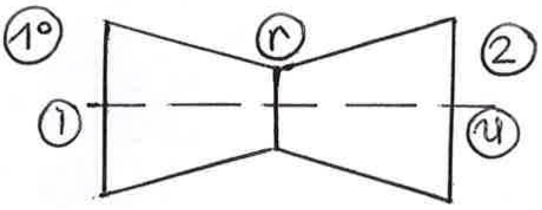
se all'uscita del condotto la velocità del fluido è pari a quella del suono, sono in condizioni critiche ed un ulteriore abbassamento della p_2 non farà variare $\dot{m}$ che rimane costante. L'informazione dell'abbassamento di p_2 infatti, è un'onda che viaggia alla velocità del suono e per valori di $c_2 < c_s$ riesce a raggiungere l'ingresso del condotto determinando la variazione della mandata che si adatta alle nuove condizioni. Per $c_2 = c_s$ il segnale della variazione di pressione muovendosi in direzione contraria al flusso non è più in grado di procedere verso monte e l'ugello non riesce più adattarsi alle condizioni imposte.

$p_2 > p_{cr} \Rightarrow c_u < c_s$

$p_2 < p_{cr} \Rightarrow c_u = c_s$

UGELLO CONVERGENTE - DIVERGENTE

Ottengo flusso supersonico, nella prima sezione ho ugello convergente che mi permette di raggiungere nella sezione di gola una velocità pari a quella del suono, nella seconda parte ho un ugello divergente che permette un ulteriore espansione aumentando la velocità del fluido che diventa supersonico.

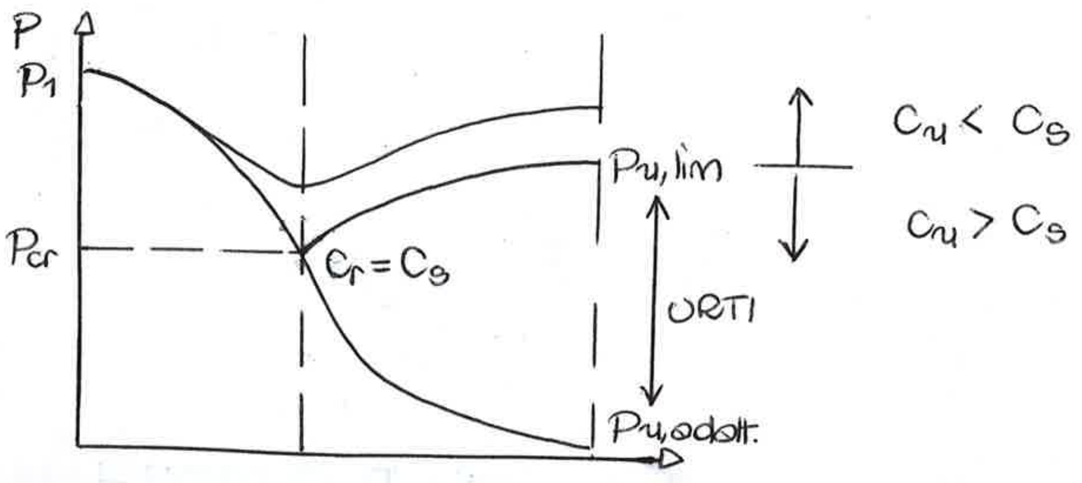


impongo arresto isentropico in (i) e vario la P_2

$$P_2 = P_1^\circ \Rightarrow \dot{m} = 0$$

$$P_2 < P_1^\circ \Rightarrow \dot{m} \uparrow$$

quando $C_r = C_s$ allora $P_r = P_{cr}$ e $P_2 = P_{u,lim}$ fino a questo punto la velocità del fluido aumenta nel convergente e diminuisce nel divergente risultando sempre $C_u < C_s$. Per $P_2 = P_{u,adatt}$ $C_u > C_s$. Se P_2 è compreso tra $P_{u,lim}$ e $P_{u,adatt}$ il comportamento dell'ugello è spiegato attraverso il fenomeno degli urti. Se $P_2 < P_{u,adatt}$ l'andamento della pressione nel condotto è quello di adattamento e l'espansione di pressione si realizza nell'ambiente di scarico attraverso onde di espansione



ANDAMENTO delle AREE in un CONDOTTO

$$\dot{m} = \rho A c$$

$$d\dot{m} = A c\, d\rho + \rho c\, dA + \rho A\, dc = \rho A c \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} \right)$$

$$d\dot{m} = \dot{m} \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} \right) = 0 \Rightarrow \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} \right) = 0$$

$$\underbrace{L_i}_{=0} = \int v\, dp + \underbrace{L_w}_{=0} + \Delta E_{\underbrace{g}_{=0}, c, \underbrace{cf}_{=0}} \Rightarrow 0 = \int v\, dp + \Delta E_c$$

$$\frac{dp}{\rho} + dE_c = 0$$

$$\text{con } \Delta E_c = \frac{1}{2}(c^2 - c_0^2) \Rightarrow \frac{d}{dc}\left(\frac{1}{2}(c^2 - c_0^2) \right) = \frac{1}{2}(2c) = c$$

$$dE_c = c\, dc$$

$$\begin{cases} \dfrac{dp}{\rho} + c\, dc = 0 \Rightarrow \dfrac{dc}{c} = -\dfrac{dp}{\rho c^2} \\ \dfrac{d\rho}{\rho} + \dfrac{dA}{A} + \dfrac{dc}{c} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} - \frac{dp}{\rho c^2} = 0$$

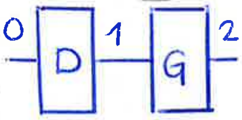
$$\frac{1}{\rho} \frac{1}{(dp/d\rho)} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dp} - \frac{1}{\rho c^2} = 0$$

$$\frac{dp}{d\rho} = c_s^2$$

$$\frac{dA}{dp} = \frac{A}{\rho} \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{c_s^2} \right)$$

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | ing. A. Poggio

ESERCITAZIONE | Turbine

1. Uno stadio di turbina assiale ad azione priva di perdite (trasformazione isentropica) è alimentata al distributore con vapore d'acqua a 30 bar e 450°C ($C_0 \cong 0$). Sapendo che la pressione a valle del distributore è $p_1 = 15$ bar, che l'angolo tra la velocità assoluta in uscita al distributore e la direzione periferica è $\alpha_1 = 25°$ e che la velocità periferica è u = 280 m/s, determinare:
   - i triangoli di velocità dello stadio, supponendo simmetriche le palettature mobili
   - il rendimento η_{0i} dello stadio, considerando dissipata l'energia cinetica di scarico

2. Uno stadio di turbina assiale ad azione semplice riceve una portata di vapore di 150 Kg/s con velocità trascurabile alle seguenti condizioni: $p_0 = 80$ bar, $T_0 = 500°C$; lo scarico avviene alla pressione $p_2 = 40$ bar. Ipotizzando i seguenti valori dei parametri geometrici e di funzionamento: $\alpha_1 = 30°$, $(u/c_1) = 0{,}5 \cos \alpha_1$ (palettatura rotante simmetrica), n = 3000 giri/min ed i seguenti valori dei coefficienti di perdita: $\varphi = 0{,}95$, $\psi = 0{,}90$, determinare:
   - i triangoli di velocità dello stadio
   - il profilo schematico della paletta
   - il lavoro massico elaborato e la potenza indicata dello stadio
   - il rendimento interno dello stadio
   - la lunghezza dello spigolo di ingresso della palettatura della girante, e l'eventuale grado di parzializzazione necessario ad avere una lunghezza minima pari a 10 mm oppure un rapporto $l/d \geq 0{,}01$

3. Una girante di turbina assiale adiabatica espande aria (k=1,4, R=287 J/KgK) secondo una politropica di esponente m=1,35. Le condizioni di funzionamento sono le seguenti: pressione, temperatura e velocità del fluido in ingresso alla girante rispettivamente $p_1 = 10$ bar, $T_1 = 750°C$, $c_1 = 450$ m/s; velocità periferica u = 300 m/s, n = 3000 giri/min, angolo di uscita al distributore $\alpha_1 = 20°$; pressione di uscita della girante $p_1 = 7$ bar, palette della girante di altezza radiale costante l = 25 cm, coefficiente di ingombro palette $\xi = 0{,}95$. Calcolare la potenza interna dello stadio.

4. Uno stadio di turbina a reazione funziona alimentato con una portata di vapore di 150 kg/s, con velocità trascurabile alle seguenti condizioni: $p_0 = 1{,}2$ bar, $T_0 = 140°C$. Si ipotizzino i seguenti valori dei parametri geometrici e di funzionamento: d = 2 m, $\alpha_1 = 20°$, $(u/c_1) = \cos \alpha_1$ (triangoli delle velocità simmetrici), n = 3000 giri/min ed i seguenti valori dei coefficienti di perdita: $\varphi = 0{,}96$, $\psi = 0{,}96$. Determinare:
   - i triangoli di velocità dello stadio
   - il profilo schematico della paletta
   - il lavoro massico elaborato e la potenza indicata
   - la pressione all'uscita dal distributore e dalla girante
   - il rendimento interno dello stadio, nelle due ipotesi che l'energia cinetica dello stadio venga persa oppure e recuperata

$$ {}^{1}_{0}\Big|\ \underbrace{\cancel{\Phi_e}}_{=0} - \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_c = 0 \Rightarrow i_1 - i_0 + \frac{C_1^2 - C_0^2}{2} = 0 $$

$$ {}^{2}_{1}\Big|\ \underbrace{\cancel{\Phi_e}}_{=0} - \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},\underbrace{\cancel{c}}_{=0},cf} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_{cf} = 0 \Rightarrow c_p(T_2 - T_1) + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0 $$ (sist. rotante)

$$ {}^{2}_{0}\Big|\ \underbrace{\cancel{\Phi_e}}_{=0} - L_i = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow -L_i = \Delta i + \Delta E_c \Rightarrow -L_i = \Delta i + \frac{C_0^2 - C_2^2}{2} $$

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italia
tel: +39 011.090.4485 fax: +39 011.090.4499
alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

$u = \pi n d$

$\dot{m} = \rho_1 \xi \pi d_m l_1 c_{a1}$ $\dot{m} = \rho_1 A c_{a1} = \rho_2 A w_{a,2}$

ANDAMENTO delle AREE in un CONDOTTO

$$\dot{m} = \rho A c$$

$$d\dot{m} = Ac\,d\rho + \rho c\,dA + \rho A\,dc = \rho A c\left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c}\right)$$

$$d\dot{m} = \dot{m}\left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c}\right) = 0 \Rightarrow \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c}\right) = 0$$

$$\underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \int v\,dp + \underbrace{\cancel{L_w}}_{=0} + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow 0 = \int v\,dp + \Delta E_c$$

$$\frac{dp}{\rho} + dE_c = 0$$

$$\text{con } \Delta E_c = \frac{1}{2}(c^2 - c_0^2) \Rightarrow \frac{d}{dc}\left(\frac{1}{2}(c^2 - c_0^2)\right) = \frac{1}{2}(2c) = c$$

$$dE_c = c\,dc$$

$$\begin{cases} \dfrac{dp}{\rho} + c\,dc = 0 \Rightarrow \dfrac{dc}{c} = -\dfrac{dp}{\rho c^2} \\[2ex] \dfrac{d\rho}{\rho} + \dfrac{dA}{A} + \dfrac{dc}{c} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} - \frac{dp}{\rho c^2} = 0$$

$$\frac{1}{\rho}\,\frac{1}{(dp/d\rho)} + \frac{1}{A}\,\frac{dA}{dp} - \frac{1}{\rho c^2} = 0$$

$$\frac{dp}{d\rho} = c_s^2$$

$$\frac{dA}{dp} = \frac{A}{\rho}\left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{c_s^2}\right)$$

