

RENDIMENTI: $\eta = \frac{L}{\Delta} = \frac{\Delta E_{\text{em}}}{\Delta}$; no a me interessa Pp.

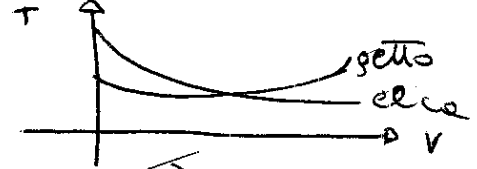
Comparab Elica - getto :

$$\eta = \frac{\Delta E_e}{Q} = \frac{\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)}{Q} = \frac{T(v_2 + v_1)}{2Q} \Rightarrow \boxed{T = \frac{2Q\eta}{v_2 + v_1}}$$

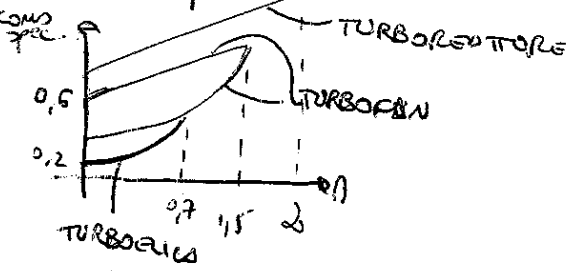
Se $\eta_{elica} = \eta_{getto}$ e $v_{volo} = .$:

elica $v_2 \sim v_{volo}$ (10-15% di v_{volo})
 getto $v_2 \gg v_{volo}$ (anche $\geq 100\%$)
 } $v_2 e \ll v_2 g$

In decollo $v_1 = 0 \rightarrow \boxed{T_e \gg T_g}$



Dopo decollo : quando $v_1 \uparrow$
 X elica : $v_1 + v_2 \uparrow \Rightarrow T \downarrow$
 X getto : $v_2 \text{ resta } \gg v_1 \rightarrow T \text{ non varia Poiché } T \sim \text{cost.}$



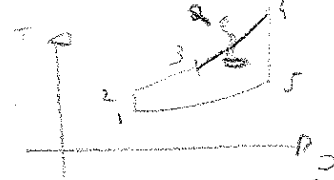
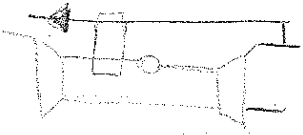
- Turbopisti semplici : $\eta_p \approx 0,4$; $\eta_T \approx 0,2$
- Turbofan : $\eta_p \approx 0,6$; $\eta_T \approx 0,2$
- Elice insublate : $\eta_p > 0,7$; $\eta_T \text{ alt}$

$\eta_c \approx 0,2$ cross rapporto bypass
 $\eta_c \approx 0,3$ alt " "

cicli

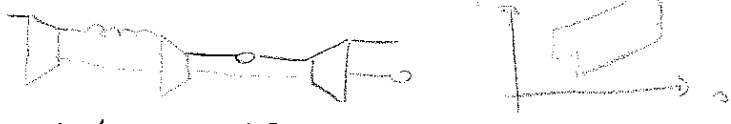
CICLO RIGENERATIVO :

Aria calda che esce da turbina viene mandata in scambiatore di calore - Q. Sto fluido u's calda flusso che esce da compressore \Rightarrow flusso $h_e T_+$ alle pareti e in camera combustione \Rightarrow si costa Q da 3 a 4 (non + de 2 a 4).
 X brlo $T_5 > T_2$



CICLO CON ITER-REFRIGERAZIONE :

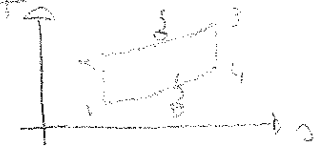
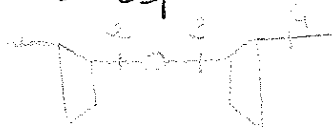
Fluido entra in compress. Poi va in scambiatore dove sua $T \downarrow \rightarrow$ l'altro 2° compress è $\leftarrow \rightarrow$ a potenza disponibile



CICLO CON RECUPERO : Dopo espansione segue altra con P. ...

CICLO IDEALE.

- Cp
- no perdite per
- no dispersione
- fluido mantiene sue proprietà durante ciclo
- no Δ massa durante processo
- processi espansione & compress: adiabatici e isentropici



$$\eta_T = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = \frac{c_p (T_3 - T_2) - c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)}$$

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

$\beta = \text{rapporto di compressione} = P_2$

$$\Delta H_T = \int_{T_0}^T c_p dT + \Delta H_f$$

ΔH_f = entalpia di formazione (quella degli elementi + formare composto)

POTERE CALORIFICO: $\Delta H_{f,c} - \Delta H_{p,c} = PC$
 Max potenza energia resa disponibile da combustione

Perdite per durante processo di combustione (perdute + dissipazione)

$$\eta_p = \frac{P_{E3}}{P_0} \quad (NO, qg) \quad \text{RENDIMENTO PNEUMATICO}$$

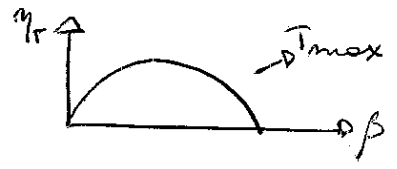
ma da perdita per in camera combustione

N.B. Condotta a sezione cost \rightarrow no change T

$$\frac{P}{A} \quad P \perp \text{profil} : P_1 + \rho u_1^2 = P_2 + \rho u_2^2 \quad \rightarrow \quad P_1 + \rho u_1^2 = P_2 + \rho u_2^2$$

$$T = (P_2 - P_1) + \rho(u_2^2 - u_1^2) = 0!$$

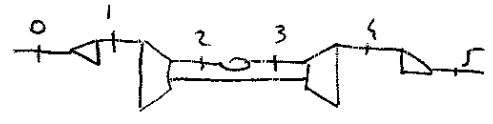
ANDAMENTO: η_{res}



$$\eta = \tilde{\eta}_T(\beta, T_{max})$$

Calcolo del ciclo

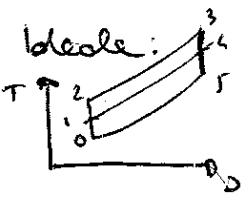
Fisso $\begin{cases} P_{max} = P_2 \\ T_{max} = T_3 \end{cases}$



HP: $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, NO \Rightarrow$

$$\text{in } 1, 2, 3, 4 \quad X_D = X_T$$

! No in 0 e 5!
 poi $v_1, v_5 \neq 0!$



0-1: $h_0^2 + \frac{v_0^2}{2} = h_{T1} = h_1 = c_p T_1 \Rightarrow T_1$
 $\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow P_1 = P_{T1}$

1-2: P_2 data
 $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_2$

2-3: T_3 data
 $P_3 = P_2$

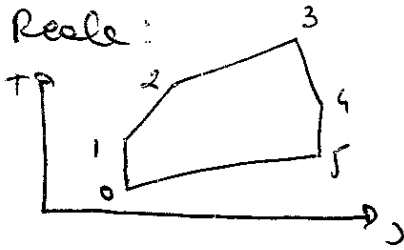
$Q_{in} = h_3 - h_2 = m_c \Delta H$ $\frac{m_a}{m_c} = 2$

