NUMERO: 1129

DATA: 22/09/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Gemello

MATERIA: Macchine a Fluido + Eserc.

Prof. Marzano

ESAME SCRITTO CON 2 ESERCIZI + RISP. MULTIPLA (NON TOGLIE X ERRORI)

GIUSTIFICARE PASSAGGI, METTERE EQ. COMPLETE E POI SCRIVERE COSA È SEMPLIFICABILE/TRASCURAB.

- INTRODUZIONE
- TERMODINAMICA → 1°|2° PRINC / COMBUST.
- FLUIDODINAMICA → NEI CONDOTTI → UGGELLI
- TURBOMACCHINE
  - → TURBINE A VAPORE / A GAS
  - → TUBOCOMPRESSORI
- COMPRESSORI → VOLUMETRICI { ROTATIVI / ALTERNATIVI / A MOTO COMPOSTO
- MOTORI A COMB. INTERNA
- MACCHINE IDRAULICHE
  - → TURBOMACCHINE
  - → VOLUMETRICHE → ROTATIVI / ALTERN. / A MOTO COMP
- ELEM. DI IMPIANTI
  - → TURB. GAS / VAP. / ...

MACCINA = DISP. MECCANICO X TRASFERIM/TRASFORMAZ. ENERGIA

↓

PARTI FISSE + PARTI MOBILI
→ LAVORO MECC. DI SPOSTAM.

IMPIANTO (POWER PLANT) = INSIEME ORGANICO DI COMPON
MACCHINE O ACCESSORI
→ STRUM. MISURA

SIST. ENERGETICO = SEZIONE DELL' UNIVERSO, STUDIA LA ENERGIA DI QUESTO

m
V

$\frac{pV}{m} = \frac{mRT}{m}$ $\quad pv = RT \quad pV = mRT$

$pV = mRT$ $\quad \mu = M.M.$

$= n \underbrace{\mu R}_{R_0} T$

$R_0 \rightarrow$ COST. UNIV. GAS

$pV = nR_0T$

$p\bar{v} = R_0 T$ ← CON VOLUME MOLARE

$R = R_0 / \mu = \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$

→ VAPORE → NO ESPRESSIONI UNICHE
- → ESPRESS. ANALITICHE LIMITATE
- → TABELLE;
- → GRAFICI

GAS SE ~~VICIN~~ LONTANO DA STATO TRANSIZIONE (COME L'ARIA)

VAPORE D'ACQUA E' VICINO A STATO TRANSIZ.
↓
USATO DIAGRAMMA DI MOLLIER

$\boxed{\text{MOTI}}$

- MOTO PERMANENTE / STAZIONARIO, SE IN OGNI PUNTO RIMANE TD COST., ANCHE SE CAMBIA PARTICELLA CHE STA PASSANDO
  - → ES. FLUIDO CON PORTATA COST.

- MOTO TRANSITORIO →
  - ALL'AVVIAM.
  - ALLA FERMATA
  - CAMBIO REGIME

AUTOMOBILE A V COST

- ~~CICLI~~ CICLICO / PERIODICO → { SI RIPETE CON REGOLARITA' CON τ PREFISSATO ($\tau = 1/f$)

1° PRINC. = EQUAZ. DI CONSERV. DELL'E

2° PRINC. → INTRODUCE UN EQUAZ. IN +, MA ANCHE UNA GRADEZZA FISICA IN +, L'ENTROPIA (PRINC. TRASF.)

3° PRINC. → DEFINISCE L'ENTROPIA COME f STATO

NON È UN ENERGIA, NEANCHE COME U.M.

ENERGIA COMPLESSIVA: $\mathcal{E}$

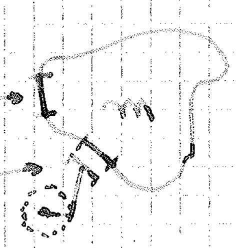
$\frac{d\mathcal{E}}{dm} \to E$ → EN. MASSICA (INFINITESIMA)

POSSIAMO SCRIVERE EQUAZ. IN FORMA INTEGRALE O DERIVATIVA

$m \begin{cases} \mathcal{E} \\ E \end{cases}$

$dm \begin{cases} d\mathcal{E} \\ dE \end{cases}$

SUP. DI CONTORTO



- A CONTATTO CON PARTI FISSE
- A CONTATTO CON PARTI SOLIDE FISSE → LAVORO TECNICO
- TRA FLUIDO E IL FLUIDO CONTIGUO → ALL'INGRESSO E ALL'USCITA → LAVORO DI TRASFERIMENTO

L. TECNICO + L. TRASFERIM = L. MECC. COMPLESSIVO

SIA X MACCH. MOTRICE, CHE OPERATRICE

$(M)^{P_M} \rightarrow (U) \; P_U < P_M$ | $(O)^{P_O} \leftarrow (M)^{P_M}$

RENDIMENTO MECCANICO

$\eta_m = P_O / P_M$

$\eta_m = P_U / P_M$

PERDITE:

$L_w (TOT)$ $\quad L_w$ (MASSICO) $\quad L_w > \emptyset$

PERDITE DOVUTE ANCHE A DISPOSITIVI ACCESSORI

AD ES: OLIO X LUBRIFICARE CON POMPAGGIO/FILTRAGGIO (LUBRIFICAZIONE FORZATA), ANCHE X RIMOZIONE Q (CON PORTATA ESUBERANTE)

PERDITE ORGANICHE = MECCANICHE + ACCESSORI $\rightarrow \eta_o$

$\eta_\varphi = \frac{G_2}{G_1} \quad G_1 - G_2 = G_\varphi$

RENDIMENTO INDICATO (DAGLI STRUM. DI MISURA) = FUGHE + VISCOSITÀ $\rightarrow \eta_i$

RENDIMENTO UTILE (η_u) $\rightarrow$ RENDIM. COMPLESSIVO (NO COMBUSTIONE)

$= (\eta_i \cdot \eta_o)$

X CONSIDERARE ANCHE RENDIMENTO COMBUSTIONE η_b

NEI MOTORI ALTERNATIVI, IN CUI COMB. INTERNA, È COMPRESO IN η_i

$d\mathcal{L}_e = (\sigma, \tau)_{sup}\, dA_{sup}\, dx_{sup} = (\sigma, \tau)\, dV_{sup}$

SULL'AREOLA SUPERFICIALE

GENERATO DA SPOSTAM. ESTERNO

$d\mathcal{L}_e = p_{sup}\, dV_{sup} - d\mathcal{L}_{w\,sup}$

$\mathcal{L}_w \rightarrow$ TRASCURABILE $\rightarrow$ NON QUELLO INTERNO, SOLO QUELLO SUPERFICIALE