ESERCITAZIONE 3 - Turbine

(1) turbina assiale ad azione
trasformazione isentropica

$P_0 = 30$ bar
$T_0 = 450$ °C } vapor d'H_2O

triangoli velocità = ?
$\eta_{\theta_i} = ?$

$C_0 \cong 0$
$P_1 = 15$ bar
$\alpha_1 = 25°$
$u = 280$ m/s
palettatura simmetrica

$$\begin{cases} P_0 = 30 \text{ bar} \\ T_0 = 450°C \\ S_0 = 7{,}09 \ \frac{kJ}{kg K} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_0 = 3344 \ \frac{kJ}{kg} \\ v_0 = 0{,}11 \ \frac{m^3}{kg} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = 345 \ K \\ i_1 = 3134 \ \frac{kJ}{kg} \\ v_1 = 0{,}09 \ \frac{m^3}{kg} \end{cases}$$

$$\Big|_0^1 \ \underbrace{Q_e}_{=0} + \underbrace{L_i}_{=0} = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{g}_{=0}, c, \underbrace{cf}_{=0}} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_c = 0$$

$$i_1 - i_0 + \frac{C_1^2}{2} - \underbrace{\frac{C_0^2}{2}}_{=0} = 0 \Rightarrow C_1 = \sqrt{2(i_0 - i_1)} =$$

$$= \sqrt{2(3344 - 3134) \cdot 10^3} =$$

$$= 648{,}07 \ \frac{m}{s} \cong 650 \ \frac{m}{s}$$

$$w_1 = \sqrt{(c_1 \cos\alpha_1 - u)^2 + (c_1 \sin\alpha_1)^2} =$$

$$= \sqrt{(650 \cos 25 - 280)^2 + (650 \sin 25)^2} = 413{,}5 \ \frac{m}{s}$$

$$\begin{cases} w_1 = w_2 \\ \beta_1 = \pi - \beta_2 \end{cases}$$

palettatura simmetrica e funzionamento ideale (no perdite!)

$$c_1 \cos\alpha_1 = u + w_1 \cos\beta_1 \Rightarrow \beta_1 = \arccos \frac{c_1 \cos\alpha_1 - u}{w_1} = 41{,}6°$$

$$\beta_2 = \pi - \beta_1 = 138{,}4°$$

$$\begin{cases} p_0^\circ = 80 \text{ bar} \\ T_0^\circ = 500°C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_0 = 3400 \ \frac{kJ}{kg} \\ s_0 = s_1 \end{cases} \Rightarrow i_{1,is} = 3192 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$\underbrace{{}_0^1\cancel{Q_e}}_{=0} + \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_c = 0$$

$$i_1 - i_0 + \frac{c_1^2}{2} - \underbrace{\frac{\cancel{c_0^2}}{2}}_{=0} = 0 \Rightarrow c_{1,is} = \sqrt{2(i_0 - i_1)} =$$

$$= \sqrt{2(3400-3192)\cdot 10^3} =$$

$$= 645 \ \frac{m}{s}$$

$$\varphi = \frac{c_1}{c_{1,is}} \Rightarrow c_1 = \varphi c_{1,is} = 0{,}95 \cdot 645 = 612{,}75 \ \frac{m}{s}$$

$$u = c_1 \cdot 0{,}5 \cos\alpha_1 = 612{,}75 \cdot 0{,}5 \cdot \cos 30 = 265{,}3 \ \frac{m}{s}$$

$$w_1 = \sqrt{(c_1\cos\alpha_1 - u)^2 + (c_1 \sin\alpha_1)^2} =$$

$$= \sqrt{c_1^2\cos^2\alpha_1 + u^2 - 2c_1\cos\alpha_1 u + c_1^2\sin^2\alpha_1} =$$

$$= \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2c_1\cos\alpha_1 u} =$$

$$= \sqrt{612{,}75^2 + 265{,}3^2 - 2\cdot 612{,}75\cdot\cos 30\cdot 265{,}3} =$$

$$= 405{,}3 \ \frac{m}{s}$$

$$\begin{cases} w_1 \neq w_2 \\ \beta_1 = \pi - \beta_2 \end{cases}$$

palettatura simmetrica e funzionamento reale

$$w_1 \sin\beta_1 = c_1 \sin\alpha_1 \Rightarrow \beta_1 = \arcsin\frac{c_1\sin\alpha_1}{w_1} = 49{,}1°$$

$$\beta_2 = \pi - \beta_1 = 130{,}9°$$

$$w_2 = \varphi\, w_{2,is} = \varphi\, w_1 = 364{,}8 \ \frac{m}{s}$$

$v_1 = 0{,}07 \ \frac{m^3}{kg}$

$$1-\varepsilon = \frac{v_1 \dot{m}}{\xi \Delta i_{is} \cdot \ell_{1,min}}$$

$$v_1 \dot{m} = (1-\varepsilon)\, \xi \pi d_m \ell_1 c_{\theta 1}$$

con $\xi = 1$

$$d_m = \frac{u}{\pi \cdot n} = \frac{266{,}3}{\pi \cdot 50} = 1{,}69 \ m$$

$$c_{\theta 1} = c_1 \sin\alpha_1 = 612{,}75 \cdot \sin 30 = 306{,}375$$

in assenza di parzializzazione $\varepsilon = 0$

$$\ell_1 = \frac{v_1 \dot{m}}{\xi \pi d_m c_{\theta 1}} = \frac{0{,}07 \cdot 150}{\pi \cdot 1{,}69 \cdot 306{,}375} = 6{,}455 \cdot 10^{-3} \ m \cong 6{,}5 \ mm$$

troppo piccolo, esercizio chiede $\ell_{min} \geq 10 \ mm$ (o $\frac{\ell}{d} \geq 0{,}01$)

devo inserire parzializzazione per $\ell_1 = 10 \ mm = 0{,}01 \ m$

$$\varepsilon = 1 - \frac{v_1 \dot{m}}{\xi \pi d_m \ell_1 c_{\theta 1}} = 1 - \frac{0{,}07 \cdot 150}{\pi \cdot 1{,}69 \cdot 0{,}01 \cdot 306{,}375} = 0{,}35$$

per $\frac{\ell_1}{d} = 0{,}01 \Rightarrow \ell_1 = 0{,}01 \cdot 1{,}69 = 0{,}0169 \ m$

$$\varepsilon = 1 - \frac{0{,}07 \cdot 150}{\pi \cdot 1{,}69 \cdot 0{,}0169 \cdot 306{,}375} = 0{,}62$$

per rispettare entrambe le condizioni scelgo la seconda opzione:

$$\begin{cases} \ell_1 = 0{,}0169 \ m \\ \varepsilon = 0{,}62 \end{cases}$$

non ho palettatura simmetrica, applico I principio alla girante per conoscere w_2

$$T_1 p_1^{\frac{1-m}{m}} = T_2 p_2^{\frac{1-m}{m}} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-m}{m}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-m}{m}}$$

$$T_2 = (750+273)\left(\frac{10}{7}\right)^{\frac{1-1,35}{1,35}} = 932,6 \text{ K} = 659,6 \text{ °C}$$

$$\Big|_1^2 \underset{\hookrightarrow =0}{\cancel{Q_e}} + \underset{\hookrightarrow =0}{\cancel{L_i}} = \Delta i + \Delta E_{\underset{\hookrightarrow =0}{\cancel{g}},\underset{\hookrightarrow =0}{\cancel{c}},cf} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_{cf} = 0$$

$$c_p(T_2 - T_1) + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} = 0 \Rightarrow w_2 = \sqrt{w_1^2 - 2c_p(T_2 - T_1)}$$

$$w_2 = \sqrt{196,93^2 - 2\cdot 1004,5\,(659,6 - 750)} = 469,5 \ \frac{m}{s}$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 A_1 c_{a_1} =$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 A_1 c_{a_1} = \rho_2 A_2 w_{a,2} \Rightarrow w_{a,2} = \frac{\dot{m}_1}{\rho_2 A_2} = c_{a_1}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} = \frac{7\cdot 10^5}{287\cdot 932,6} = 2,615 \ \frac{kg}{m^3}$$

oppure

$$p_1 v_1^m = p_2 v_2^m \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^m = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^m$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{m}}$$

$$w_{a,2} = 154\ \frac{3,406}{2,615} = 200,6 \ \frac{m}{s}$$

$$w_{a,2} = w_2 \sin\beta_2 \Rightarrow \beta_2 = \arcsin\frac{w_{a,2}}{w_2} = 154,7°$$

$$c_2 = \sqrt{(w_2\cos\beta_2 + u)^2 + (w_2 \sin\beta_2)^2} =$$

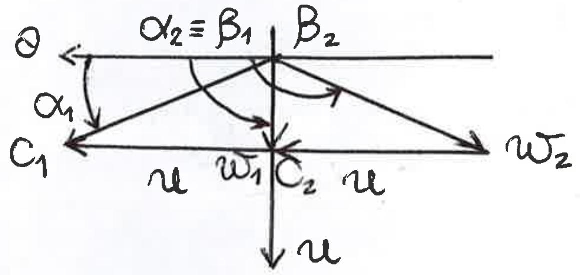
$$= \sqrt{(469,5\cos 154,7 + 300)^2 + (469,5 \sin 154,7)^2} = 236,11 \ \frac{m}{s}$$

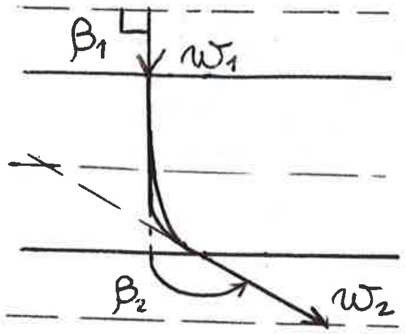
$$\begin{cases} c_1 = w_2 = 334{,}15 \ \frac{m}{s} \\ w_1 = c_2 = 114{,}3 \ \frac{m}{s} \end{cases}$$

$$w_1 = c_1 \sin\alpha_1 = 334{,}15 \cdot \sin 20 = 114{,}3 \ \frac{m}{s}$$

$$\alpha_1 = \pi - \beta_2 \Rightarrow \beta_2 = \pi - \alpha_1 = 160°$$

$$\alpha_2 = \beta_1 = 90°$$





$$L_i = u\,(c_{u_1} - c_{u_2}) = u\,(c_1 \cos\alpha_1 - c_2 \cos\alpha_2) = u^2 =$$
$$= 314^2 = 98{,}6 \cdot 10^3 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$P_i = L_i \dot{m} = 98{,}6 \cdot 10^3 \cdot 150 = 14{,}8 \ \text{MW}$$

$$i_{1,is} = i_0^\circ - \frac{c_1^2}{2\varphi^2} = 2755 \cdot 10^3 - \frac{334{,}15^2}{2 \cdot 0{,}96^2} = 2700 \ \frac{kJ}{kg}$$