3-4: $L_c = L_T \rightarrow c_p(T_3 - T_4) = c_p(T_2 - T_1) \Rightarrow T_4$
 $\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow P_4$

4-5: $h_{T4} = h_{T5} = h_5 + \frac{v_5^2}{2} \Rightarrow v_5 = \sqrt{2c_p(T_4 - T_5)}$

$$\frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{P_4}{P_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_5$$

(3)



0-1: adiabatico SF

$$c_p T_1 = c_p T_0 \Rightarrow T_1 = T_0$$

$$\varepsilon = \frac{P_{T_1}}{P_{T_0}} + P_{T_1} = P_1 \Rightarrow P_1 \quad (P_1 < P_0 \times \text{dissipazioni})$$

$$1-2: \frac{T_{2i}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_{2i}$$

$$\eta_{AD_e} = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2$$

$P_2 = \text{fissato}$

2-3: $P_3 = P_2$ (anche se in realtà sarebbero \neq)

$T_3 = \text{fissato}$

$$h_{T_3} = h_{T_2} + Q \Rightarrow Q \Rightarrow \text{inc de usura}$$

$$3-4: L_T = L_c \Rightarrow c_p (T_3 - T_{4i}) = c_p (T_1 - T_2) \Rightarrow T_{4i}$$

$$\eta_{AD_T} = \frac{T_3 - T_{4i}}{T_3 - T_4} \Rightarrow T_{4i}$$

$$\left(\frac{T_3}{T_{4i}}\right) = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow P_4$$

$$4-5: h_{T_4} = h_{T_5} \Rightarrow h_{T_5} = h_5 + \frac{v_5^2}{2}$$

$$v_5 = \sqrt{2c_p (T_4 - T_5)}$$

$P_5 = P_0$

$$\frac{T_4}{T_{5i}} = \left(\frac{P_4}{P_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_{5i}$$

Altro caso $\eta_u \Rightarrow T_{5i}$

Incremento spinta

$$T = \dot{m} \Delta v \begin{cases} \uparrow \dot{m} \\ \uparrow \Delta v \rightarrow \uparrow v_{effluenza} \\ \uparrow m e \Delta v \end{cases}$$

- INIEZIONE LIQUIDO IN COMPLEX. \uparrow massa e \downarrow calore complex. Δ Le goccioline impattano impalettate: pl.
- INIEZIONE LIQUIDO IN COMBUSTORE. Δ cost \uparrow anche combustibile. \downarrow locali temp. \rightarrow \downarrow ossidi d'azoto.
- POST-COMBUSTIONE. $\uparrow T_{max} \Rightarrow \uparrow v_{effl.} \Rightarrow \uparrow T$
- Post-comb. + iniezione acqua in complex o in combustore ($\uparrow m e \uparrow v$)
- COMBUSTORE AUSILIARIO. Qui arriva aria da complex. Brucia $\Rightarrow \uparrow T$ (anche turbo).
Nagar' posso anche iniettare acqua in combust.
- TURBOREATTORI A DOPPIO FLUSSO. : e' altra categoria. Δ $\frac{T_{ds}}{T_{sempre}} = 2$. (risparmio peso)

meglio \downarrow

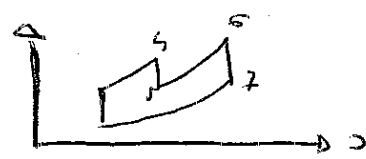
iniezione acqua in combustore: solo in decollo $\uparrow \uparrow$ d' 30-40%
 iniezione acqua in complex. $\downarrow L e \uparrow v_j$
 post-combustione $\uparrow \uparrow$ d' 50-60% (in teoria anche d' 100%)

Post-combustione

\uparrow consumi specifici

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_1 Q_1}{Q_{int}} + \frac{\dot{m}_2 Q_2}{Q_{int}}$$

$\dot{m}_2 < \dot{m}_1$: penalizzazione di η_{TOT} .



$$\frac{v_7}{v_1} = \sqrt{\frac{T_6}{T_4}}$$

Turbo motore a doppio flusso

- A FLUSSI ASSOCIATI: i 2 flussi vengono mischiati 1° di usare
- A FLUSSI SEPARATI: flusso secondario va direttamente a esterno.

Parametri caratteristici:

RAPPORTO DI BYPASS = $\frac{\text{concentr. esterna}}{\text{concentr. interna}}$ $\begin{cases} 6-7 \text{ flussi separati} \\ 1 < 1 \text{ flussi associati} \end{cases}$

RAPPORTO DI COMPRESSIONE DEL VENTILATORE - 1,3 flussi separati

Nel separato le 2 concent. sono completamente indipendenti
 Nell'associato no. Bisogna che le press. statiche siano = : $p_7 = p_8$.
 Determinanti aree dei canali d'aria nelle turbine dove le 2 concent. si mescolano: MIXER.

$\uparrow \uparrow T_{out}$. $\eta_{prop} \uparrow$ $\left\{ \begin{array}{l} x \text{ Ecm in uscita } \downarrow \text{ turbo (infatti)} \\ \eta_p = \frac{2v_0}{v_j + v_0} \end{array} \right.$

Da qui η_{prop} non si calcola con j. STE formula

Velocità precedente da diffondere: 2 funzioni \rightarrow vel (T_{P3})
 velocità flusso:

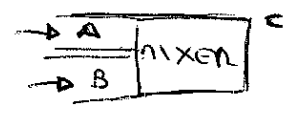
Lo stesso di avere prof. velocità \times ingegner bene le palette
 Rapporto bypass < 1

Assomiglia a turboreattore semplice.

Ma è compromesso fra η_{prop} alto e alte prestazioni.
 A vel bassa le prestazioni $>$ di turboreattore semplice

macchine destinate a vel supersonica.

Per: toma mescolamento delle vglie $P_3 =$



dimensionare sezioni A e B d'ingresso / $P_3 = P_3$

$\dot{Q}_{TOT} ? \Leftrightarrow h_{TA} + h_{TB} = h_{TC}$

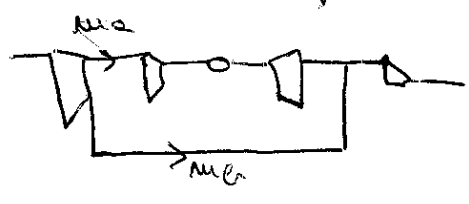
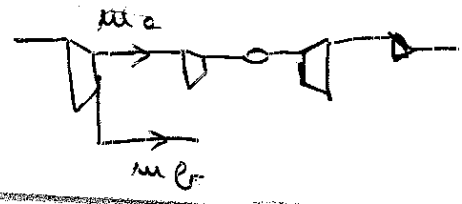
$\dot{Q}_{P_{TOT}} ? \Leftrightarrow \dot{m}_C = \dot{m}_A + \dot{m}_B$

$\dot{m} = \frac{\Delta c P_{TC}}{\gamma T_c} \sqrt{\frac{K}{R}} \left(1 + \frac{K-1}{2} \Lambda c^2\right) \Lambda c^{-\frac{K+1}{2(K-1)}}$

$\dot{m} = \rho \Delta V$

$\Lambda c \Leftrightarrow$ eq. q.m. \times volume controllo:
 $Q_{out} - Q_{in} = \dot{m} \times$ spaccate

$\dot{m}_A u_A + \dot{m}_B u_B - \dot{m}_C u_C = P_c \Delta c + P_B \Delta B + P_A \Delta A$
 $\dot{m} u = \Delta p \Lambda^2 K$



$BPR = \frac{\dot{m}_C}{\dot{m}_a}$

$= 3 \div 6$

\uparrow valore max \rightarrow attuali possibilità di palette
 riferito a macchine di dm. $>$ attualmente
 comune. \uparrow BPR: \uparrow dim palette!