$d\mathcal{L}_e \approx p_{sup}\, dV_{sup}$

POICHE' SULLA SUP. IL FLUIDO HA VELOCITÀ $\approx$ SUP. ESTERNA

$\mathcal{L}_w$ TRASCURABILE X MACCHINE VOLUMETRICHE, MENTRE IN TURBOMACCH $\neq 0$, $\gg 0$

$|Q|$ TRASCURABILE X TURBOMACCHINE (ADIABATICHE), MENTRE IN MACCH. VOLUMETRICHE $\neq 0$, $\gg 0$

IN 1° APPROSSIMAZIONE

$d\mathcal{Q} = dU + p\,dV - d\mathcal{L}_w$

$d\mathcal{Q} = dU + d\mathcal{L}_e + \underbrace{d\mathcal{E}_p + d\mathcal{E}_c + d\mathcal{E}_s + \ldots}_{d\mathcal{E}}$

$d\mathcal{L}_e = \underbrace{p\,dV - d\mathcal{L}_w}_{d\mathcal{L}} \underbrace{- d\mathcal{E}_p - d\mathcal{E}_c - d\mathcal{E}_s - \ldots}_{-d\mathcal{E}}$

$Q = \Delta U + L$

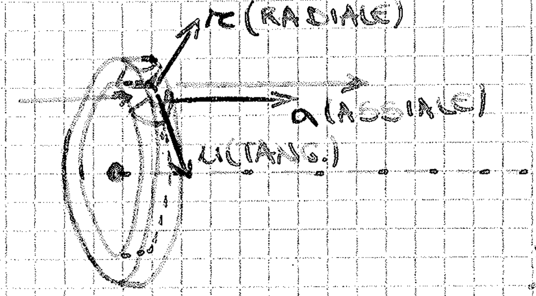
$Q = \int_A^B dQ \qquad L = \int_A^B dL \qquad \Delta U = \int_A^B dU = U_B - U_A$

FUNZIONI DI LINEA (DIPENDE DAL PERCORSO) FUNZ. STATO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 232

TURBOMACCHINE = MACCH. ROTATIVE A FLUSSO CONTINUO, FLUIDO INTERNO È COSTANTEM. IN CONTATTO CON L'ESTERNO (NO VALVOLE)

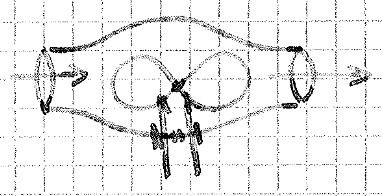
GESTITA DI SOLITO IN REGIME PERMANENTE



AD ESEMPIO UNA GIRANDOLA

ATTRAVERSATO CON CONTINUITÀ

LAVORO TRASFERIM CON FLUIDO CONTIGUO
LAVORO TECNICO CON PALETTE
NO LAVORO CON PAVIMENTO, MA GIRA, QUINDI SPOSTAM.



V ASSOLUTE SE SIST. RIF. PRIVO DI ACCELERAZIONI

ACC. CENTRIPETA = $\omega^2 r$
FORZA $m \cdot \omega^2 \cdot r$
LAVORO $\frac{1}{2} m \omega^2 r x$ → ANCHE IN MOTO PERM.
→ PUÒ ESSERE ≠ IN PUNTI ≠

SE MACCHINA ASSIALE NO → $\cancel{\omega^2 r_1}$, $\cancel{\omega^2 r_2}$ SI ELIDONO ($r_2 = r_1$)

DEVO METTERE LA VELOCITÀ RELATIVA ALLA PALETTA

DEVO FAR COMPARIRE TERMINE DEL MOVIM. DEL SIST. DI RIFERIM (MOVIMENTO PALE)

$\mathcal{L}_{tecnico}$ DIVENTA $\emptyset$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 232

$H = U + pV \qquad h = u + pv$

$$\begin{cases} Q = \Delta h + L_i + \Delta E \\ L_i = -\int v\,dp - L_w - \Delta E \end{cases}$$

1° PRINCIPIO - FORMA GENERALE

$Q = \Delta U + L$

FORMA SOSTANZIALE - LAGRANGIANA → VALIDE SEMPRE (MOTO VARIO)

$$\begin{cases} Q = \Delta U + L_e + \Delta E & \text{TD} \\ L_e = \int p\,dV - L_w - \Delta E & \text{MECC.} \end{cases}$$

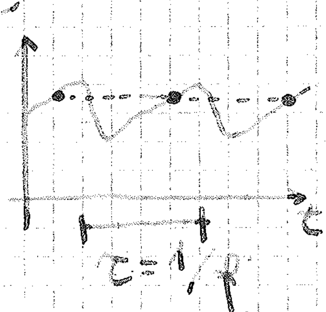
$= \int_{sup} p_{sup}\,dV_{sup} - \underbrace{L_{w,sup}}_{\to 0}$ DEFINIZ.

FORMA LOCALE/EULERIANA → IN MOTO PERMANENTE

$$\begin{cases} Q = \Delta h + L_i + \Delta E \\ L_i = -\int v\,dp - L_w - \Delta E \end{cases}$$

$= \int_{sup} p_{sup}\,dV_{sup,m} - \cancel{L_{w,sup,m}}$

ESTENSIBILE X ALCUNI CASI DI MOTO PERIODICO



NELLA SEQUENZA DI PUNTI CHE DISTANO UN τ

↓

NUMERO INTERI DI CICLI O CICLO INTERO

↓

VALGONO FORMULE LOCALI

$$dQ + dL_w = dU + p\,dV = dh - v\,dp$$

$T\,dS = \underbrace{dQ}_{\text{CALORE}} + \underbrace{dL_w}_{\text{DISSIPAZ. VISCOSE}}$

$T\,dS = c\,dT$

$T\,dS = c\,dT = dU + p\,dv = dh - v\,dp$

GAS $\Rightarrow pv = RT\,;\ pv^{\gamma} = \text{COST}\,;\ dU = c_v\,dT\,;\ dh = c$

$\hookrightarrow = c\,dT = c_v\,dT + RT\dfrac{dv}{v} = c_p\,dT - R\dfrac{dp}{p}$

SE ISOBARA: $c\,dT = c_p\,dT$

SE ISOCORICA: $c\,dT = c_v\,dT$

$$\begin{cases} pv^{\gamma} = \text{COST} \\ pv = RT \end{cases} \Rightarrow \frac{T}{p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \text{COST}\,;\ T\cdot v^{\gamma-1} = \text{COST}$$