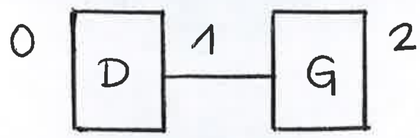
$$i_1 = i_0^\circ - \frac{c_1^2}{\varphi^2} = 2706 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$i^*_{2,is} = i_1 - \frac{w_2^2}{2\varphi^2} + \frac{w_1^2}{2} = 2652 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$i_{1,is} \rightarrow p_1 = 0{,}89 \ \text{bar} \quad \Rightarrow \rho_1 = 0{,}504 \ \frac{kg}{m^3}$$

$$i_1 \rightarrow i^*_{2,is} \rightarrow p_2 = 0{,}65 \ \text{bar}$$

TURBINE - cap 4



T. ASSIALE ad AZIONE MONOSTADIO (palettatura simmetrica)

FUNZIONAMENTO IDEALE

$${}_1^2\Big|\ \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \int \underbrace{\cancel{v}\,dp}_{=0} + \underbrace{\cancel{L_w}}_{=0} + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow \Delta E_c = 0$$

condotti fissi — $p_1 = p_2$ — ideale — gas — $r_1 = r_2$

$$\Downarrow$$

$$u = u_1 = u_2$$

$$\Downarrow$$

$$\Delta E_{cf} = 0$$

$$\Delta E_c = 0 \Rightarrow \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0 \Rightarrow w_2 = w_1$$

$${}_0^1\Big|\ \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} - \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_c = 0$$

$$i_1 - i_0 + \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = 0 \Rightarrow \left(i_1 + \frac{c_1^2}{2}\right) - \left(i_0 + \frac{c_0^2}{2}\right) = 0$$

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} - i_0^0 = 0 \Rightarrow c_1 = \sqrt{2(i_0^0 - i_1)}$$

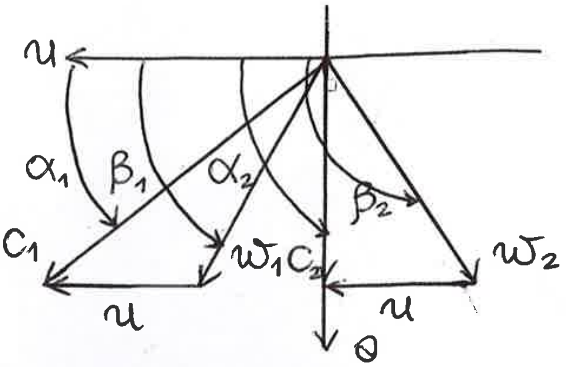
$${}_0^2\Big|\ \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} - L_i = \Delta i + \Delta E_{\underbrace{\cancel{g}}_{=0},c,\underbrace{\cancel{cf}}_{=0}} \Rightarrow -L_i = \Delta i + \Delta E_c$$

$$L_i = (i_0 - i_2) + \left(\frac{c_0^2 - c_2^2}{2}\right) = \left(i_0 + \frac{c_0^2}{2}\right) - \left(i_2 + \frac{c_2^2}{2}\right)$$

$$L_i = i_0^0 - i_2 - \frac{c_2^2}{2}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 118

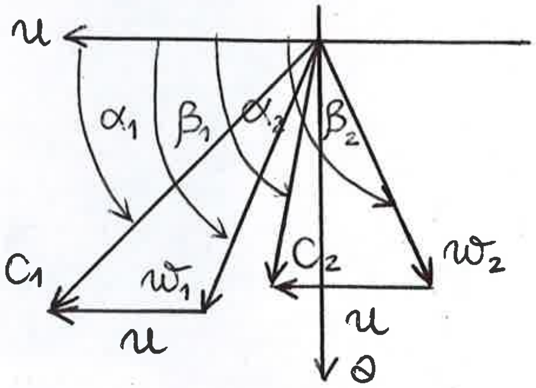
$$\left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt} = \frac{1}{2}\cos\alpha_1 \Rightarrow \eta_{\theta_i\,max} = \cos^2\alpha_1 \Rightarrow L_{i,opt} = 2u^2$$



$$\begin{cases} \alpha_2 = 90° \\ w_1 = w_2 \\ c_{u_2} = 0 \end{cases}$$

c_2 è minimo quindi ho minima perdita per energia cinetica di scarico $\frac{c_2^2}{2}$ e massimo rendimento

FUNZIONAMENTO REALE



$$\begin{cases} \beta_2 = \pi - \beta_1 \\ w_{2,is} = w_1 \\ \varphi = \frac{w_2}{w_{2is}} \Rightarrow w_2 = \varphi w_{2is} = \varphi w_1 \\ \varphi = \frac{c_1}{c_{1is}} \end{cases}$$

$$L_i = u\left(c_{u_1} - c_{u_2}\right) = u\left(c_1\cos\alpha_1 - c_2\cos\alpha_2\right)$$

$$c_{u_2} = c_2\cos\alpha_2 = w_2\cos\beta_2 + u = -\varphi w_1\cos\beta_1 + u =$$

$$= -\varphi\left(c_1\cos\alpha_1 - u\right) + u$$

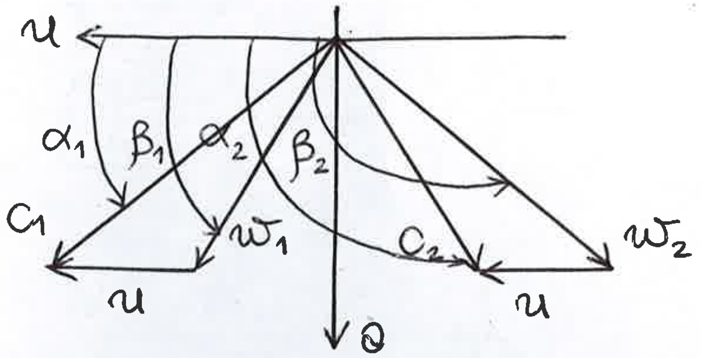
$$L_i = u\left(c_1\cos\alpha_1 + \varphi c_1\cos\alpha_1 - \varphi u - u\right) =$$

$$= u\left(c_1\cos\alpha_1 - u\right)(1+\varphi)$$

$$\eta_{\theta_i} = \frac{L_i}{L_{i,lim}} = \frac{u\left(c_1\cos\alpha_1 - u\right)(1+\varphi)}{\frac{c_1^2}{2\varphi^2}} = 2\varphi^2(1+\varphi)\frac{u}{c_1}\left(\cos\alpha_1 - \frac{u}{c_1}\right)$$

T. ASSIALE A REAZIONE MONOSTADIO (triangoli simmetrici)

espansione del fluido avviene anche nella girante



$$\begin{cases} c_1 = w_2 \\ w_1 = c_2 \\ \beta_2 = \pi - \alpha_1 \\ \beta_1 = \pi - \alpha_2 \end{cases}$$

$$L_i = u\,(c_{u_1} - c_{u_2}) = u\,(c_1 \cos\alpha_1 - c_2 \cos\alpha_2)$$

$$c_{u_2} = c_2 \cos\alpha_2 = w_2 \cos\beta_2 + u = -c_1 \cos\alpha_1 + u$$

$$L_i = u\,(c_1 \cos\alpha_1 + c_1 \cos\alpha_1 - u) = u\,(2c_1 \cos\alpha_1 - u)$$

$$L_{i,lim} = -\Delta i_{is} = i_0^0 - i_{2,is} = (i_0^0 - i_{1,is}) + (i_{1,is} - i_{2,is}) = \frac{c_1^2 + w_2^2 - w_1^2}{2}$$

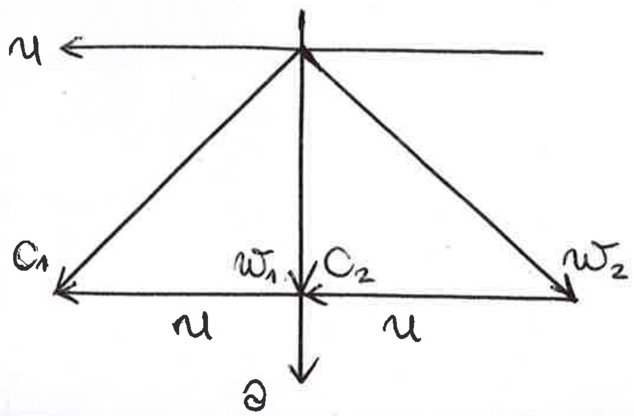
$$w_1 = \sqrt{(c_1 \cos\alpha_1 - u)^2 + (c_1 \sin\alpha_1)^2} = \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2c_1 u \cos\alpha_1}$$

$$L_{i,lim} = \frac{c_1^2 + \cancel{c_1^2} - \cancel{c_1^2} - u^2 + 2c_1 u \cos\alpha_1}{2} =$$

$$= \frac{c_1^2 - u^2 + 2c_1 u \cos\alpha_1}{2}$$

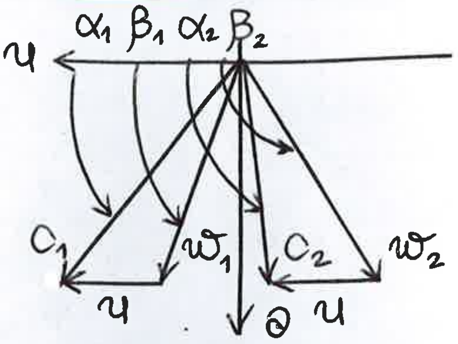
$$\eta_{\theta_i} = \frac{L_i}{L_{i,lim}} = \frac{2u\,(2c_1 \cos\alpha_1 - u)}{c_1^2 + u\,(2c_1 \cos\alpha_1 - u)}$$

$$\left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt} = \cos\alpha_1 \Rightarrow \eta_{\theta_{i\,max}} = \frac{2\cos^2\alpha_1}{1 + \cos^2\alpha_1} \Rightarrow L_{i,opt} = u^2$$



T. ASSIALE ad AZIONE MONOSTADIO (palettatura simmetrica)

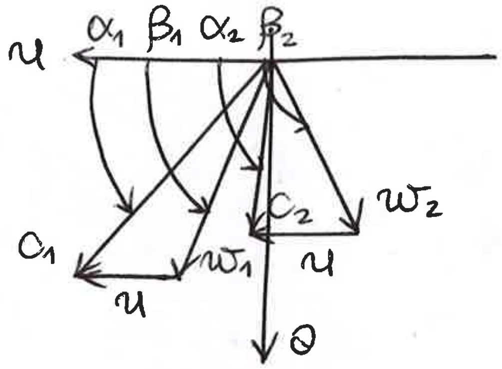
FUNZIONAMENTO IDEALE



$w_1 = w_2$

$\beta_1 = \pi - \beta_2$

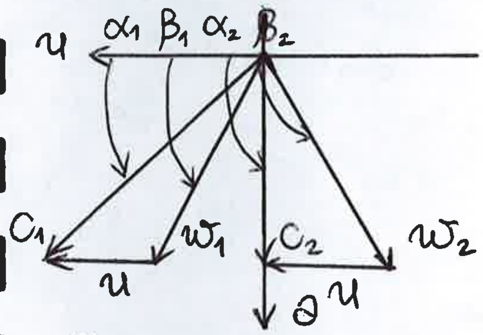
FUNZIONAMENTO REALE



$$\begin{cases} w_{2,is} = w_1 \\ \varphi = \dfrac{w_2}{w_{2,is}} \end{cases} \Rightarrow w_2 = \varphi w_1$$