$B_f =$ rapporto compress nel ventilatore $= 1,5 \div 2,5$

($T_{max} = 40/50000$ Kg \rightarrow pressione in croce $= 3$ m.)

BPR } loro accoppiamento \Rightarrow minimo consumo specifico.
 B_f }

Com. spec. $\approx 0,4 \div 0,7$: \ll di turboreattore semplice (\times lo η_{p} alto)

Fluss associati: $BPR = 0,2 \div 0,3 < 1$
 $B_f = 2 \div 3,5$

↓
 x trasporto ipersonico.

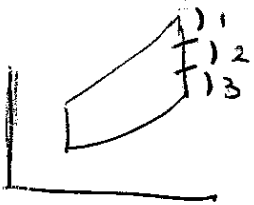
Turboelica

Turlina a gas $\Rightarrow E_{mecc}$ $\begin{cases} \rightarrow$ muovere compressore
 \rightarrow muovere elica.

↓
 migliore d' motore alternativo x a parte di consumi specifici, peso -.

Turlina ha 3 moti $\begin{cases} 1 \} \text{ Trascinamento compressore.} \\ 2 \} \\ 3 \} \text{ Turlina libera. Trascinamento elica} \end{cases}$

1/3 giri elica \ll n. giri compressore. Costo ~~non~~ necessario di riduttore fra turlina ed elica

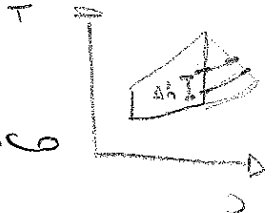


- 1) : fascina compressore
- 2) : fascina elica
- 3) : getto di conico espulso che contiene T

1) + 2) + 3) = espulsione in turlina.

(ciclo calcolato come quello di turboreattore semplice)

Divido solo cubico turlina $\begin{cases} (1-\alpha)\Delta h_i & \text{elica} \\ \alpha\Delta h_i & \text{velocità scivolo} \end{cases}$



$P_{Tg} = (1 + \frac{f}{2}) V_{velo} (V_5 - V_0) = \text{potenza al getto}$
 90% : fascina \rightarrow vel efflusso
 $P_e = \text{potenza elica}$
 $P_g + P_e = P_T \text{ propulsiva!}$

$P_e = (1-\alpha)\Delta h_i \cdot \eta_{ad} \cdot \eta_g \cdot \eta_{elica}$

solo teorico a quello

rendimento riduttore $= V_0 \sqrt{2 \eta_{velo} \alpha \Delta h_i} - V_0^2$

Quotientino /: somma delle $P_g + P_e$ è ottimizzata $= \frac{\eta_u V_0^2}{2 \Delta h_i (\eta_e \eta_g \eta_{ad})^2}$

$V_0 = V_{cruise}$

$\eta_u = 0,97$ $\eta_e > 0,9$ $\eta_g > 0,9$ $\eta_{ad} \approx 0,85$ Δh_i quello tipico e di spinta del

\Rightarrow Quotientino $= 0,1 \div 0,2$: mi dice come dividere solo cubico x ottimizzare la potenza

80% \Rightarrow elica
 20% \Rightarrow getto

Confronto AirCoelica - Turbopgetto

$$P_{T\text{-getto}} = \underbrace{\sqrt{2\eta_m \Delta h_i}}_{v_j} \cdot v_0 - v_0^2 \Rightarrow P_{T\text{-g max}} \text{ a } \frac{dP_{T\text{-g}}}{dv_0} = 0$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{2\eta_m \Delta h_i} = v_0 = \frac{1}{2} v_j$$

! Buona approssimazione

$P_{T\text{-max}} \sim \eta_m \Delta h_i$

$$P_{Te} = \eta_{pe} \eta_c \eta_{ad} \Delta h_i$$

con $\alpha=0$: potenza va tutta a elica (+ semplice!) $\eta_{pe} \approx \eta_c \approx 0,9$

$$P_{Te} > P_{T\text{-max}} \Rightarrow \eta_{pe} > 0,6$$

$$P_{Te} > P_{T\text{-max}} \Leftrightarrow \eta_{pe} > 0,6 \quad \Leftrightarrow \eta_{pe} > \frac{1}{2} \text{ a } \alpha = 0,6$$

Progetto di v_j 1 $\Delta(\Delta R_i) \Rightarrow \Delta$ caratteristiche ciclo $\Rightarrow T_B \neq T_{max}$

Statorattore

Devo $f_{T \text{ max}} \times$ sezione combustione

- 2 modi:
 - compres da $E_{in} \Rightarrow \text{max } T$
 - compres da $E_{mecc} \Rightarrow \text{max } T$

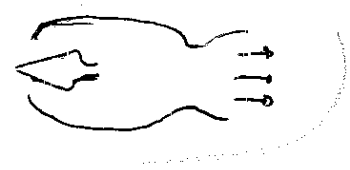
0.23 : compres inziale \times riduzione max rich. in

presa d'aria o diffusore - camera combustione - ugello scarico
dove vel \downarrow

- Vantaggi:
 - peso $<$ di turboreattore
 - costo 10 volte $<$ di propulsore con T.
- Per:
 - non mescolano a parte da sole
 - rendimenti logorimevoli per $\Lambda = 3 \div 4$

S.l. convenzionale:

fluido rullato da
super e mlt amico
in camera comb.



S.l. non convenzionale: in camera comb. Lo vel super-sonica
condizione d'impersonica

$\Lambda > 5/6$ devo farlo!

Per: tempi ridotti, pl. di mescolamento

Sono obbligate a farlo \times : se vel $\downarrow \rightarrow T \uparrow$ turb ($\Lambda_1=10 \rightarrow \Lambda_2=1, \rightarrow T_2=3000$)
e non avviene combustione
 \times tutta energia serve a dissociare
~~flusso~~ combustibile (T troppo alta)