$A \rightsquigarrow B \qquad \dfrac{T_B}{T_A} = \left(\dfrac{p_B}{p_A}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\dfrac{v_A}{v_B}\right)^{\gamma-1}$

$$\int_A^B T\,dS = \int_A^B c_v\,dT + \int_A^B RT\frac{dv}{v} = \int_A^B c_p\,dT - \int_A^B RT\frac{dp}{p} =$$

$$= \int_A^B dQ + \int_A^B dL_w$$

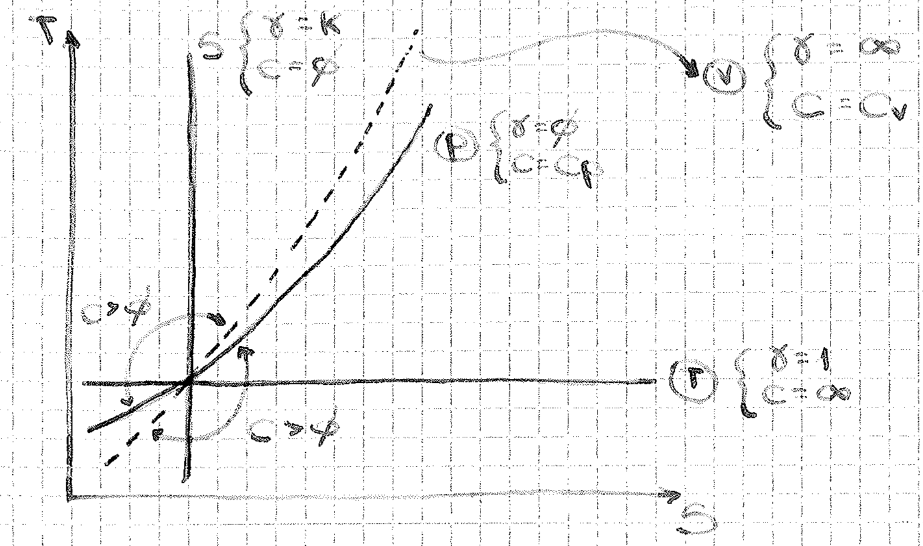
SE $\int dL_w = \phi$ LA TRASFORMAZIONE È REVERSIBILE, NO PERDITE (IDEALE)

SE $\int dQ = \phi$ LA TRASF. È ADIABATICA

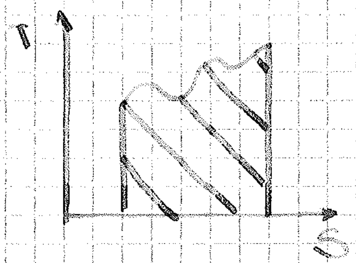
ADIABATICO REV. SE $\int dL_w = \phi$ E $\int dQ = \phi$, QUINDI $\int T\,dS = \phi$, QUINDI ENTROPIA È COSTANTE (TRASF. ISOENTROPICA)

$T\,dS = c_v\,dT + RT\dfrac{dv}{v} = c_p\,dT - RT\dfrac{dp}{p}$

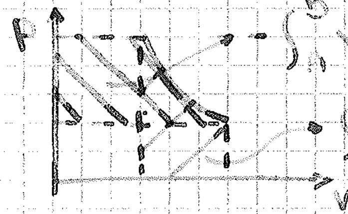
$dS = c_v\dfrac{dT}{T} + R\dfrac{dv}{v} = c_p\dfrac{dT}{T} - R\dfrac{dp}{p}$



COMODO IN ALCUNI CASI, AD ESEMPIO:



$\int_A^B T\,dS = Q_{AB} + L_{wAB}$ AREA SOTTESA



$\int_A^B v\,dp$

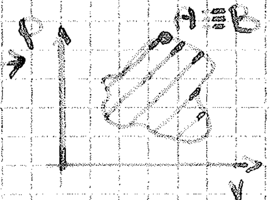
$\int_A^B p\,dv$

SE ≠, SALVO IN CASI PARTICOLARI

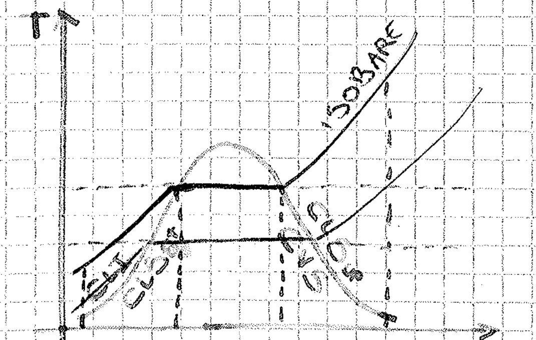
↓

IN ISOTERMA (IPERBOLE EQUILATERA)

NEL CASO DI TRASF. CHIUSE (AREA RACCHIUSA)

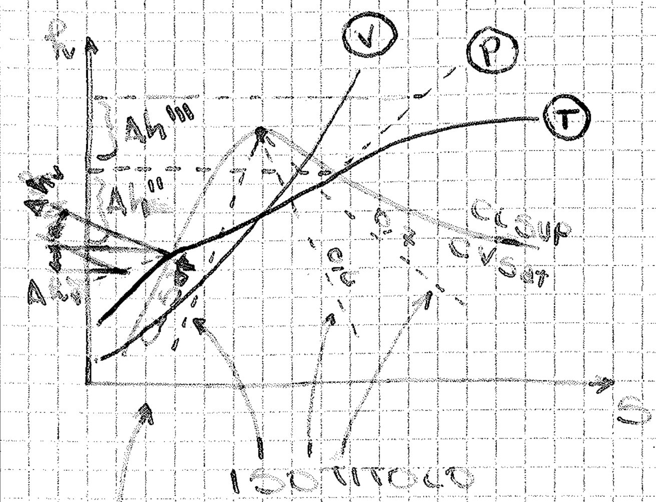


X VAPORI:



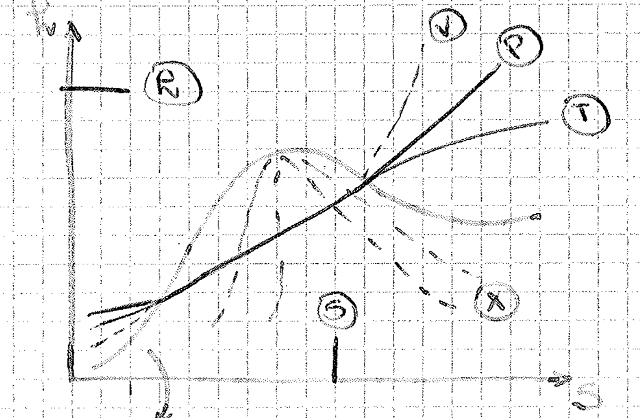
COMODO X Q NECESSARIO X EVAPORAZ. (3 AREE SOTTESE)