$\beta_1 = \pi - \beta_2$

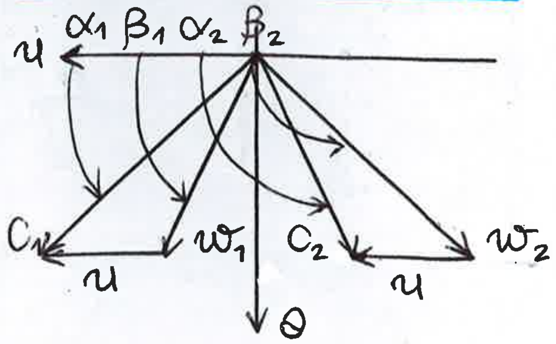
MAX RENDIMENTO



$$\begin{cases} c_2 \ min \\ \alpha_2 = 90° \end{cases}$$

T. ASSIALE a REAZIONE MONOSTADIO (triangoli simmetrici)

FUNZIONAMENTO IDEALE



$$\begin{cases} c_1 = w_2 \\ w_1 = c_2 \end{cases} \qquad \begin{cases} \alpha_1 = \pi - \beta_2 \\ \beta_1 = \pi - \alpha_2 \end{cases}$$

VINCOLI e ACCORGIMENTI COSTRUTTIVI

$P\uparrow \Rightarrow L_i\uparrow \Rightarrow \Delta i\uparrow \Rightarrow u\uparrow \Rightarrow d_m\uparrow$ (essendo n legato alla frequenza)

$\downarrow$ strettamente legato a ℓ_1

$$\begin{cases} u = \pi d_m n \\ v_1 \dot{m} = \zeta \pi d_m \ell_1 c_{a1} \end{cases}$$

$$\pi \cdot d_m = \frac{u}{n} = \frac{c_1\left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt}}{n} = \frac{\varphi c_{1,is}\left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt}}{n}$$

$$c_{a1} = c_1 \sin\alpha_1 = \varphi c_{1,is} \sin\alpha_1$$

$$v_1\dot{m} = \zeta\, \frac{\varphi c_{1,is}\left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt}}{n}\, \varphi c_{1,is} \sin\alpha_1 \cdot \ell_1$$

$$v_1\dot{m} = \zeta\, \frac{\ell_1}{n}\, \varphi^2 c_{1,is}^2 \left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt} \sin\alpha_1$$

$$c_{1,is}^2 = 2\left(i_0^0 - i_{2,is}\right) = 2\,\Delta i_{is}$$

$$v_1\dot{m} = \zeta\, \frac{\ell_1}{n}\, \varphi^2\, 2\cdot\Delta i_{is} \left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt} \sin\alpha_1$$

$$\Rightarrow \ell_1 = \frac{n}{\zeta\, \varphi^2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{u}{c_1}\right)_{opt} \sin\alpha_1}\, \frac{v_1\dot{m}}{\Delta i_{is}} \simeq \frac{v_1\dot{m}}{\Delta i_{is}}$$

devo agire sull'altezza delle palette, se troppo basse giochi e quindi fughe diventano notevoli, se troppo alte rischio cedimento paletta per volume massico elevato specialmente negli ultimi stadi

PARZIALIZZAZIONE - pale basse, portate minime

Esistono dei valori minimi dei giochi necessari per permettere movimento tra rotore e carcassa statorica. Difficile rispettarli nei primi stadi di turbina poiché ho bassi valori di volume massico. Con la parzializzazione riduco la sezione di passaggio del fluido. Il grado di parzializzazione ε definisce quota corona circolare interdetta all'attraversamento. Introduco perdita. Valido solo per turbine ad azione

$L_i = u'' c''_u - u' c'_u$

$\eta_y = \dfrac{L_i - L_w}{L_i} \neq \eta_{is} = \dfrac{L_{i,is}}{L_i}$

$\eta_y = \eta_{yc}$, $\eta_{is} = \eta_c$

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia

SIMILITUDINE
$$\begin{cases} (\beta - 1) \propto \left[\dfrac{n d''}{\sqrt{R T_1}}\right]^2 \\ (\beta - 1) \propto \left[\dfrac{\dot m \sqrt{R T_1}}{d''^2 p_1}\right]^2 \end{cases}$$

$$\dfrac{n d''}{\sqrt{R T_1}} \propto \dfrac{\dot m \sqrt{R T_1}}{d''^2 p_1}$$

① ② G Dif. Ⓘ Ⓘ Ⓘ

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | ing. A. Poggio

ESERCITAZIONE | Turbocompressori

1. Eseguire il dimensionamento di massima di un compressore centrifugo con girante a palette radiali che comprime una portata d'aria pari a 25 kg/s dalle condizioni ambiente (p_1 = 1 bar, T_1 = 15°C) sino alla pressione di 3 bar. Assumere: η_{yc} = 0,75; ξ = 0,9; l"/d" = 0,10; α" = 20°. Ammettere la compressione politropica con un unico esponente m (c_p = 1004,5 J/kgK, k = 1,4).

2. Un turbocompressore centrifugo a pale radiali aspira 1 kg/s di argon (k= 1.67; R= 207 J/kgK) da un ambiente con condizioni pari a 1.5 bar e 10 °C, mandando in un ambiente a 4 bar. A 20000 g/min il compressore assorbe 92 kW (η_m = 0.97), funzionando con φ = 0.25. Calcolare l'esponente m della politropica di compressione, la pressione e la temperatura in uscita alla girante.

3. Due turbocompressori centrifughi geometricamente simili e funzionanti in condizioni di similitudine aspirano aria (k = 1,4; R = 287 kJ/kgK) a 1 bar e 20°C. Il primo, ruotando a 25000 g/min, comprime 2 kg/s assorbendo 300 CV con η_{yc} = 0,85. Il secondo presenta lo stesso rapporto di compressione ruotando a 30000 g/min. Determinare il rapporto di compressione e la potenza assorbita dal secondo compressore. Si assuma $\eta_m \cong 1$.

4. Due turbocompressori centrifughi geometricamente simili e funzionanti in condizioni di similitudine fluidodinamica ruotano alla stessa velocita angolare e aspirano aria dall'ambiente (p_1 = 1 bar, T_1 = 300 K). Il primo compressore comprime 1 kg/s di aria con β_I = 1,5 (η_{yc} = 0,80). Il secondo compressore presenta dimensioni geometriche metà di quelle del precedente. Determinare il rapporto di compressione β_{II} del secondo compressore e la sua portata nell'ipotesi di poter trascurare la differenza tra i volumi massici all'uscita della girante nei due compressori. (Si assuma c_p = 1004,5 J/kgK, k = 1,4).

5. Si consideri un compressore bistadio in cui ciascuno degli stadi presenti la caratteristica allegata. Tale caratteristica è costituita facendo riferimento alle condizioni ambiente (p_0 = 1 bar, T_0 = 300 K) che sono pure le condizioni alle quali aspira il 1° stadio. Il punto di funzionamento del 1° stadio è definito dai seguenti valori:

   $\dfrac{n}{n_0}\sqrt{\dfrac{T_0}{T}} = 1{,}10$ $\quad \dot m \sqrt{\dfrac{T}{T_0}}\dfrac{p_0}{p} = 35\,\dfrac{kg}{s}$ $\quad \eta_c = 0{,}825$ $\quad \beta = 3{,}05$

   ↳ isentropico

   Nell'ipotesi che il 2° stadio giri alla stessa velocità angolare del 1°, determinare il presumibile punto di funzionamento.

6. Un turbocompressore presenta la caratteristica di funzionamento allegata. Le condizioni alle quali detta caratteristica è riferita sono: p_0 = 1 bar, T_0 = 300 K; n_0 = 12000 g/min. Il turbocompressore sta operando (con $T_1 = T_0$, $p_1 = p_0$) nel punto di funzionamento individuato dalle seguenti grandezze:

   $\dfrac{n}{n_0}\sqrt{\dfrac{T_0}{T}} = 1{,}00$ $\quad \dot m \sqrt{\dfrac{T}{T_0}}\dfrac{p_0}{p} = 31{,}5\,\dfrac{kg}{s}$ $\quad \eta_c = 0{,}900$ $\quad \beta = 2{,}67$

   Regolando il turbocompressore, è necessario variare la portata fino al limite del pompaggio. Determinare le. nuove condizioni di funzionamento nei seguenti casi di regolazione:
   - variazione del numero di giri
   - laminazione alla mandata
   - laminazione all'aspirazione
   - riflusso

$$\frac{m-1}{m} = \frac{1}{\eta_{yc}} \frac{k-1}{k}$$

$${}_1^2|\ \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g,c,cf}}}_{=0} \Rightarrow L_i - \Delta i = 0$$

$$\dot m = \rho'' \xi \pi \frac{l''}{d''} d''^2 w''_r$$

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italia
tel: +39 011.090.4485 fax: +39 011.090.4499
alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

$${}_1^{''}|\ \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + L_i = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g}}}_{=0},\underbrace{\cancel{_{c,cf}}}_{=0} \Rightarrow L_i = \Delta i + \Delta E_c = c_p \Delta T + \frac{c''^2 - c_1^2}{2}$$

$${}_{''}^2|\ \underbrace{\cancel{Q_e}}_{=0} + \underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \Delta i + \underbrace{\cancel{\Delta E_{g}}}_{=0}\underbrace{\cancel{_{c,cf}}}_{=0} \Rightarrow \Delta i + \Delta E_c = 0 \Rightarrow c_p \Delta T + \frac{\underbrace{\cancel{c_2^2}}_{=0} - c''^2}{2} = 0$$

ESERCITAZIONE 4 - Turbocompressori

(1) compressore centrifugo con girante a palette radiali

$\dot{m} = 25 \ \frac{kg}{s}$

$p_1 = 1$ bar

$T_1 = 15°C$

$p_2 = 3$ bar

$\eta_{yc} = 0{,}75$

$\xi = 0{,}9$

$\frac{e''}{d''} = 0{,}10$

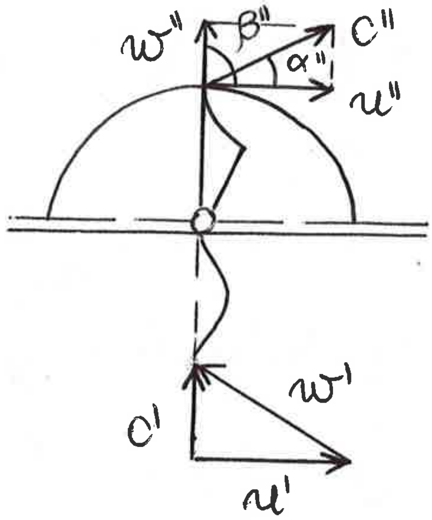
$\alpha'' = 20°$

n unico

$c_p = 1004{,}5 \ \frac{J}{kg\,k}$

$k = 1{,}4$

dimensionamento = ?
$(d'', e'', n = ?)$



$$\begin{cases} \alpha_1 = \beta'' = 90° \\ c_u' = w_u'' = 0 \ \frac{m}{s} \\ c_{a_1} = c_1 = w_{u_1} = u_1 \\ w_r'' = w'' = c_r'' \\ c_u'' = u'' \end{cases}$$

pale radiali

applico I principio al compressore

$$\Big|_1^2 \underbrace{Q_e}_{=0} = L_i + \Delta i + \underbrace{\Delta E_{g,c,cf}}_{=0} \Rightarrow L_i + \Delta i = 0$$