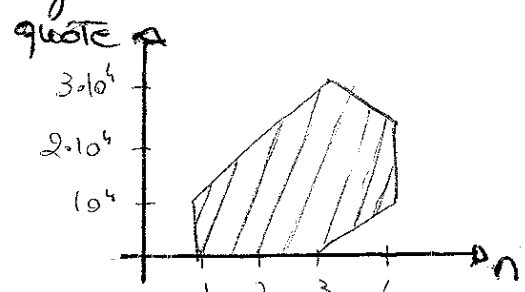
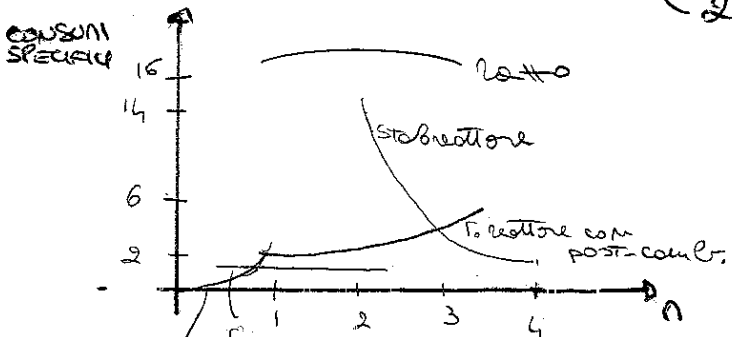
o. Racine convenzionale essere per $\Lambda \text{ da } 4 \div 5$

Consumi specifici $\Lambda 2 \div 3$

\Rightarrow c.o. di turboreattore semplice

\times $\beta f > 200$ con $\Lambda \Rightarrow$ consumi sono vincolati

2:3 volte + grande anche in cond. d'ine



COMPONENTI TURBOREATTORE

dinamici

statici

TURBINA
COMPRESSORE

DIFFUSORE
UGELLO } $h = \text{cost}$: No scambio energia

Raggiungono obiettivo
con movimento relativo
fra elementi

CANALI COMB. $\neq h$ variabile : introduce \neq
No parti mobili

Camera combustione

Campletta indipendente da potenza motore
Dimensione sezione $\propto \frac{1}{\text{potenza}}$

COMBUSTORE TURBOCOMA:

- ~~combustione~~ combustione completa - Rendimenti = 98-99%
- Basse perdite d'irraggiamento : \leq del 5%
- Stabilità : fiamma non si deve spegnere.
Se lo fa deve riuscire a riaccenderla
- Profilo di temp. che entra in camera deve essere regolare
- Affidabilità - resistenza
- Ampio campo operativo
- Elevate intensità di combustione (quantità comb. liquido / volume $\frac{1}{\text{max. ora}}$)

$$I \approx 10^8 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{h}}$$

Es: $p = p_{\text{atm}}$, $I = 10^8$, combustibile = idrocarburo con potere = 10^4 kcal/kg
 \Rightarrow liquido 10000 kg/h : efficiente!

I prodotti combustibili che si creano devono garantire rendimenti di
Voglio completa ossidazione del combustibile

Devo fare serie di processi, che occupano certo tempo
°° parametro fondamentale = tempo di occupazione x frazione p.c.°°

Tempo residente in combustore : $\tau_r = \frac{\text{Volume comb.}}{\text{in entrata}} = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$

Di solito $\frac{\text{ora}}{\text{combustibile}} = 40$ ora = $40 \cdot 10^4$ |
comb = $1 \cdot 10^4$ | frazione $\approx \frac{400 \cdot \text{m}^3}{2}$ entranti

$\tau_r = \frac{V}{\dot{v}} = \frac{1}{400} = 0,025 \text{ s} = 2,5 \text{ ms}$! l'ora dell'N dei ms!

↑
in p. sto tempo fra tutti i processi di combustione.

Reazione con combustione: $1 A + O_2 \rightarrow AO_2$ $\Delta = \text{comb. in gas} + \text{aria}$

Δ mescolo fiamma

$\downarrow \rightarrow \Gamma = \Gamma_{O_2} + \Gamma_{N_2}$ ($\Gamma \gg \Gamma_{O_2}$)

A in fase liquida: x è solubilità relativa, il vapore si mescola con aria e lo combustione.

Na $Ca > \text{pore dei combustibile non funziona così}$
Se faccio così: 10^4 comb. , 1R crucio $\frac{1}{100}$: poco!

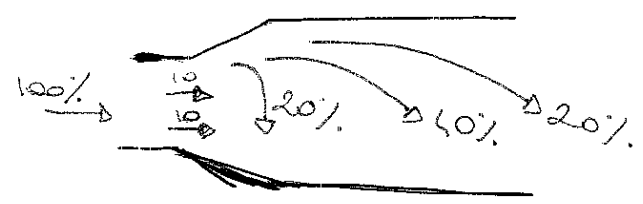
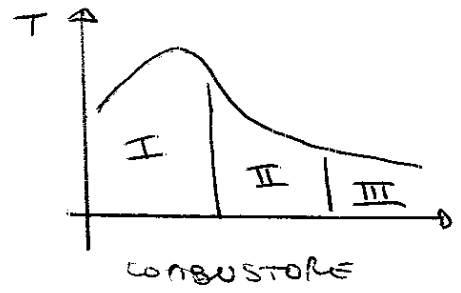
Allora: devo vaporizzare il combustibile: atomizzazione!
Così \uparrow sup. libera di comb., che è a contatto con aria si vaporizza.

Si fa in atomizzatore: spruzza comb. in camera /° in fiamma

Zona combustiva
Aria sech.
Reazione

- zona secondaria
Entra aria, x ↓
Temp.
Avergono le ultime
reazioni

- zona terziaria
Entra aria de port
Temp ↓ fino a valori
accettabili de fulmine



3)



Combustore a iniezione
+ Cesseri
+ semplici
+ usati

qui posso avere 2
iniettori (costano più)
→ 2 sistemi:
pilota, serve al minimo
principale: si usa a
carichi potenti

(15)

Combustore a vaporizzazione: il comb. viene mandato in condotti
dove si vaporizza.
↳ dim. elevata
controllo meglio missiviale
profilo è difficile da mettere p.to.

Accensione. → volume minimo sotto il quale non avviene.
 $x' : x \pm vol \Rightarrow$ Energia \propto com^3 , Q scalato \propto com^2 .

Disparte minima = disparte d'attivazione
Energia / vaporizzatore comb. (nmj)
immescare reazione

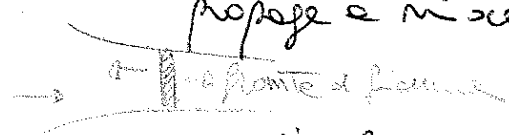
Accensione dovuta da miscela ricca $x < L_0 +$ energia.

Accensione fa bruciare miscela, poi si spegne e la nuova miscela che
arriva a bruciare x contatto con p. sta.

Secondo meccanismo di stabilizzazione di fiamma x nuova fiamma
spregue

Velocità di combustione (nm): vel con cui ondata di bruciare si
propaga e miscela fresca

+ vel fluido



posizione fronte dipende da valore relativo fra vel miscela e vel fiamma

$v = v_f$: fronte ferma

$v_f > v$ fronte si propaga lungo miscela

$v_f < v$ (di solito): fronte va a ds: verso i gas già combusti

accensione di fiamma. Pr: ~~accensione~~ c?

→ metto tutto isolamento intorno a comb. x stabilizzare fiamma

Devo dare energia ~~adossamento~~ tutto il tempo di accensione

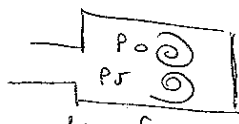
Tempo residenza miscela $t_r >$ tempo accensione

~~modelli vortice in modo di far scendere energia scaldando la
miscela in serie:~~

Scopo della iniezione: prodotti finiti restano + a lungo in camera /; fra-mettano colore ai nuovi arrivi.