(NOTARE CHE SOTTO LA CAMPANA È ISOTERMO, CALORE LATENTE)



IL Q NECESSARIO IN TRASF. ISOBARA NON È + UN AREA, MA LA DIFF. DI ORDINATA Δh_v
↓
CRESCE ANCHE SOTTO LA CAMPANA (SERVE Q LATENTE, OLTRE CHE Q SENSIBILE SOPRA LA CAMPANA)

DIAGRAMMA MOLLIER:



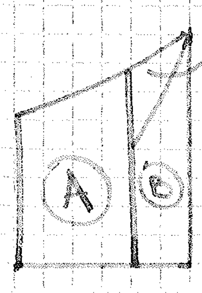
SPESSO ZOOM IN QUESTA ZONA

SENNÒ ∃ TABELLE, MA SONO ENORMI
↓
USIAMO TABELLE SOLO X CURVE LIMITE

$h_{lv} - h_{lc}$

P [bar]	T [°C]	h_{lc} [kJ/kg]	s_c [kJ/kg °C]	v_c [m³/kg]	h_{lv} [kJ/kg]	s_v [...]	v_v [...]	r [kJ/kg]

TURBOMACCHINA: IN FLUSSO CONTINUO, PUÒ LAVORARE IN REGIME PERMANENTE
- TURBOCOMPRESSORE
- TURBOESPANSORE / TURBINA



C A $= |L_{is,c}|$ ← ISOENTROPICO (IDEALE)

B $= L_{w_c}$ ← DISSIP. VISCOSE

A + B + C $= |L_{ic}|$ ← NE SERVE DI +

CONTRORECUPERO NELLA COMPRESSIONE

NE SERVE ANCORA DI +

DEVO CONTRASTARE L'ESPANSIONE DOVUTA AL RISCALDAMENTO

TRA LE 2 TRASF. C'È SOLO PARITÀ DI p ESTREME E T_1, MA NON C'È UGUAGLIANZA DI ENERGIA NÈ ALL'INIZIO, NÈ ALLA FINE

↳ NEL CASO IDEALE SI TRASF. TUTTA IN ENERGIA DEL FLUIDO, NEL FLUIDO UNA PARTE SI PERDE B, MA C'È ANCHE UNA PARTE DI ENERGIA IN + CHE RIMANE NEL FLUIDO, CHE FA SÌ CHE T SIA + ALTA C

$|L_{ic}| = +\int v\,dp + L_{w_c} + \Delta E \ldots$

ALLA FINE AL FLUIDO RIMANE:

$|L_{ic}| - L_{w_c} = \int v\,dp + \Delta E_c + \Delta E_g + \ldots = gH$

TERMINE BAROMETRICO — T. CINETICO — T. GRAVITAR. (GEODETICO)

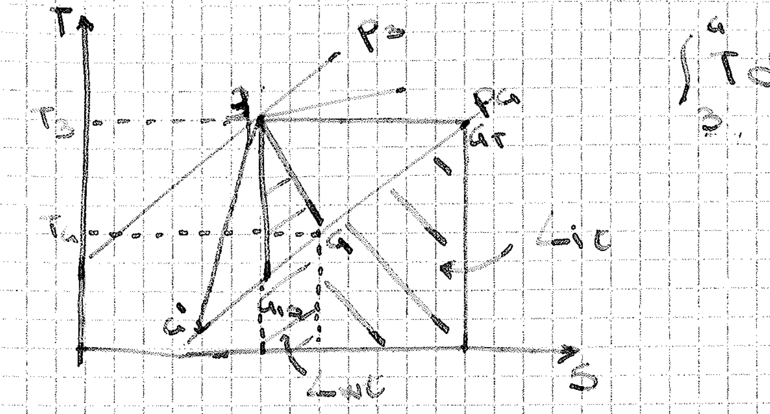
TRINOMIO DI BERNOULLI

$\eta_{y_c} = \dfrac{|L_{ic}| - |L_{w_c}|}{|L_{ic}|}$ ← TRA INIZIO E FINE

$\eta_{is,c} = \dfrac{|L_{is,c}|}{|L_{ic}|}$ ← RAPPORTO IDEALE/REALE

$\eta_{y_c} = \dfrac{A+C}{A+B+C}$ $\quad \eta_{is,c} = \dfrac{A}{A+B+C} < \eta_{y_c}$

DECOMPRESSIONE → TURBINA



$$\int_3^4 T\,dS = Q_{34} + L_{w,34}$$
$(\gtrless 0)$ (>0)

ISOENTROPICA = SIA Q, CHE $L_w = \emptyset$

SE INVECE SI COMPENSANO $L_w (>\emptyset)$ E $Q (<\emptyset)$
S È COST., MA NON ISOENTROPICA PROPRIAM.
DETTA

L_{w_c} È L'AREA ~~(DI DIFF)~~ SOTTESA TRA 3 E 4

$$\int_3^4 T\,dS = Q_{34} + L_{w34} = \Delta h - \int_3^4 v\,dp$$

$$\underbrace{Q}_{\simeq 0} = \Delta h + L_i + \underbrace{\Delta E}_{\simeq 0}$$

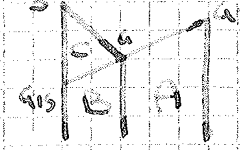
$$L_i = -\Delta h = -c_p(T_4 - T_3) = c_p(T_3 - T_4) > 0$$

AREA SOTTESA DA UN'ISOBARA — MACCH. MOTRICE
(QUELLA CHE PREFERIAMO)
(SE c_p = COST, A GAS IDEALE)

QUELLO + COMODA È QUELLA DI FINE ESPANSIONE
↳ AREA SOTTESA A p_4 DA 4 A 4_r

SE FOSSI IN CASO IDEALE ISOENTROPICO

$$L_{is_c} = -\Delta h_{is} = c_p(T_3 - T_{4_{is}})$$



(A) = L_{ic}
(A) + (B) = $L_{is\,ic}$
(B) + (C) = L_{wc}

$$\frac{T_{4is}}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k'-1}{k'}}$$