$c_1 \cong c_2$

$|L_i| = c_p \Delta T = c_p(T_2 - T_1)$

$L_i = u''c_u'' - u'c_u' = u''^2$

$$\dot{m} = \rho'' z \pi \ell'' d'' w_r'' = \rho'' z \pi \frac{\ell''}{d''} d''^2 w_r''$$

$$d'' = \sqrt{\frac{\dot{m}}{\rho'' z \pi \frac{\ell''}{d''} w_r''}} = \sqrt{\frac{25}{1{,}683 \cdot 0{,}9 \cdot \pi \cdot 0{,}10 \cdot 141{,}1}} = 0{,}61 \ m$$

$$\frac{\ell''}{d''} = 0{,}1 \Rightarrow \ell'' = 0{,}1 \cdot 0{,}61 = 0{,}061 \ m$$

$$u'' = \pi n d'' \Rightarrow n = \frac{u''}{\pi d''} = \frac{387{,}7}{\pi \cdot 0{,}61} \cdot 60 = 12139 \ \frac{giri}{min}$$

(2) due turbocompressori centrifughi geometricomente simili funzionanti in condizione di similitudine

$R = 287 \ \frac{kJ}{kg\,K}$

$k = 1{,}4$

$P_1 = 1$ bar

$T_1 = 20\,°C$

$n_I = 25000 \ \frac{giri}{min}$

$\dot{m}_I = 2 \ \frac{kg}{s}$

$P_{oss_I} = 300$ CV $= 300 \cdot 0{,}7355 = 220{,}650$ kW

$\eta_{yc_I} = 0{,}85$

$\beta_{c_I} = \beta_{c_{II}}$

$n_{II} = 30000 \ \frac{giri}{min}$

$\beta_c = ?$

$P_{oss_{II}} = ?$

$(\eta_m = 1)$

$$\begin{cases} \varphi_I = \dfrac{w''_{r_I}}{u''_I} = \dfrac{w''_{r_{II}}}{u''_{II}} = \varphi_{II} \\ \varphi_I = \varphi_{II} \\ z_I = z_{II} \\ \eta_{yc_I} = \eta_{yc_{II}} \end{cases}$$

condizioni di similitudine geometrica e fluidodinamica

$$\eta_{mecc} = \frac{P_i}{P_{oss}} = 1 \Rightarrow P_i = P_{oss} = 220{,}650 \ kW$$

3) due turbocompressori centrifughi geometricamente simili funzionanti in condizioni di similitudine fluidodinamica

$\omega_I = \omega_2 \Rightarrow n_I = n_{II}$

$p_1 = 1$ bar

$T_1 = 300\ K$

$\dot{m}_I = 1\ \frac{kg}{s}$

$\beta_I = 1,5$

$\eta_{yc} = 0,80$

$\beta_{II} = ?$

$\dot{m}_{II} = ?$

$\text{II} = \frac{1}{2}\ \text{I}$

$$\begin{cases} d''_{II} = \frac{1}{2} d''_I \\ \ell''_{II} = \frac{1}{2} \ell''_I \end{cases}$$

$c_p = 1004,5\ \frac{J}{kg K}$

$k = 1,4$

$v''_I \cong v''_{II}$

$$u'' = \frac{\pi n d''}{60}$$

$$u''_{II} = \frac{1}{2} u''_I$$

$$\begin{cases} \dot{m} = \rho'' A\ w''_r \\ A = \pi \xi \ell'' d'' = \pi \xi d''^2 \left(\frac{\ell''}{d''}\right) \\ w''_r = \varphi u'' \\ \rho'' = \frac{1}{v''_I} \end{cases} \Rightarrow \dot{m} = \frac{\pi \xi d''^2 \frac{\ell''}{d''} \varphi u''}{v''_I}$$

$$\frac{\ell''_I}{d''_I} = \frac{\ell''_{II}}{d''_{II}} \quad e \quad \varphi_I = \varphi_{II} \quad e \quad \xi_I = \xi_{II}$$

$$\frac{\dot{m}_{II}}{\dot{m}_I} = \frac{\cancel{\pi} \cancel{\xi_{II}} d''^2_{II} \cdot \cancel{\frac{\ell''_{II}}{d''_{II}}} \cancel{\varphi_{II}} u''_{II}}{\cancel{\pi} \cancel{\xi_I} d''^2_I \cancel{\frac{\ell''_I}{d''_I}} \cancel{\varphi_I} u''_I} = \left(\frac{d''_{II}}{d''_I}\right)^2 \frac{u''_{II}}{u''_I} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$$

$$\dot{m}_{II} = \frac{1}{8} \dot{m}_I = \frac{1}{8} = 0,125\ \frac{kg}{s}$$

② $\Delta z = 10\ m$

$Y = 0{,}5\ m$

$\dot{m} = 17{,}5\ \frac{l}{s} = 17{,}5\ \frac{kg}{s}$

$n = 1500\ \frac{giri}{min}$

$\eta_m = 0{,}92$

$\eta_v = 1$

$P_{oss} = ?$

$\dot{m}_2 = ?$

$P'_{oss}\ ,\ \eta'_p \setminus \dot{m}'_2 = \dot{m}_2 - 0{,}4\dot{m}_2 = 0{,}6\,\dot{m}_2$

$= ?$

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_{oss}} \Rightarrow P_{oss} = \frac{P_i}{\eta_m} = \frac{L_i \dot{m}}{\eta_m} \quad \text{con} \quad P_i = \frac{gH\dot{m}}{\eta_y \eta_v}$$

$$\rho = 10^3\ \frac{kg}{m^3}$$

$$Q = \frac{\dot{m}_1}{\rho} = \frac{17{,}5}{10^3} = 0{,}0175\ \frac{m^3}{s} = 63\ \frac{m^3}{h}$$

$$H_e = \Delta z + kQ^2 = \Delta z + Y = 10 + 0{,}5 = 10{,}5\ m$$

$$Y = kQ^2 \Rightarrow k = \frac{Y}{Q^2} = \frac{0{,}5}{63^2} = 1{,}26 \cdot 10^{-4}$$

traccio curva sul grafico fornito

Q	H_e
0	10
100	11,26
200	15,039
300	21,338
400	30,156
500	41,494
690	55,351

$$\Rightarrow \begin{cases} Q = 396\ \frac{m^3}{h} \\ H_e = \Delta z + kQ^2 = 10 + 1{,}26 \cdot 10^{-4} \cdot 396^2 = \\ \qquad = 29{,}75\ m \\ \eta_y = 0{,}82 \end{cases}$$

$$P_i = \frac{g H_e \rho Q}{\eta_y \eta_v} = \frac{9{,}81 \cdot 29{,}75 \cdot 1000 \cdot 396}{0{,}82 \cdot 1 \cdot 3600} = 39{,}15\ kW$$

$$P_{oss} = \frac{P_i}{\eta_m} = \frac{39150}{0{,}92} = 42{,}5\ kW$$

4) compressore bistadio

$$\left.\begin{aligned} & p_0 = 1 \text{ bar} = p_{1_I} \\ & T_0 = 300 \text{ K} = T_{1_I} \\ & \frac{n}{n_0}\sqrt{\frac{T_0}{T}} = 1{,}10 \\ & \dot{m}\sqrt{\frac{T}{T_0}}\frac{p_0}{p} = 35 \ \frac{kg}{s} \\ & \eta_c = 0{,}825 \\ & \beta = 3{,}05 \end{aligned}\right\} \text{I stadio}$$

$$n_{II} = n_I$$

p.to funzionamento II stadio = ?

$$\beta = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} \Rightarrow p_{2_I} = \beta\, p_{1_I} = 3{,}05 \cdot 1 = 3{,}05 \text{ bar}$$

$$\left.\begin{aligned} & p_{1_{II}} = p_{2_I} = 3{,}05 \text{ bar} \\ & T_{1_{II}} = T_{2_I} \end{aligned}\right\} \text{II stadio}$$

$$M_{II} = \frac{\dot{m}_{II}\sqrt{T_{1_{II}}/T_0}}{p_{1_{II}}/p_0} = \frac{\dot{m}_I\sqrt{T_{2_I}/T_{1_0}}}{p_{2I}/p_{1_I}} = \frac{\dot{m}_I\sqrt{T_{2_I}/T_{1_0}}}{\beta}$$

$$\eta_{II} = \frac{n_I/n_0}{\sqrt{T_{1_{II}}/T_0}} = \frac{\eta_I}{\sqrt{T_{2_I}/T_{1_I}}}$$

$$\frac{T_{2is}}{T_{1_I}} = \beta^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{con} \quad k = 1{,}4 \quad (hp)$$

→ suppongo trasformazione isentropica

$$T_{2is} = \beta^{\frac{k-1}{k}} \cdot T_{1_I} = 300 \cdot 3{,}05^{\frac{0{,}4}{1{,}4}} = 412{,}6 \text{ K}$$

$$L_{i,is} = c_p\left(T_{2,is} - T_{1_I}\right) = 113{,}07 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$\frac{L_{i,is_I}}{L_{i_I}} = \eta_{is} \Rightarrow L_{i_I} = \frac{L_{i,is_I}}{\eta_{is}} = \frac{113{,}07 \cdot 10^3}{0{,}825} = 137{,}06 \ \frac{kJ}{kg}$$

a) $\dot{m}' = 27,6 \quad \frac{kg}{s}$

$p_1' = p_1 = p_0$

$p_2' = p_2 = 2,67$ poiché $\beta_c' = \beta_c = 2,67$ e $p_1 = 1$ bar

$\eta_c' = 0,65$

$N' = \frac{n'}{n_0} = 0,965 \Rightarrow n' = 0,965 \cdot 12000 = 11580 \quad \frac{giri}{min}$

$T_{2,is}' = T_1 \beta'^{\frac{k-1}{k}} = 300 (2,67)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 397,18 \ K$

$L_{is}' = c_p (T_{2,is}' - T_1) = 1004,5 (397,18 - 300) = 97,6 \quad \frac{kJ}{kg}$

$\eta_c' = \frac{L_{is}'}{L_i'} \Rightarrow L_i' = \frac{L_{is}'}{\eta_c'} = \frac{97,6 \cdot 10^3}{0,65} = 150,1 \quad \frac{kJ}{kg}$

$P_i' = \dot{m}' L_i' = 27,6 \cdot 150,1 \cdot 10^3 = 4,14 \quad MW$

b) $\dot{m}' = 28,5 \quad \frac{kg}{s}$

$p_1' = p_1 = p_0$

$T_1' = T_1 = T_0$

$\beta_c' = 2,82 \Rightarrow p_2' = 2,82$ bar

$\eta_c' = 0,65$

$T_{2,is}' = T_1 \beta'^{\frac{k-1}{k}} = 300 (2,82)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 403,4 \ K$

$L_{is}' = c_p (T_{2,is} - T_1) = 1004,5 (403,4 - 300) = 103,9 \quad \frac{kJ}{kg}$

$\eta_c' = \frac{L_{is}'}{L_i'} \Rightarrow L_i' = \frac{L_{is}'}{\eta_c'} = \frac{103,9 \cdot 10^3}{0,65} = 159,8 \quad \frac{kJ}{kg}$