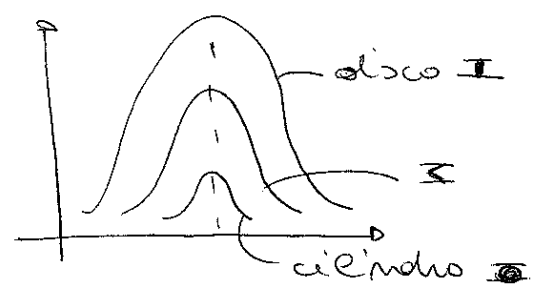
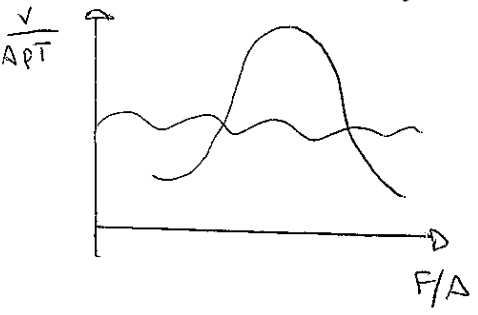
Come? Oro miscelo d'aria: aria arriva con $\left\{ \frac{V_a}{V_f} \right\}$ + palette

⇒ campo max del T addosso verso esterno:



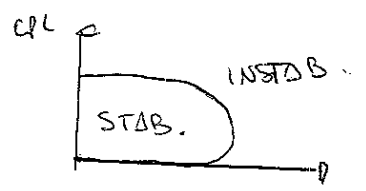
Quando fluido esce: $P_0 > P_1 \Rightarrow P_0$ viene richiamata dentro ⇒ miscelo

⇒ iniezione fine.



$CPL = \frac{\text{inertance}}{\rho \cdot \text{volume combustibile}} = \text{parametro d'inerzia}$

mi dice se riesco a operare stabilmente o no:




$\left. \begin{matrix} P_{ex} \\ T \end{matrix} \right\} \Rightarrow \text{Cuglietta (NO, 3 \div 0,5 \mu)}$

Bilancio: $h_{T1} = h_{T2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$

$h = e + \frac{P}{\rho} \rightarrow \frac{P_1}{\rho} + e_1 = \frac{P_2}{\rho} + e_2 + \frac{v_2^2}{2}$ $P_1 = P_2$ (incomp.) = P
 $e_1 = e_2$

$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \Rightarrow v_{effluvio} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}$ da orificio

$\dot{m} = v \rho A_u = A_u \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}$

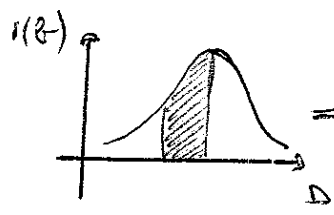
$A_u = \text{area utile}$; solo parte di sezione è usata x uscire: 

Coefficiente effluvio: $C_e \leq 1$

$C_e = \frac{A_u}{A}$

$\dot{m} = C_e A \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}$

iniettori:



⇒ diametro \neq a 2° di iniettore.

Aglio avere gocce con diam \neq , altrimenti tenderebbero a combinarsi in gocce omogenee.

Sistemi usati x iniezione:

Atomizzazione a getto ΔP fra pompa e pest.

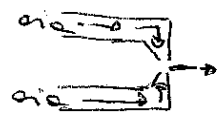
raggio gocce = $R = 100 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\bar{x}}\right)^m$

2) Atomizzazione a corrente d'aria. (La + usata)

Completamento atomizzazione a $p_{ex} < p_{in}$ bar.

Interazione fra comb. e aria subito in sezione uscita:

+ alta press. d'aria \rightarrow + piccole gocce



3) Atomizzazione a vaporizzazione. Combust. vaporizz. 1° d'arrivare

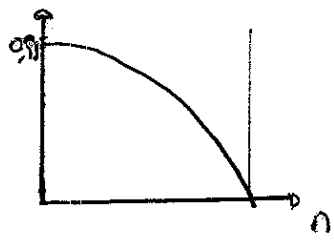
in camera di comb. \Rightarrow posso fare camere + piccole (30-40 cm)

De pl. d'essere a p.T.

Così la situazione + omogenea in camera comb.: controllo produzione d'ossido d'azoto.

4) Atomizzazione a centrifuga Comb. va in pompa che viene fatta girare e poi esce

$\frac{P_{uscita}}{P_{entrata}}$



$n < 0,1$ per avere $\frac{P_u}{P_i} > 0,95$

$v_{impulso} \approx n \cdot 10 \div 20 \frac{m}{s}$

Altrimenti: perdite $p_{ex} \Rightarrow \downarrow T$

$n_u \approx 0,2 \quad v_u \approx 100 \div 150 \frac{m}{s}$

(Nel post-combustore: $n_i \approx 0,2 \div 0,3$ e $n_u \approx 1$: vicino a saturazione)

°° Parametri di progetto di combustore:

- Φ rapporto di equivalenza
- CPL: parametro di carico. CPL dentro zona stabile
- I [kg/m^2h] intensità di combustione
- velocità di riferimento ($20 \div 30 \frac{m}{s}$). con cui permette di valutare sezione ingresso
- $\frac{L}{h} = 2,5 \div 3,5$ $\frac{Cappella}{Corghetto}$
- velocità di ingresso = $10 \div 15 \frac{m}{s}$ (in testa combustore ho forte diffusione e può \uparrow di 6/7 volte)
- velocità che esca dai fori su sup. laterali = $40 \div 50 \frac{m}{s}$ con p. π vel e mi dimensiono i fori
- numero e spartitura dei diffusori. Spartitura \approx sezione condotto
- Iniettori: costruiamo al 25% di portata totale. Tale da non compromettere atomizzazione.
- PF = $0,25 \div 0,45$
- eff. $\approx 1,04 = 1,08$ } rispetto temp uscita

Combustione nel post-combustore

+ semplice del principale: dopo non ho turbinia \Rightarrow

A/F \approx stech.
T + al \bar{e}

Volume + al \bar{e} : $I_{p,c} < I_{p,mc}$; (ciclo veloce)

Caratteristiche:

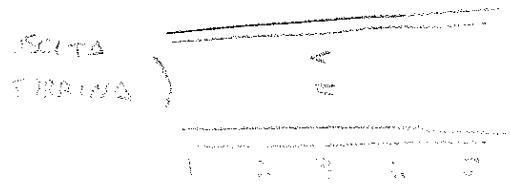
- elevate T ≈ 2000 K
- basse perdite di carico
- basse perdite di mex
- deve modulare temp e quantità combustibile
- alta elevata efficienza di combustione $> 95\%$
- semplice e peso contenuti
- possibilità di riaccensione anche in quota
- affidabilità
- assenza di instabilità di combustione

Instabilità = quando comb. si accende genera onde di mex, che si sovrappongono alle onde già presenti \Rightarrow risonanza $\Rightarrow \uparrow$ mex \Rightarrow esplosione.

∴ progetto /: frequenza propria onde pux ~~non~~ presenza non coincide con quelle di combustione

↓
fore piccole cavità = risuonatori di Helmholtz

hanno $\frac{sup}{volume}$ alto e osservano le oscillazioni di pux.