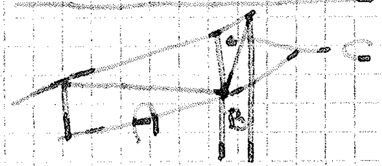
$\frac{p_3}{p_4} = \beta_t =$ RAPPORTO DI ESPANSIONE

$$\frac{T_4}{T_3} = \beta_t^{-\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}$$

$$\frac{T_{4is}}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k'-1}{k'}} = \beta_t^{-\frac{k'-1}{k'}} \qquad \frac{k'-1}{k'} = \frac{R'}{c_p}$$

$$\eta_{is,t} = \frac{1 - T_4/T_3}{1 - T_{4is}/T_3} = \frac{1 - \beta_t^{-\left(\frac{\gamma'-1}{\gamma'}\right)}}{1 - \beta_t^{-\left(\frac{k'-1}{k'}\right)}}$$

COMPRESSIONE



$A+B+C = |L_{ic}|$

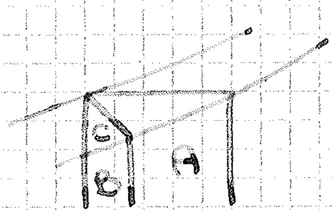
$A = |L_{is,c}|$

$B = L_{wc}$

$(A+B+C) - B = |L_{ic}| - L_{wc} = A+C = gH = |L_{is,c}| +$ CONTRORec. (CR)

$|L_{ic}| = |L_{is,c}| + L_{wc} + CR$

ESPANSIONE



$A = L_{it}$

$A+B = L_{is,t}$

$B+C = L_{w,t}$

$A+B+C = L_{it} + L_{wt}$ ← DOTAZ. ENERGETICA INIZIALE

$= gH = (A+B) + C = L_{is,t} + RC$ (RECUPERO)

$L_{it} = L_{is,t} - L_{wt} + RC$

$L_{it} = L_{is,t} - (L_{wt} - RC)$

NO MOTO PERMANENTE → LEGGE LAGRANGIANA

NELLA COMB. POSSO ANCHE MISURARE A p COST (PARETE MOBILE) (RISULTATO ≠, MA SIMILE)

DIPENDE DALLA DIFFERENZA DEL NUMERO DI MOLI

↓

SE N. MOLI RIMANE = (COMB. CH_4) ALLORA I 2 POTERI CALORIFICI SONO =

POTERE CALORIFICO SUPERIORE ≠ P.C. INFERIORE X CALORE LATENTE CONDENSAZ.

POTERE CALORIFICO INFERIORE → H_2O_{VAP}

" " SUPERIORE → H_2O_{LIQ}

+ USATO X MACCHINE CHE LAVORANO A $T > T_{eb, H_2O}$

ANCHE IN COMBUSTORE A p COST C'È UNA PERDITA DI CARICO

USO POTERE CAL. A p COST SE REGIME "COSTANTE", QUINDI USO ENTALPIA

	UHV	LHV
CPHV	H_{sp}	H_{ip}
CVHV	H_{sv}	H_{iv}

→ QUELLO CHE USEREMO DI + (X MOTO PERMANENTE)

IN REGIME PERMANENTE USO H_{ip} MOLTIPLICATO X UNA PORTATA MASSICA

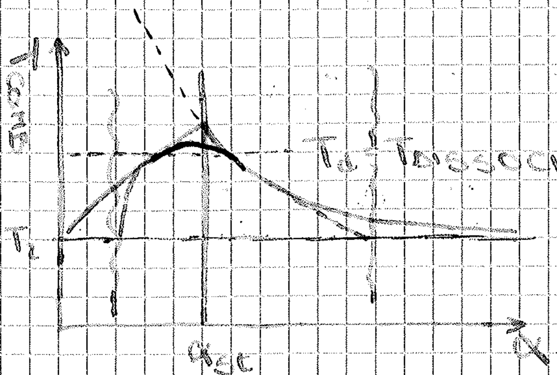
LAVORO CON LE POTENZE

$$\alpha = \frac{G_a}{G_b} \qquad G = \frac{dm}{dt} \qquad P_{mecc} = \frac{dL}{dt} \qquad P_{termica} = \frac{dQ}{dt}$$

$$P_{mecc} = \dot{L} \qquad P_{termica} = \dot{Q}$$

$$G = \frac{dm}{dt} = \frac{m}{t}$$

SE COST (SENNÒ MEDIA INTEGRALE)

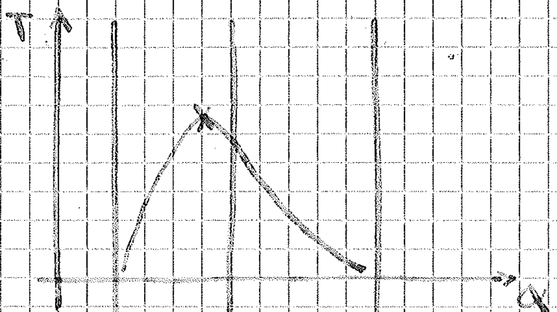


$T_3 = T_2 + \frac{H_i}{(1+\alpha) c_p'} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{st}}$

T_3 TDISSOCIAZ.

ABBASSA T_3 SE LA SUPERO

CAMPO RISTRETTO DA LIMITI DI INFIAMMABILITA' (LIMITI DI ACCENSIONE + LARGHI DEI LIMITI DI PROPAGAZIONE)



CASO REALE

MAX SPOSTATO UN PO' VS DOSATURA IN CUI $\alpha < \alpha_{st}$ DI POCO

$\eta_b \, m_b H_i = (m_a + m_b) \, c_p' \, (T_3 - T_2)$

RENDI. DELLA COMBUSTIONE (CONTIENE TUTTE LE DISSOCIAZIONI)

$C_x H_y + \underbrace{m_a (0{,}21\, O_2 + 0{,}79\, N_2)}_{a(O_2 + \pi N_2)}$

$\begin{cases} \pi = \frac{0{,}79}{0{,}21} = 3{,}76 \\ a = 0{,}21\, m_a \end{cases}$

$C_m H_n + a(O_2 + \pi N_2) \rightarrow x\, CO_2 + y\, H_2O + a\pi N$

$x = m$

$2y = n$

$2a = 2x + y \rightarrow a = x + y/2 = m + n/4$

VALE X COMB. $C_m H_n$

$\alpha_{st} = \frac{m_a}{m_b} = \frac{a \mu_{O_2} + \pi a \mu_{N_2}}{m_b (m \mu_C + n \mu_H)} \cdot \left(m + \frac{n}{4}\right)$

FLUIDODINAMICA

X TURBINA

$$|L_{ip}| - L_{wp} = \int v\,dp + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_s$$

$$\underbrace{L_{it} + L_{wt}}_{} = -\int v\,dp - \Delta E_c - \Delta E_g - \cancel{\Delta E_s}^{\,0}$$

$$g(H_1 - H_2) = -\frac{p_2 - p_1}{\rho} - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - g(z_2 - z_1) = g H_t =$$