$P_i = \dot{m}' L_i' = 28,5 \cdot 159,8 \cdot 10^3 = 4,55 \quad MW$

6 (è il 2 della versione 2014-2015)

turbocompressore centrifugo a pale radiali

$\dot{m}_1 = 1 \ \frac{kg}{s}$

$k = 1{,}67$

$R = 207 \ \frac{J}{kg K}$

$P_1 = 1{,}5$ bar

$T_1 = 10\,°C$

$P_2 = 4$ bar

$n = 2000 \ \frac{giri}{min}$

$P_{oss} = 92$ kW

$\eta_m = 0{,}97$

$\varphi = 0{,}25$

$m = ?$

$P'' = ?$

$T'' = ?$

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_{oss}} \Rightarrow P_i = \eta_m P_{oss} = 0{,}97 \cdot 92000 = 89240 \quad W$$

$$P_i = L_i \dot{m} \Rightarrow L_i = \frac{P_i}{\dot{m}} = \frac{89240}{1} = 89{,}24 \quad \frac{kJ}{kg}$$

$$c_p = R \frac{k}{k-1} = 207 \ \frac{1{,}67}{1{,}67-1} = 515{,}95 \quad \frac{J}{kgK}$$

$$L_i = c_p (T_2 - T_1) \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{L_i}{c_p} = 283 + \frac{89{,}24 \cdot 10^3}{515{,}95} =$$

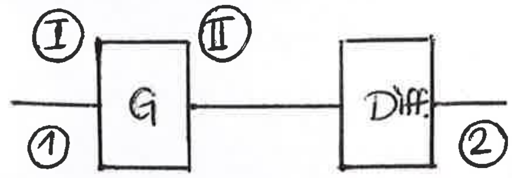
$$= 455{,}96 \ K$$

$$T_1 P_1^{\frac{1-m}{m}} = T_2 P_2^{\frac{1-m}{m}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-m}{m}}$$

$$\ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{1-m}{m} \ln \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow \frac{1-m}{m} = \frac{\ln \frac{T_1}{T_2}}{\ln \frac{P_2}{P_1}} = -0{,}486$$

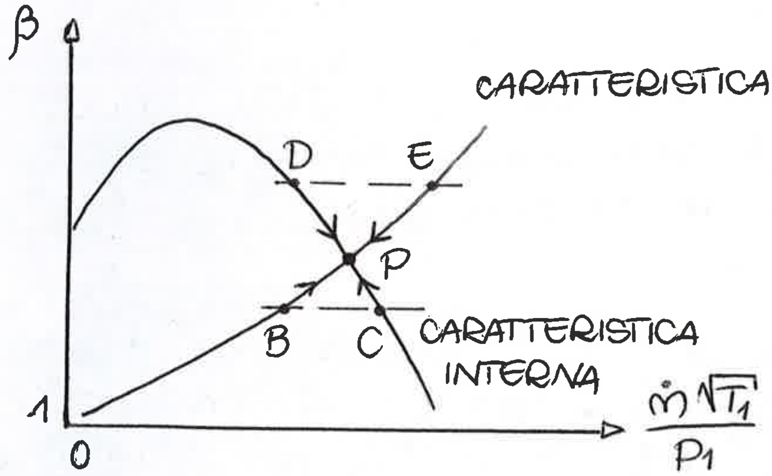
$m = 1{,}946$

TURBOCOMPRESSORI - cap 5



FUNZIONAMENTO

Il p.to di funzionamento di un turbocompressore è dato dall'intersezione della caratteristica esterna, utilizzatore, con quella interna, generatore. Il sistema è in equilibrio stabile se è in grado di reagire a piccole perturbazioni tornando nel punto di equilibrio iniziale.

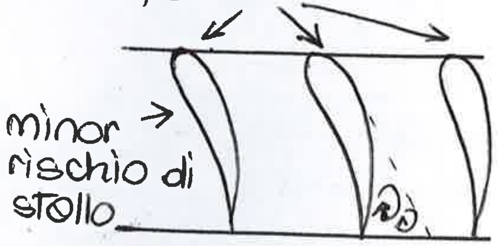


ED) Forzo il sistema a lavorare a p_2 più alto, generatore manda meno fluido di quello che l'utilizzatore elabora, ho meno massa per cui pressione scende fino a riottenere l'equilibrio

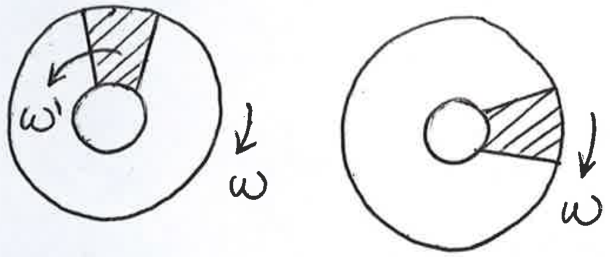
BC) Forzo il sistema a lavorare a p_2 più basso, generatore manda più fluido di quello che l'utilizzatore elabora, ho un fenomeno di accumulo per cui pressione sale fino a riottenere condizioni iniziali

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 118

Lo stallo determina una riduzione della sezione di passaggio interpalare, l'ostruzione determina la redistribuzione del fluido negli altri canali ed il propagarsi del fenomeno sulle altre pale.



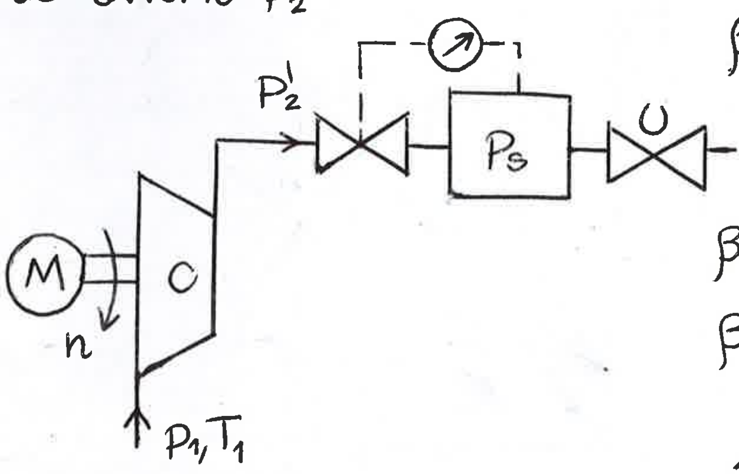
La sezione in cui si ha lo stallo si sposta progressivamente in direzione opposta al verso di rotazione ma con una velocità inferiore per cui viene trascinato, stallo rotante.
Lo stallo comporta una sollecitazione periodica che può portare alla rottura a fatica.

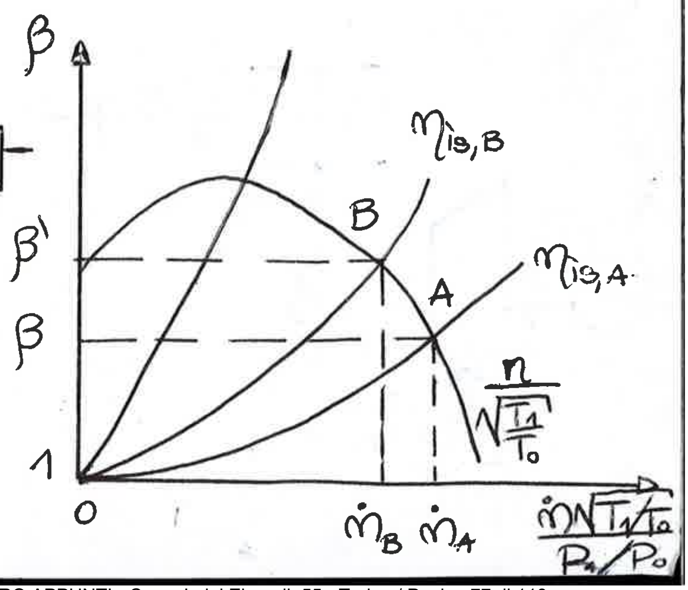


REGOLAZIONE

LAMINAZIONE alla MANDATA

Mantenendo la pressione p_s nel serbatoio inalterata viene diminuita la portata mandata chiudendo una valvola a valle del compressore. La valvola ha il compito di chiudersi quando avverte p_2'

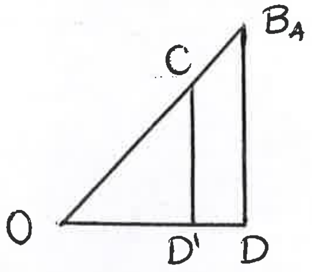




$$A \begin{cases} P_1 \\ T_1 \\ P_2 \\ \dot{m}_A \end{cases} \longrightarrow B_A \begin{cases} P_1' < P_1 \\ T_1' = T_1 \\ P_2 \\ \dot{m}_B \end{cases} \longrightarrow B_m \begin{cases} P_1 \\ T_1' = T_1 \\ P_2 \\ \dot{m}_B \end{cases}$$

con laminazione alla mandata

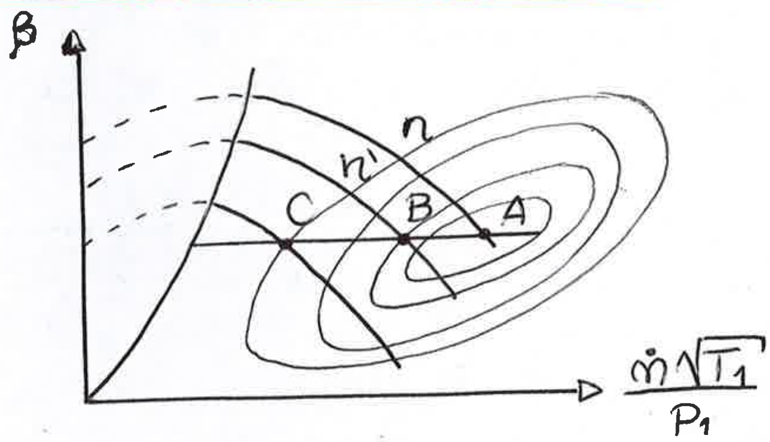
$$C = \left(\frac{\dot{m}_B}{P_1}, \frac{P_2}{P_1} \right)$$



$$\frac{CD'}{B_A D} = \frac{OD'}{OD} \Rightarrow \frac{P_2/P_1}{P_2/P_1'} = \frac{\dot{m}_B/P_1}{\dot{m}_B/P_1'}$$

La portata del punto B_A corrisponde a quella del punto B_M. Con questo tipo di regolazione a parità di riduzione di portata mi sposto meno dal p.to di funzionamento iniziale ottenendo un risultato migliore in termini di rendimento rispetto alla laminazione alla mandata.

VARIAZIONE del NUMERO di GIRI



A parità di rapporto di compressione β, spostandomi sulla retta per abbassare la portata, abbassando il numero di giri, peggioro notevolmente il rendimento.