1: diffusore - rallenta fluido fino a $\lambda = 0,2 \div 0,3$

2: sistema d'iniezione.

Insieme d'anelli (1,2).
Combustibile spraz + a camera x
feulbu mescolamento.

3: stabilizzazione di fiamma

4: zona di combustione - È circondata da pareti (liner) x smorza
fore oscillazione.

Tutta l'aria di raffreddamento arriva subito a 4 fra le 2 pareti x
non mi serve raffreddare tutto.

5: ugello scarico. A geometria variabile x i post-c.

Rapporto di bloccaggio = $0,2 \div 0,3 = \frac{\text{area stabilizzazione}}{\text{area totale}} = \frac{S_s}{S_c}$

lunghezza deve essere /: da quella di zona mescolamento a quella di
max max.
compr. di pux non
comprometto stabilizzazione di fiamma

Parametri di progetto

- \bar{P} max = 0,5 in camera (a arrivo con bulle sia $\lambda +$)

- $N_{ingresso}$ 0,2

- $\frac{S_s}{S_c}$ 0,2 : rapporto bloccaggio

- lunghezza = 0,9 ÷ 1,3 m

- I_{NOx} 10^8 kcal / 10^3 l =

1° Radiali = modello di turbine

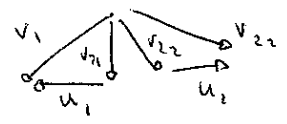
Posso usare E_{in} scivolo e non usarla.

$$\eta_{con E_{in}} = \frac{L}{h_{T0} - h_{T2i}} = \frac{h_{T0} - h_{T2}}{h_{T0} - h_{T2i}}$$

$$\eta_{ideale} = \frac{h_{Tf} - h_{T1}}{h_{T1} - h_{T2i}} = E_{in scivolo} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{v_1^2 - Rv_2^2} \quad \uparrow \text{ con } R \downarrow$$

Il 1° stadio vengono fatti con $R=0$ \times permette di sfruttare \rightarrow solo cubipico

$R=1/2$: i due velocità sono simmetriche.



$R=1$: $v_1 = v_2$

$R < 0$: $v_2 < v_1$: il motore funziona da diffusore

$R > 1$: $v_2 > v_1$: $E_{in scivolo} > E_{in ingresso}$

Branchi : in ad, in giri ad.

Per d' sollecitazioni termiche delle pale.

Con pale raffreddate posso arrivare $T \approx 1500 \div 1700$ K

Ovvero : / $\left\{ \begin{array}{l} \text{leghe + usine} \\ \text{raffreddare pale} \rightarrow \text{come?} \end{array} \right.$

Posso fare pale cave e denti come sia + fredda che esce da fori di pale e si meschia a fluido

$$\dot{Q} = \frac{T_{gas} - T_{m, metallo}}{T_{gas} - T_{aria raff.}} \quad \approx 0,5 \text{ di idea d'efficacia raffreddamento}$$

Sollecitazioni aerodinamiche . $\approx 1/2$ delle centrifughe

Si mescolano a controllare bene con forme pale

Stadio = parte fissa + parte mobile
Unità elementare di turbomacchine

- ↳ parte fissa: palette fissa x induttore fluido
- ↳ parte mobile: due ariete scambio energetico
(anche 30/40 stadi x macchine assiale)

Compressore:

centrifugo

assiale

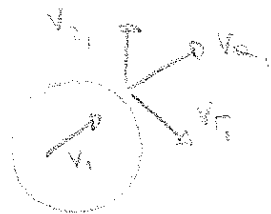
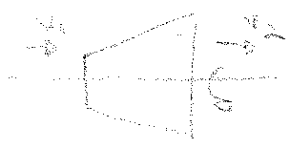
- Progetto semplice
- Sezione frontale \rightarrow sezione catura
↓
rapporti spinta - sezione frontale bassi
- Difficile mettere in serie + stadi
↓
emite a prestazioni
- $\beta = 4 \div 5$ (alò)

- progetto difficile
- sezione frontale = sezione catura
- Facile mettere in serie gli stadi
- $\beta = 1,3$ # stadi
↓
devo mettere tanti stadi x avere
come prestazioni.

Turbina:

Di solito è assiale.
per per fonti di tipo termico.

in generale:



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 v_1 r_1$$

$$\dot{m}_2 = \rho_2 v_2 r_2$$

$$\rho_1 v_1 r_1 = \rho_2 v_2 r_2 = \dot{m} \rightarrow$$

$$\dot{m} \omega = \dot{m} (\rho_1 v_1 r_1 - \rho_2 v_2 r_2) = \text{potenza per unità di massa}$$

$u_1 = \text{vel lineare rotazione} = \text{vel. di traslazione medio}$

$$\dot{P} = \dot{m}_1 u_1 v_{1t} - \dot{m}_2 u_2 v_{2t} = \frac{P_{TOT}}{\dot{m}} = H \quad \text{FORMULA EULERO}$$

energia scambiata dipende da vel rotazione!


$\dot{m}_1 > \dot{m}_2 \Rightarrow H \oplus$: Turbina

$\dot{m}_1 < \dot{m}_2 \Rightarrow H \ominus$: compressore

TURBOMACCHINE:

Interazione dinamica fra fluido e macchina \Rightarrow forte \Rightarrow scambio energetico

- compressore: macchina che cede energia a fluido: $T_{pre} > T_{OT}$
- Turbina: sottrae en. mecc. a fluido. Assume p. di energia ad albero \times al motore compressore.

Equazioni. Unico scambio = L \rightarrow 

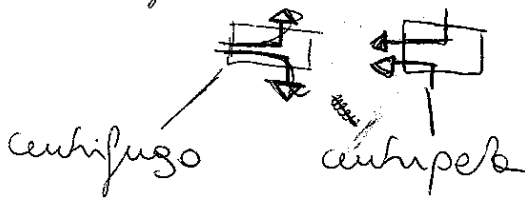
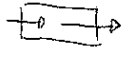
$L = h_{T2} - h_{T1} = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$ (fanno quando lo turbine a pale rotanti date \Rightarrow lo sottrazione di calore da turbine macchina!)

Turbomacchine: scambio energia con rotazione di parti meccaniche attorno ad albero.
 Disco in cui ~~non~~ monti corpi che interagiscono con fluido \Rightarrow si sviluppano forze che mettono in moto il disco. \Rightarrow lavoro

Classificazioni:

- 1) \times fluido incompr. p varia $T = cost$ - \times fluido compr. p varia T varia

- 2) - assiali $\text{flusso} \parallel \text{asse}$ - radiali $\text{flusso} \perp \text{ad asse}$ - tipo misto



- 3) - Turbine - compressore

4) - aperte

$R=0$: $p = \text{cost}$, $T = \text{cost}$
 $R \neq 0$: $\Delta p \neq \Delta T$, $\Delta E_{\text{cum}} = \text{cost}$, $\Delta p, \Delta T$
 $R=1$: $\text{masselme e notome/mre}$
 $R \neq 0$: masselme e notome
 Di solito $R=0,5$

$$R = \frac{1}{2} \frac{H}{h_1 - h_2} \left[\frac{u_1^2 - u_2^2}{h_1^2} - \frac{u_1^2 - u_2^2}{h_2^2} \right] = \frac{1}{2} \frac{H}{h_1 - h_2} \left[\frac{u_1^2 - u_2^2}{h_1^2} - \frac{u_1^2 - u_2^2}{h_2^2} \right]$$