PERDITA DI CARICO → DIFFERENZA DI PREVALENZA

$$= g\left[\underbrace{\underbrace{z_1 + \frac{p_1}{\rho g}}_{h_{r1}} + \frac{c_1^2}{2g}}_{H}\right] - \left(\underbrace{\underbrace{z_2 + \frac{p_2}{\rho g}}_{h_{r2}} + \frac{c_2^2}{2g}}_{H_2}\right)$$

QUOTA PIEZOMETRICA

X POMPA:

$$|L_{ip}| - L_{wp} = \int v\,dp + \Delta E_c + \Delta E_g + \cancel{\Delta E_s}^{\,0} =$$

$$= g(H_2 - H_1) = g\left[\left(\underbrace{z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g}}_{H_2}\right) - \left(\underbrace{z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g}}_{H_1}\right)\right]$$

DIFFERENZA TRA FORNITO E UTILIZZATO

↳ CALCOLIAMO PERDITE (DIFFERENZA DI PREVAL.)

$= g H_p$

DISSIPAZIONI FLUIDODINAMICHE

$\frac{L_{it}}{g} \rightsquigarrow$

$\frac{|L_{ip}|}{g} \rightsquigarrow$

$\frac{L_{wt}}{g} \rightsquigarrow H_{wt} = Y_t$ ALTEZZE EQUIVALENTI

$\frac{L_{wp}}{g} \rightsquigarrow H_{wp} = Y_p$

λ SEZ. CIRC.

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{\pi R^2}{2 \pi R} = \frac{R}{2}$$

$L_w = \xi w^2$
→ COST. ← R. TURBOL.
→ $\frac{COST}{w}$ ← R. LAMINARE
→ $L_w = \lambda \cdot w$

→ DIAGRAMMI

VISCOSITÀ DINAMICA:

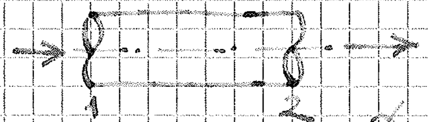
$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

VISCOSITÀ CINEMATICA:

$$\nu = \underline{\mu}$$

$\boxed{\text{X AERIFORMI}}$

SE NON CI SONO PARTI MOBILI:
→ PARETI FI...



$$Q = \Delta h + \underbrace{L_i}_{\to 0} + \Delta E_c + \underbrace{\Delta E_g}_{\to 0} + \Delta E_{...}$$

→ SE EFFLUSSO ADIAB. → TRASC. X ρ PICCOLO

$$0 = (h_2 - h_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} =$$

$$= \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2}\right) - \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2}\right) = h_2^0 - h_1^0$$

ENTALPIA STATICA ENTALPIA TOTALE: $h^0 = h + \frac{c^2}{2}$

ENTALPIA DI RISTAGNO O
DI RALLENTAM. ISOENTROPICO

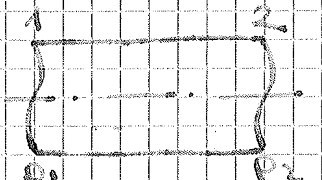
SE C=0 NON HO PERDITE E $h^0 = h$ (TEORICO)

$$G=\sqrt{\frac{2k}{k-1}}\,A\,\frac{p^0}{\sqrt{RT^0}}\,\pi^{1/k}\sqrt{1-\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

X VAPORI:

$$G=cost\cdot A\,\frac{p^0}{\sqrt{p^0 v^0}}\cdot f(\pi)$$

IN CONDOTTI AREIFORMI:



SE ABBASSO $p_2<p_1$ IL FLUIDO INIZIA A MUOVERSI E INOLTRE SI ESPANDE LA ρ DIMINUISCE

$G=\rho\cdot A\cdot C$

$\rho\downarrow,\ d\rho<0$

$\frac{d\rho}{\rho}<0$

$C\nearrow,\ dC>0$

$\frac{dC}{C}>0$

SIAMO PARTITI DA VELOCITÀ $=0$

NEL SUBSONICO

IN VALORE ASSOLUTO LA VELOC. CRESCE DI + DI QUANTO ρ DIMINUISCA

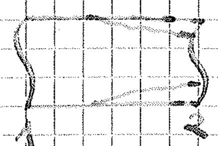
SOLO ESPANSIONE

TRASLAZ. RIGIDA + ESPANSIONE

QUINDI MANTENERE $G=cost$ A DEVE DIMINUIRE

ABBIAMO EFFLUSSO NON + A BOCCA PIENA, MA A PROFILO LIBERO

DIMINUISCE SEZ. PASSAGGIO A BASSA PRESS.



CONVIENE RIDURRE SEZ. CONDOTTA X AIUTARE FLUIDO

$C_S = \sqrt{KRT} \rightarrow$ VELOC. SUONO, PROPAGAZ. PERTURBAZ.

a) $\frac{C}{C_S} = M_a \rightarrow$ NUMERO DI MACH

IN REGIME SUPERSONICO:

$G = \rho A C$

$dG = AC\,d\rho + \rho C\,dA + \rho A\,dC$

$$\frac{dG}{G} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dC}{C} = \phi = \frac{dA}{A} + \frac{dC}{C}\left(1 + \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{C}{dC}\right)$$

IN REGIME PERMAN.

$-\frac{C^2}{(dp/d\rho)}$

$-\frac{d\rho}{\rho}$

$$\phi = \frac{dA}{A} + \frac{dC}{C}\left(1 + \frac{C^2}{C_S^2}\right)$$

$$\phi = \frac{dA}{A} + \frac{dC}{C}\left(1 - M_a^2\right)$$

IN SUBSONICO: $M_a < 1$

ESPANSIONE: $p \searrow$, $\rho \searrow$, $C \nearrow$, $A \searrow$ (CONVERG.) EFFUSORE

COMPRESSIONE: $p \nearrow$, $\rho \nearrow$, $C \searrow$, $A \nearrow$ (DIVERG.) DIFFUSORE

IN SUPERSONICO: $M_a > 1$ (PARENTESI $< \phi$)

ESPANSIONE: $p \searrow$, $\rho \searrow$, $C \nearrow$, $A \nearrow$ DIV. EFFUS.

COMPRESSIONE: $p \nearrow$, $\rho \nearrow$, $C \searrow$, A CONV. DIFFUS.