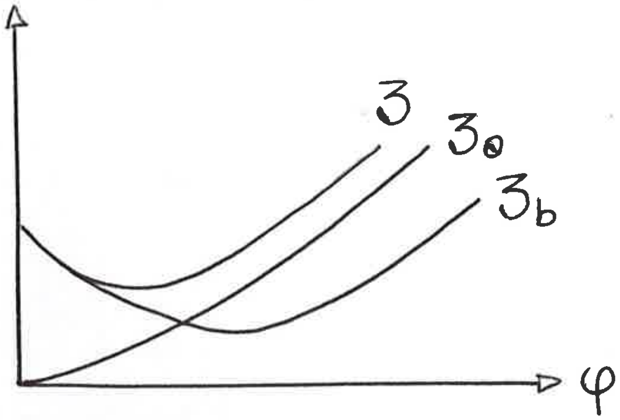
$$\begin{cases} T_1, P_1 = cost \\ P_2 = cost \Rightarrow \beta = cost \end{cases}$$

$n' < n$

$\dot{m}' < \dot{m}$

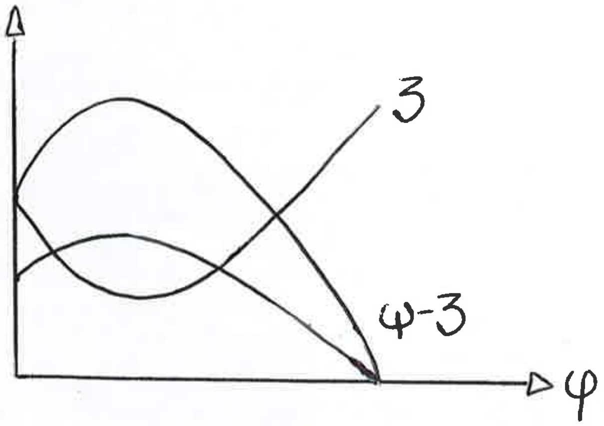
$\eta_{is}' \ll \eta_{is}$

CARATTERISTICA MANOMETRICA



ζ_a: perdite nei condotti
ζ_b: " all'imbocco delle palettature

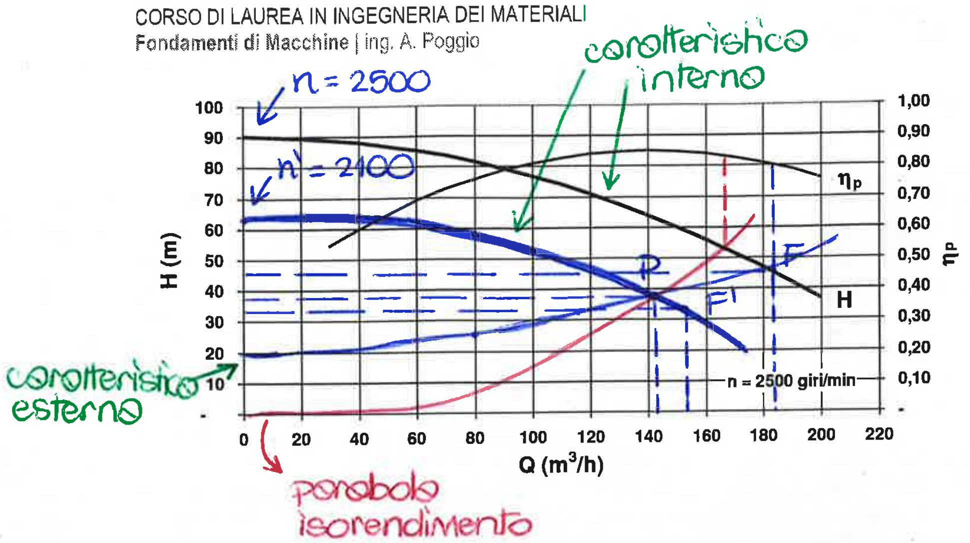
Rappresento l'andamento del rapporto di compressione β in funzione della portata.



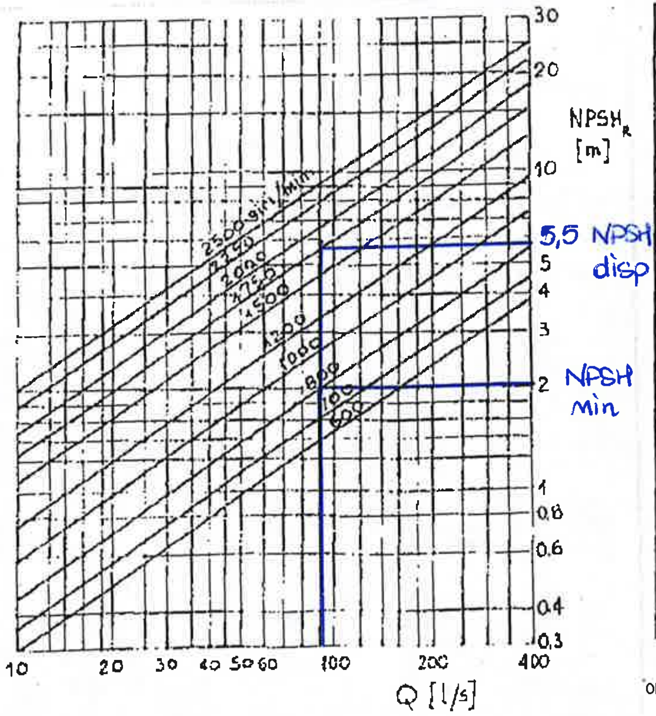
POLITECNICO
DI TORINO

Dipartimento Energia

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | ing. A. Poggio



5. Una pompa idraulica solleva 90 l/s di acqua fra due bacini, ruotando alla velocità di 800 g/min. La bocca di aspirazione è posta 3 m sopra il bacino di prelievo. La condotta presenta perdite di carico che variano con il quadrato della velocità della corrente e che, in corrispondenza della portata di 100 l/s, valgono (rispetto alla lunghezza della condotta stessa) Y / l = 0,6 m/m (metri di colonna di acqua per ogni metro lineare). Si assumano condizioni ambiente di 1 bar e 20°C. Con l'aiuto del diagramma e della tabella allegati si determini il valore di NPSH disponibile, per verificare che la pompa risulti in condizioni di cavitazione nelle descritte condizioni di funzionamento. Si valuti inoltre, a parità di portata, la massima velocità di rotazione compatibile con l'assenza della cavitazione.



p 10^{-3} bar	t °C	p 10^{-3} bar	t °C	p 10^{-3} bar	t °C	p 10^{-3} bar	t °C
0,00133	−74,33	1,33	−17,33	33,3	25,87	200,0	60,09
0,00267	−69,63	2,00	−12,84	34,7	26,63	213,3	61,40
0,00400	−67,08	2,67	−9,73	36,0	27,17	226,6	62,81
0,00533	−65,08	3,33	−7,18	37,3	27,79	240,0	64,08
0,00667	−63,50	4,00	−5,06	38,7	28,39	253,3	65,29
0,00800	−62,20	4,67	−3,24	40,0	28,98	266,6	66,44
0,00933	−61,08	5,33	−1,65	42,7	30,10	280,0	67,54
0,0107	−60,10	6,00	−0,22	45,3	31,16	293,3	68,60
0,0120	−59,23	6,67	1,21	48,0	32,17	306,6	69,63
				50,7	33,13	320,0	70,61
0,0133	−58,45	8,00	3,77				
0,0267	−53,14	9,33	5,98	53,3	34,05	333,3	71,56
0,0400	−49,90	10,7	7,93	56,0	34,93	346,6	72,48
0,0533	−47,55	12,0	9,68	58,7	35,77	360,0	73,37
0,0667	−45,68	13,3	11,24	61,3	36,58	373,3	74,24
0,0800	−44,15	14,7	12,68	64,0	37,36	386,6	75,07
0,0933	−42,83	16,0	14,03	66,7	38,12	400,0	75,89
0,107	−41,67	17,3	15,26	73,3	39,60	426,6	77,44
0,120	−40,64	18,7	16,42	80,0	41,53	453,3	78,93
				86,7	43,06	480,0	80,36
0,133	−38,71	20,0	17,81	93,3	44,40	506,6	81,67
0,267	−33,41	21,3	18,54				
0,400	−29,55	22,7	19,51	100,0	45,83	533,3	82,96
0,533	−26,74	24,0	20,43	106,7	47,10	560,0	84,18
0,667	−24,52	25,3	21,31	113,3	48,30	586,6	85,36
0,800	−22,67	26,7	22,15	120,0	49,44	613,3	86,52
0,933	−21,09	28,0	22,96	126,7	50,53	639,9	87,62
1,07	−19,70	29,3	23,72	133,3	51,57	666,6	88,66
1,20	−18,45	30,7	24,46	146,7	53,63	733,3	91,19
		32,0	25,18	160,0	55,34	799,9	93,51
				173,3	57,03	866,6	95,68
				186,7	58,60	933,3	97,71
						999,9	99,63

orino – Italia

alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

$$\varphi = \frac{w''_r}{u''} = \frac{3,183}{25,13} = 0,126$$

$$\psi = \frac{L_i}{\frac{u''^2}{2}} = 2(1+\varphi \cot g \beta'') = 2(1+0,0126 \cdot \cot g\, 120) = 1,85$$

$$L_i = \frac{\psi u''^2}{2} = \frac{1,85 \cdot 25,13}{2} = 584 \quad \frac{J}{kg}$$

$$\eta_y = \frac{gH}{L_i} \Rightarrow H = \frac{\eta_y L_i}{g} = \frac{0,78 \cdot 584}{9,81} = 46,4 \quad m$$

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_0} \Rightarrow P_0 = \frac{P_i}{\eta_m} = \frac{\dot{m} L_i}{\eta_m} = \frac{200 \cdot 584}{1} = 116,8 \quad \frac{kJ}{kg}$$

$0 \to 1)$ $$\underbrace{\cancel{L_i}}_{=0} = \frac{P_1 - P_0}{\rho} + \underbrace{\frac{C_1^2 - \cancel{C_0^2}}{2}}_{=0} + g(z_1 - \underbrace{\cancel{z_0}}_{=0}) + L_w$$

poiché è un condotto

$$\frac{P_0}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{C_1^2}{2} + g z_1 + gY$$

$$Q = C_1 A = C_1 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow C_1 = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,2}{\pi \cdot 0,28^2} = 3,25 \quad \frac{m}{s}$$

$$P_1 = P_0 - \frac{C_1^2 \rho}{2} - g z_1 \rho - gY\rho = 1 \cdot 10$$

$$= 1 \cdot 10^5 - \frac{3,25^2 \cdot 10^3}{2} - 9,81 \cdot 1,8 \cdot 10^3 - 9,81 \cdot 0,46 \cdot 10^3 =$$

$$= 0,725 \quad bar$$

$1 \to 2)$ $$L_i = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \underbrace{\frac{\cancel{C_2^2 - C_1^2}}{2}}_{=0} + g(\underbrace{\cancel{z_2 - z_1}}_{=0}) + L_w$$

$C_2 = C_1$
poiché Q non varia

$$L_i - L_w = \frac{P_2 - P_1}{\rho} \Rightarrow P_2 = P_1 + \rho(gH) = 5,27 \quad bar$$

$$P_{ass} = \frac{1}{\eta_p} gH\rho Q = \frac{1}{0,81} 9,81 \cdot 46,9 \cdot 50 = 28,4 \ kW$$

non ho condizione di isorendimento poiché il circuito è aperto, la caratteristica esterna non è una parabola passante per l'origine

$$\frac{Q}{n} = \frac{Q'}{n'} \Rightarrow Q' = Q \frac{n'}{n}$$

$$\frac{H}{n^2} = \frac{H'}{n'^2} \Rightarrow H' = H \frac{n'^2}{n^2}$$

$n = 2500 \ \frac{giri}{min}$ $\quad$ $n' = 2100 \ \frac{giri}{min}$

$$\begin{cases} A: & Q = 0, \ H = 90 \\ F: & Q = 180, \ H = 46,9 \end{cases} \qquad \begin{cases} A': & Q' = 0, \ H' = 63,5 \\ F': & Q' = 151,2, \ H' = 33,02 \end{cases}$$

p.to di funzionamento dato dall'intersezione tra circuito esterno (non variato) e caratteristica interna a $n' = 2100$

$$\begin{cases} Q' = 142 \ \frac{m^3}{h} \\ H' = 37 \ m \end{cases}$$

per trovare η'_p devo costruire una curva isorendimento, parabola passante per l'origine, che mi riporti alla curva di rendimento che ho già.