$R = \text{costo di notome} = \frac{\text{costo in shilo}}{\text{costo in folde}}$

Scenario energetico di un compressore $\Rightarrow \Delta E_{\text{cum}} \Delta p \Delta T$

Fonte centrifuga senza fluido \rightarrow errore energia
 La Turbina radiale deve essere centrifuga
 compressore radiale " centrifuga

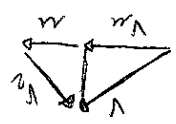
Notazione radiale scartio di + di macchina radiale

X unico non oggetto e emittori
 piccolo del lavoro

Limite in $\Delta v_1 \Rightarrow E_{\text{m. radiale}}$ in Δv
 $(v_1^2 - v_2^2)^2$ e $(v_1^2 - v_2^2)$ sono emittori con propellente
 $\frac{1}{2} (u_1^2 - u_2^2) = \int \frac{1}{2} u^2 dz = \frac{u^2}{2} (z_1^2 - z_2^2) = \text{costo elementare per centrifuga da}$
 radiale
 errore
 errore in Δv

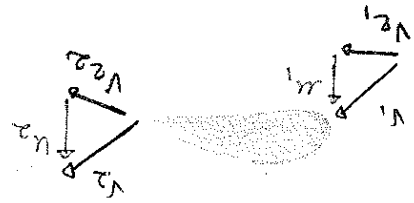
$$u v u = H = \frac{1}{2} \left[(v_1^2 - v_2^2) + (u_1^2 - u_2^2) - (v_2^2 - v_1^2) \right]$$

$$v_2^2 = u^2 + v^2 \Rightarrow u v u = \frac{1}{2} (v^2 + u^2 - v^2)$$



Angolo v_2 compreso in angolo che un propellente va in folde .
 X specie E_{radiale} deve essere v_2

Triangolo in v_2 : difficile da definire o causare misure .



$v_2 = \text{fo. lardo uscia}$
 $v_2 = \text{chiusura del triangolo}$
 : e la velocità da polo parte

X contenitore $\text{compresamente fluido}$: $\text{triangolo di velocità}$

10 ÷ 15 cm \Rightarrow energia veniva per radiale edificata .
 12 cm \Rightarrow costo comparativo valore medio di
 impulso pole : impulso e valore medio di energia

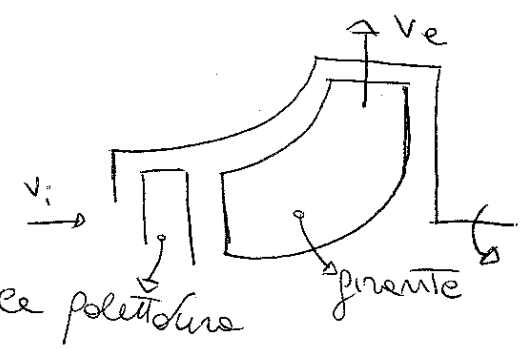
Notazione radiale: $u_1 = M_1$

Macchine con $R < 1$ e $R > 1$ lavoro solo fuori progetto

Rendimento adiabatico di fr. di compress. = $\frac{\Delta h_{tot\ ideale}}{\Delta h_{tot\ reale}}$

$\frac{L_{reale}}{L_{ideale}} = \eta > 1$ in compress.
 ↑
 fr. isentropica

Compressore centrifugo



Scambio energetico avviene in girante

Flusso girante è radiale.

Spesso non c'è precedente plettole che indirizza il flusso →
 Hp. $v_1 //$ asse x semplicità di calcolo

In uscita $vel_u \approx 400 \frac{m}{s}$. Netto diffusore x \downarrow vel 1° d camera comb.

Na diffusore a sezione frontale.
 Per a vallevole fluido.

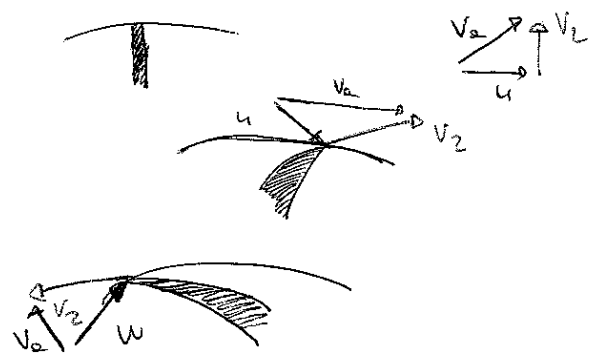
$u_2 v_2 - u_1 v_1 = \epsilon$

3 tipi di pale:

radiali

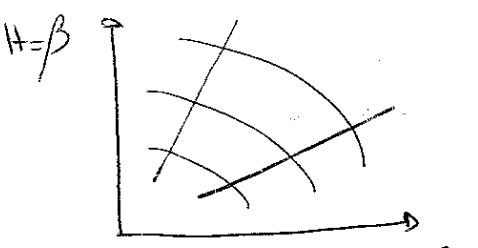
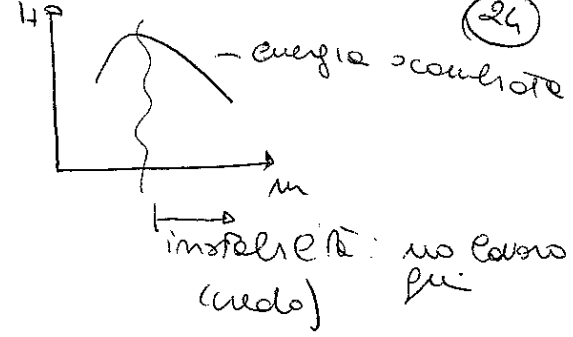
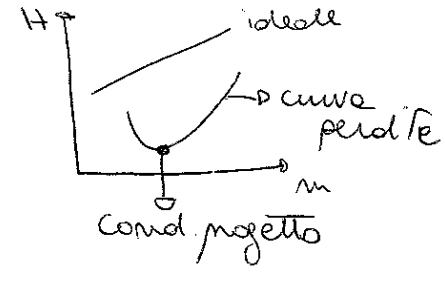
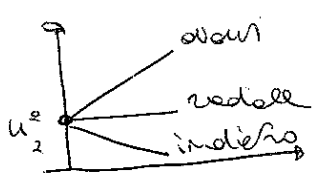
in avanti

indietro



$v_{a\ u\ d.} > v_{a\ ind.}$
 ↓
 > scambio E in
 per a vallevole fluido

Se $v_{a\ d.} = 7 \div 8$ usz pale indietro (x non avere vel u esord' rudo)



è il numero effettivo campo vortice.

H = en. scambiata espressa attraverso rapporto per tot.

- } linee a fini cost.
- instabilità: unisce i p. di max delle linee
- saturazione: $\alpha \uparrow m \rightarrow \Lambda = 1$ in 1 zona

Δ valle di girante: Diffusore

- palette
- non palette
- misti
- condotto

Se parlo da $\Lambda = 1$ per uscire a $\Lambda = 0,5$; la sezione finale = 3 volte quella iniziale \rightarrow troppo ingombro.