POSSONO USA AD ESEMPIO EFFUSORE SIA PER CONV. SUBSONICA SIA PER DIV. SUPERSONICA

ES: PHON (IN REGIME SUBSONICO

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$$ APPROSSIMAZ. ELLITTICA

$$\frac{(p_r-p_{r,cr})^2}{(p^0-p_{r,cr})^2}+\frac{G^2}{G_{cr}^2}=1=\left(\frac{\Pi_r-\Pi_{r,cr}}{1-\Pi_{r,cr}}\right)^2+\left(\frac{G}{G_{cr}}\right)^2$$

$$\emptyset=c_p(T_r-T^0)+\frac{c_r^2}{2}\xrightarrow[\text{CRITICHE}]{}c_p(T_{r,cr}-T^0)+\frac{c_{r,cr}^2}{2}$$

$$c_{r,cr}=c_s=\sqrt{kRT_{r,cr}}$$

$$\cancel{c_p}(T_{r,cr}-T^0)+\frac{kRT_{r,cr}}{2c_p}=\emptyset \qquad \frac{R}{c_p}=\frac{k-1}{k}$$

$$=(T_{r,cr}-T^0)+\frac{k-1}{2}T_{r,cr}$$

$$T_{r,cr}\underbrace{\left(1+\frac{k-1}{2}\right)}_{\frac{k+1}{2}}=T^0 \Longrightarrow \frac{T_{r,cr}}{T^0}=\frac{2}{k+1}=\left(\frac{p_{r,cr}}{p^0}\right)^{\frac{k-1}{k}}=\Pi_{cr}^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\Pi_{cr}=\frac{p_{r,cr}}{p^0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$ $\rightarrow$ Π_{cr} DIPENDE SOLO DA K (TIPO DI FLUIDO)

CI POTREI ANCHE ARRIVARCI DA EQ. PORTATA E IMPONENDO G_{max} ∴ $\frac{dG}{dv_r}=\emptyset=\frac{dG}{d\Pi_r}=\emptyset$

RISULTATI VALGONO X REGIME PERMANENTE E ADIAB.

ENTRO CERTI LIMITI NON CONTA LUNGHEZZA DEL CONDOTTO SAGOMATO (NON C'È LUNGH. NELLE FORMULE)

IL RAPPORTO CRITICO Π_{cr} DIPENDE SOLO DA K:

X BIATOMICI $\Pi_{r,cr}=\left(\frac{2}{1,4+1}\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}}=0,5283...$

X MONOATOMICI $(K=1,667)\rightarrow \Pi_{r,cr}\approx 0,487$

$\pi_{u,cr} = \begin{cases} \to \pi_{u,lim} \text{ (LIMITE)} & \text{DISCRIMINANTE} \\ \to \pi_{u,opt} \text{ (OPTIMUS)} & \text{ADATTAMENTO} \end{cases}$

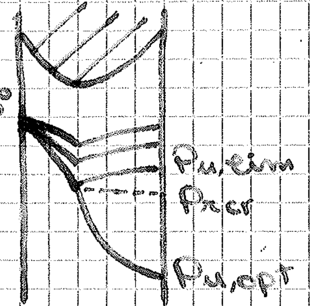
$p_{u,opt} < p_{r,cr} < p_{u,lim}$

$\pi_{u,opt} < \pi_{r,cr} < \pi_{u,lim}$

IN $p_{u,opt}$ LA PRESS. IN SEZ. MINIMA RIMANE CRITICA E SCONFINIAMO NEL SUPERSONICO:

EFFUSORE SUPERSONICO

$\pi_{u,opt}$ VIENE ANCHE ANALITICAM. RISOLVENDO EQUAZIONE

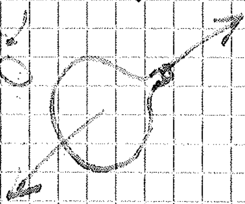


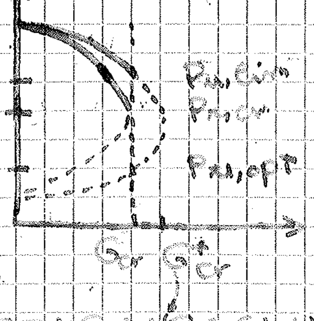
IN APPLICAZIONI PROPULSIVE/TURBOMACCHINISTICHE CON LA SPINTA, CHE DIPENDE DALLA VARIAZ. DELLA QDM

$V_{qdm} = G \cdot c_u$

GAS CHE ENTRA FA QDM CON CORDE CON PORTATA, VICEVERSA CON USCITA

ES: PALLONCINO





$$G^*_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}\, A_u \frac{p^0}{\sqrt{RT^0}}\, \pi_{cr}^{1/k} \sqrt{1-\pi_{cr}^{\frac{k-1}{k}}}$$

$$\frac{G_{cr}}{G^*_{cr}} = \frac{A_r}{A_u}$$

COME AVESSI UN SEMPLICE CONVERG.

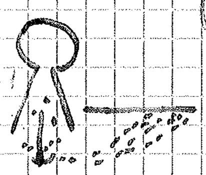
TURBOMACCHINE

MACCHINE ROTATIVE A FLUSSO CONTINUO, SI PRESTANO IN MOTO PERMANENTE

MOTRICI → DISTRIBUTORE + GIRANTE (+ DIFFUSORE)

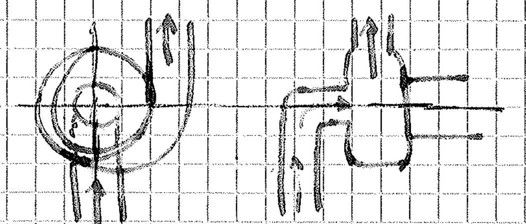
OPERATRICI → GIRANTE + DIFFUSORE

AD ESEMPIO IN MACCHINE IDRAULICHE X RESTITUIRE H_2O AL BACINO DI VALLE (CONDOTTO GUIDATO IN $p < 1$ atm)