$$H = kQ^2 \Rightarrow k = \frac{H'}{Q'^2} = \frac{37}{(142/3600)^2} = 2,41 \cdot 10^4$$

↳ $\Delta z = 0$ poiché curve isorendimento sono in circuito chiuso!

$$k = 1,83 \cdot 10^{-3}$$

Q	H
0	0
50	4,6
100	18,25
200	72,98

trovo su curva H_1 fornita il p.to di intersezione con parabola isorendimento che corrisponde a trovare su H_1 (2500 giri) il p.to di funz. in isorendimento con H_2(2100)

$$NPSH_{disp} = \frac{P_a - P_v}{\rho g} - z_1 - Y_a =$$

$$= \frac{(1-0{,}0234)10^5}{1000 \cdot 9{,}81} - 3 - 1{,}46 = 5{,}5 \text{ m}$$

$NPSH_{min} = 2$

$NPSH_{disp} > NPSH_{min} \Rightarrow 5{,}5 > 2 \Rightarrow$ non ho cavitazione

dal grafico trovo n_{max}

$NPSH = 5{,}5 \Rightarrow n_{max} = 1750 \ \frac{giri}{min}$

di slip, che si oppone al normale flusso del fluido generando variazioni locali di velocità e pressione.

$$\begin{cases} p_{min} = p_1 - \Delta p \\ \Delta p = \lambda \rho \dfrac{w'^2}{2} \\ \dfrac{p_1}{\rho g} = \dfrac{p_0}{\rho g} - \dfrac{c_1^2}{2} - z_1 - Y_0 \end{cases}$$

$$\frac{p_{min}}{\rho g} = \frac{p_1 - \Delta p}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{c_1^2}{2g} - z_1 - Y_0 - \frac{\Delta p}{\rho g}$$

$$p_{min} \geq p_v$$

$$\frac{p_0}{\rho g} - \frac{c_1^2}{2} - z_1 - Y_0 - \frac{\lambda w'^2}{2g} \geq \frac{p_v}{\rho g}$$

$$\underbrace{\frac{p_0 - p_v}{\rho g} - z_1 - Y_0}_{NPSH_{disp}} \geq \underbrace{\frac{c_1^2}{2g} + \frac{\lambda w'^2}{2g}}_{NPSH_{min}}$$

Per rispettare questa condizione occorre minimizzare z_1 addirittura rendendo negativa per cui costruisco una pompa immersa.

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEI MATERIALI
Fondamenti di Macchine | ing. A. Poggio

ESERCITAZIONE | Compressori volumetrici

1. Un compressore volumetrico a stantuffo monostadio, avente cilindrata $V = 1000\ cm^3$ e grado di spazio morto $\mu = 0{,}1$ aspira aria dall'ambiente ($p_a = 1$ bar, $T_a = 300$ K) e funziona, in condizioni di regime, alla velocità di rotazione $n = 2000$ giri/min, con un rapporto di compressione $\beta = 5$ ed un rendimento meccanico $\eta_m = 0{,}85$. Determinare la portata di massa mandata e la potenza assorbita, assumendo, in prima approssimazione, condizioni di funzionamento ideali (fughe, laminazioni e scambi termici nulli, esponente della politropica di compressione uguale a quello della politropica di espansione ed entrambi uguali all'esponente dell'evoluzione isentropica).

2. Dato un compressore volumetrico a stantuffo monostadio avente le stesse caratteristiche e funzionante nelle medesime condizioni del compressore oggetto dell'esercizio 1, se ne vuole dimezzare la portata mandata. Si provvede quindi ad effettuare una delle seguenti regolazioni:
   A) variazione della velocità di rotazione;
   B) strozzamento all'aspirazione;
   C) variazione del volume di spazio morto mediante aggiunta di una capacità;
   D) riflusso all'aspirazione.
   Calcolare:
   - la nuova potenza assorbita per ciascuno dei sistemi citati;
   - la nuova velocità di rotazione nel caso A);
   - la nuova pressione a monte del compressore nel caso B);
   - il volume della capacità aggiuntiva nel caso C).

3. Un compressore a palette (6 palette) aspira aria ($k = 1{,}4$, $R = 287$ J/kgK) dall'ambiente (1 bar e 15°C) e la manda a 2 bar, con un rapporto volumetrico di compressione ρ pari a 2,5. Sapendo che l'esponente della trasformazione nella compressione graduale è $m = 1{,}35$, che la velocità di rotazione è $n = 1500$ giri/min, che il volume massimo di ogni vano in comunicazione con l'aspirazione è 0,5 dm^3, valutare la portata e la potenza assorbita all'albero ($\eta_m = 0{,}90$). Volendo ridurre del 30% la portata con laminazione del gas all'aspirazione, calcolare la nuova potenza assorbita.

4. Un compressore rotativo a palette con grado di spazio morto e laminazione alla mandata ed all'aspirazione trascurabili, avente rapporto volumetrico di compressione pari a 2,5, aspira aria dall'ambiente (98 kPa, 288 K) e la invia in un serbatoio a 588 kPa. Si assuma: esponente della compressione graduale pari a 1,35, rendimento meccanico $\eta_m = 0{,}90$, cilindrata totale $V_{tot} = 2000\ cm^3$, velocità angolare pari a 3000 giri/min. Calcolare la potenza assorbita dal compressore nella marcia a vuoto ($p_1 = p_2$) alla medesima velocità di rotazione, supponendo che le perdite meccaniche siano rimaste costanti.

$n = \frac{\omega}{2\pi}$

5. Un compressore Roots monostadio, non refrigerato, avente cilindrata complessiva $V_1 = 2000\ cm^3$, aspira aria nelle condizioni $p_1 = 100$ kPa e $T_1 = 290$ K, e la invia in un serbatoio alla pressione $p_2 = 180$ kPa, ruotando a 209,5 rad/s (con laminazioni alla mandata ed all'aspirazione trascurabili). Assumendo $\eta_v = 0{,}8$, calcolare la portata, il lavoro al ciclo, la potenza assorbita, la temperatura di mandata ed il lavoro per unità di massa ($\eta_m = 0{,}95$). Viene in seguito modificata la pressione di valle, portandola al valore $p_2' = 200$ kPa. Calcolare il nuovo valore del rendimento volumetrico e la corrispondente portata.

6. Due compressori Root adiabatici disposti in serie, comprimono 0,1 kg/s di aria da $p_1 = 1$ bar, $T_1 = 20$°C a 2,5 bar e 140°C. Tra i due stadi è interposto un interrefrigeratore che raffredda l'aria di 60°C. Calcolare la potenza assorbita ($\eta_m = 0{,}90$).

Dipartimento Energia
Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino – Italia
tel: +39 011.090.4485 fax: +39 011.090.4499
alberto.poggio@polito.it www.denerg.polito.it www.polito.it

ESERCITAZIONE 6 - Compressori volumetrici

(1) compressore volumetrico a stantuffo monostadio

$V = 1000 \ cm^3$

$\mu = 0{,}1$

$p_0 = 1$ bar

$T_0 = 300$ K

$n = 2000 \ \frac{giri}{min}$

$\beta = 5$

$\eta_m = 0{,}85$

condizioni funzionamento ideali

$\dot{m} = ?$

$P_{ass} = ?$

$$\dot{m} = m_m i \cdot n = \lambda_v \rho_1 i V n$$

$$\lambda_v = 1 - \mu\left(\beta^{\frac{1}{k}} - 1\right)$$

$k = 1{,}4$ e $R = 287 \ \frac{J}{kg K}$

$$pv = RT \Rightarrow \rho_0 = \frac{p_0}{RT_0} = \frac{1 \cdot 10^5}{287 \cdot 300} = 1{,}16 \ \frac{kg}{m^3}$$

$$\lambda_v = 1 - 0{,}1\left(5^{\frac{1}{1{,}4}} - 1\right) = 0{,}7843$$

$$\dot{m} = 0{,}7843 \cdot 1{,}16 \cdot 1 \cdot \frac{2000}{60} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 30{,}36 \cdot 10^{-3} \ \frac{kg}{s}$$

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_{ass}} \Rightarrow P_{ass} = \frac{P_i}{\eta_m} = \frac{\dot{m} L_{i,id}}{\eta_m}$$

$$L_{i,id} = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}\left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) = \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \frac{1 \cdot 10^5}{1{,}16}\left(5^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1\right) =$$

$$= c_p T_0 \left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) = 176{,}152 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$P_{ass} = \frac{30{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 176{,}152 \cdot 10^3}{0{,}85} = 6{,}29 \ kW$$

$$\dot{m}' = \underbrace{\left\{ 1 - \mu \left[\left(\frac{p_2}{p_1'} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] \right\}}_{\lambda_v' < 1} \frac{p_1'}{RT_1} V n$$

$\lambda_v' < 1$ (sempre! Anche in condizioni ideali)

$$\dot{m}' = \frac{1}{2} \dot{m}$$

p_1'	$\dot{m}'/\dot{m}$
0,6	0,4939
0,61	0,5063
0,605	0,5

$$\beta' = \frac{p_2}{p_1'} = 8{,}26$$

$$\lambda_v' = 1 - \mu \left(\beta_c'^{\frac{1}{k}} - 1 \right) = 1 - 0{,}1 \left(8{,}26^{\frac{1}{1{,}4}} - 1 \right) = 0{,}648$$

$$L_c' = \frac{k}{k-1} p_0' \lambda_v' V \left(\beta_c'^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1{,}4}{0{,}4} 0{,}605 \cdot 10^5 \cdot 0{,}648 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \left(8{,}26^{\frac{0{,}4}{1{,}4}} - 1 \right) = 113{,}6 \ \frac{J}{ciclo}$$

$$P_{oss}' = \frac{L_c' \cdot i \cdot n}{\eta_m} = \frac{113{,}6 \cdot 1 \cdot 2000}{0{,}85 \cdot 60} = 4{,}45 \ kW$$

c) $\dfrac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \dfrac{P_{oss}'}{P_{oss}} \Rightarrow P_{oss}' = \dfrac{P_{oss}}{2} = 3{,}145 \ kW$

$$\frac{\dot{m}'}{\dot{m}} = \frac{\lambda_v'}{\lambda_v} \Rightarrow \lambda_v' = \frac{\lambda_v}{2} = \frac{0{,}7843}{2} = 0{,}39215$$

$$\lambda_v' = 1 - \mu' \left(\beta^{\frac{1}{k}} - 1 \right) \Rightarrow \mu' = \frac{1 - \lambda_v'}{\beta^{\frac{1}{k}} - 1} = 0{,}282$$

$$\mu' = \frac{V_{min}'}{V} = \frac{V_{min} + V_{odd}}{V} = \mu + \frac{V_{odd}}{V} \Rightarrow$$

$$V_{odd} = (\mu' - \mu) V = (0{,}282 - 0{,}1) \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1{,}82 \cdot 10^{-4}$$

d) $P_{oss}' = P_{oss}$ faccio lavorare la macchina nelle stesse condizioni ma ottengo la metà.