Norm p. m. = cost $\Rightarrow v_r = \text{cost}$ \rightarrow metto palette che controlla v_r \downarrow \downarrow d'anche

Se $\Lambda > 1$ devo usare i misti (possibile onde d'urto con palette)
 la palette interviene solo quando $\Lambda < 1$
 Sono diffusori conv-div. (i + usati)

Δ uscita da girante: possibile spostamenti vettore velocità da ideale \rightarrow per!
Scorimento = vel ideale - vel reale \Rightarrow p.e. : h_e - controllo del fluido vicino alla ~~parte~~ zona centrale (rispetto a parete) \rightarrow deviazione del fluido. \times curvatura: faccio i canal + piccoli: fluido + guidato

N. pale piccolo: alta resistenza - piccola deviazione

N. pale grande: Basse resistenza - grande deviazione

Dentro condotto h_0 grad per \Rightarrow influenza velocità \Rightarrow vicino i frangenti d'el vel

Compressore assiale

Palettatura 1: grad $\alpha_{ex} =$ forze centrifughe \Rightarrow ~~forze~~ flusso / forze!

+ stadi : parte destra che indirizza flusso + girante

1° d' 1° girante d' altro c'è palettatura fissa, che può variare suo angolo d' incidenza ed evita che flusso vada in ballo.

Xo° Lo $\rho r \times$ la separazione \times ρ_{ex} tot \uparrow . Devo limitare $\beta \approx 1 \div 2$

Nei multistadio la deflessione di profilo nel fra 1° stadio e l'altro. le pale a ingresso variano proprio angolo d'incidenza \times evita ballo

Π Π R Procedendo : volume \downarrow , ρ , ρ_{ex} , vel assiale = cost
 \downarrow lunghezza pale.

velocità rotazionale = $3 \div 400 \frac{m}{s}$

Deviazione = angol' incidente ingresso - angol' incidente ingresso

= $10 \div 15^\circ$

Controllo β scambro

Cerco avere vettori velocità = negli stad. Posso perdere anche $10 \div 15\%$ \dot{E}_{TOT} .

Se mi allungo da cond. progetto, a partire d'u, varia $v_a \rightarrow \Delta$ angol' incid.

Se β $v_a \rightarrow$ vicino a ballo.

Effetto mucino a verb : angol' incidente / flusso se girare girante e non funziona + da compress.

In macchina multistadio effetto Δ ag. mi si offrono.

β $v_a \rightarrow \rho$ carico, comprimono di + Δ nivo in 2° stadio con $v_a \leftarrow$, da compress $\rho \rightarrow$ onia a ρ lo dar carico / parte a ballo.

$\rho r >$ im fine avvicinarsi : parte β limite, caso rendimento

\Rightarrow Progetto 1° stad' con conchi cosa } se non lo compresso spinto.
 ultimi stad' con conchi di

Variazioni : n_{in} , n giri, adimensionale, ρ_{ex}



$n_{in} \times$ Caricamento a $Re \geq 100000$
 influenza Re = corse!

Prestazioni = $f(n_{in} ed, n giri ed)$

Invece che $n_{in} ed$ e n giri ed, posso riferirmi :

n_{in} conetto : $\frac{n_{in} \sqrt{\sigma}}{\delta}$

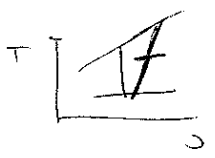
n giri conetto = $\frac{n}{\sqrt{\sigma}}$ (?)

$\sigma = \frac{T_{TOT}}{T_{standard}}$

$\delta = \frac{\rho_{TOT}}{\rho_{standard}}$

Divido la trasformazione complessiva nei 2 stadi:

Hip: $\eta_1 = \eta_2 = \eta$



$$L = \frac{\Delta H}{\eta_{comp}} = L_1 + L_2 = \frac{\Delta H_1}{\eta_1} + \frac{\Delta H_2}{\eta_2} = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{\eta}$$

$\eta_{1/2} > \eta_{comp}$ \times PS \bullet : ho introdotto Q.

2^a trasformazione non tiene conto di dissipazioni della 1^a!

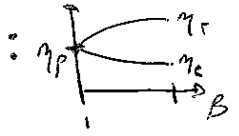
idem \times espansione.



$$L = \Delta H \eta_c = (\Delta H_1 + \Delta H_2) \eta$$

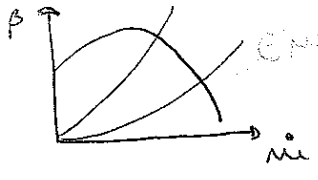
$\eta < \eta_c$: solo che faccio in 2^a fase e \times ho usato perché d'a

$$\eta_{polutropico} = \epsilon \frac{\eta}{\beta - 1} \eta_{ad}$$



Esponente politropico caratterizza la trasformazione.

Instabilità di 2 tipi incompres:



— operazionale - legge ad accoppiamento fra caratteristiche compres ed esterne

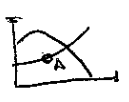
— aerodinamica - legge e comportamento fluidodinamico complessivo

Operazionale: devo verificare che il p.to di funzionamento sia stabile.

Stabile = variazione del funzionamento riporta il sistema in equilibrio



Se lavoro in A : $\uparrow ni$ ed è richiesta $>$ energia \rightarrow rallenta sistema \rightarrow equilibrio



Vado in A : $\downarrow ni \rightarrow$ il compres di energia $>$ di quella richiesta \rightarrow sistema accelera \rightarrow equilibrio

Equilibrio della girante

$$F_p = F_c \rightarrow \frac{dP}{dz} = \frac{\rho v_z^2}{2} \rightarrow v_z = 0$$

Condizione di equil. radiale \Rightarrow variazione è zero.

Difficile da realizzare \times comporta troppo svingolamento di pala.

Hip. $H_{tot}, S_{tot} = cost$ lungo z.

$$h_{tot} = h + \frac{v^2}{2} = h + \frac{v_r^2}{2} + \frac{v_z^2}{2} = h_r + \frac{v_{oss}^2}{2} + \frac{v_u^2}{2}$$

$$T ds = dh - \frac{dp}{\rho}$$

$$\frac{dh_r}{dz} + T \frac{ds}{dz} = \frac{v_u^2}{z} + v_u \frac{dv_u}{dz} + v_a \frac{dv_a}{dz} = 0$$

$$\text{con } \frac{dP}{dz} = \rho \frac{V u^2}{z}$$

$$\Rightarrow \frac{V u}{z} \cdot d(P V u) + V a \, dz = 0 \quad : \text{eq. radiale}$$

Pogo: $2 V u = \text{cost} \quad V a = \text{cost} \Rightarrow \text{eq. l.}$

Fluss x cui $2 V u = \text{cost} : \text{flussi a valle e verso} \Rightarrow V a = \text{cost}$

plano lungo polo = cost. :

(per polo lungo V d $L = \text{cost}$, deve essere $\frac{dL}{dz} = \frac{d}{dz}(\rho V u^2) = \rho \frac{d(V u^2)}{dz}$)

$$u_1 v_1 - u_2 v_2 = L = \omega (R.V. - P.V.) \dots$$