→ TRASFORMATA ENERGIA CINETICA IN EN. X TORNARE A p_{atm}

POMPE: → DIFFUSORE / DISTRIBUTORE

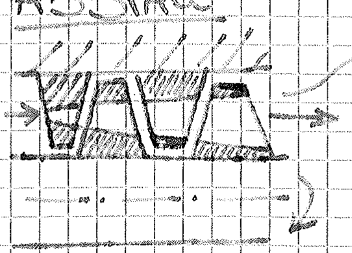


LE TURBOMACCHINE POSSONO MONOSTADIO O PLURISTADIO

↳ + STADI X RIPARTIRE LAVORO DA FARE

ES: SE ALTO SALTO DI PRESSIONE

ASSIALE



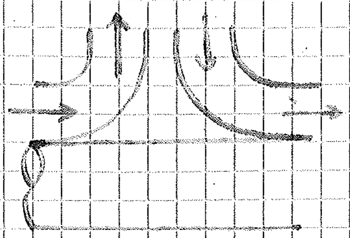
→ IN QUESTO CASO PLURISTADIO

SE FOSSE UN COMPRESSORE SI INIZIA CON GIRANTE E NON CON DISTRIBUTORE

SI PUÒ VEDERE IL DISEGNO DA DX A SX

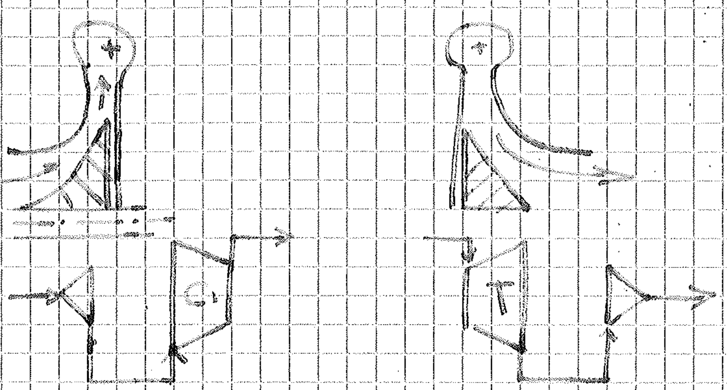
PUÒ ESSERCI IN OGNI CASO SETTO PREGIRANTE

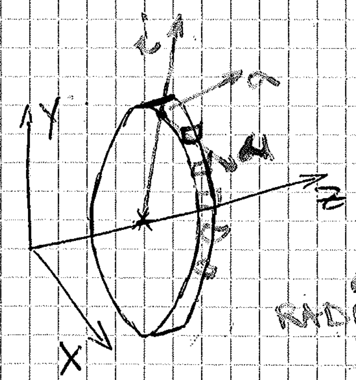
C'È NE ANCHE DI MISTE VERE E PROPRIE:



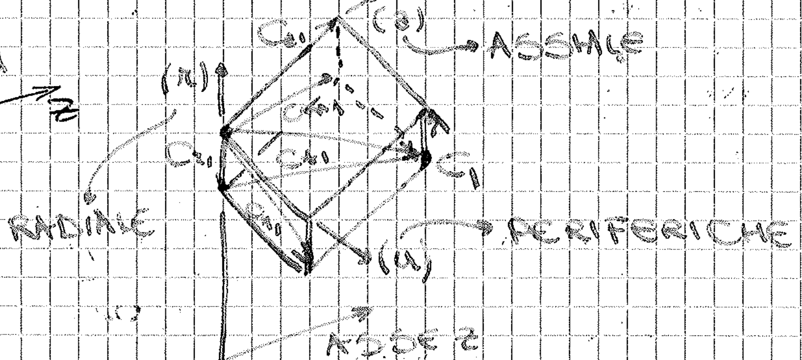
FLUSSO ACCOMPAGNATO ANCHE QUANDO ASSIALE

LA PALETTATURA PUÒ ESSERE CHIUSA O APERTA





UNA COMP. RADIALE E 2 PERIFERICH

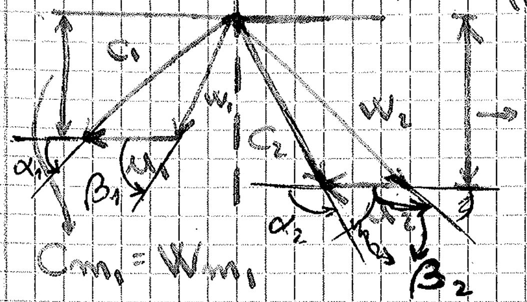


COMP. TANG = a + u

" NORMALE = r + u

È CHIAMATO PIANO MERIDIANO QUELLO DI r + a (COMP. MERIDIANA) POICHÉ COMPRENDE L'ASSE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 232



TRIANGOLI DI VELOCITÀ

$\rightarrow C_{m_2} = W_{m_2}$

$C_{m_1} = W_{m_1}$

$C_{m_1} = C_1 \cdot \text{SEN}\, \alpha_1$
$W_{m_1} = C_1 \cdot \text{SEN}\, \beta_1$

SI PUÒ FARE LA STESSA COSA CON C USCITA

$C_{u_1} = W_{u_1} + u_1$

$C_1 \cos\alpha_1 = W_1 \cos\beta_1 + u_1$

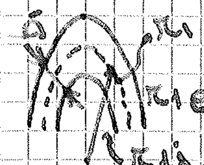
LE COMP. PERIFERICHE SONO COLLEGATE ALLE COPPIE SCAMBIATE E AL LAVORO x UNITÀ DI MASSA

LE COMP. MERIDIANE SONO LEGATE ALLE PORTATE

$$G = \rho A V = \rho_1 A_1 \underset{W_{m_1}}{\overset{}{C_{m_1}}} = \rho_2 A_2 \underset{W_{m_2}}{C_{m_2}}$$

SI SUOLE RIFERIRE C_{m_1} E W_{m_2}

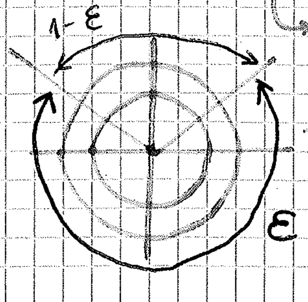
A MONTE DELLE GIRANTE C'È IL DISTRIBUTORE (FISSA) E QUINDI C'È LA VELOC. ASSOLUTA C_{m_1}



$$2\pi r_1 b_1 = \pi (r_{1e}^2 - r_{1i}^2) = 2\pi \frac{(r_{1e} + r_{1i})}{2} (r_{1e} - r_{1i})$$

$A_1 = 2\pi r_1 \varepsilon_1 b_1$

↳ DOVUTO A INGOMBRO DELLE PARTI FISSE



→ PARZIALIZZAZIONE

$A_1 = 2\pi \cdot r_1 \varepsilon_1 b_1 (1-\varepsilon)$

$$L_i = -\int_1^2 v\,dp - L_{w12} - \Delta E_c - \Delta E_g - \Delta E_s$$

$$L_i = -\int_1^2 v\,dp - L_{w12} - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - (\approx 0) - 0$$ X MOTO ASSOLUTO

IN MOTO RELATIVO:

$$0 = -\int_1^2 v\,dp - L_{w12} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} - (\approx 0) + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}$$

(SEGNO CAMBIATO!

FACENDO SOTTRAZIONE:

$$L_i = \underbrace{-\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}}_{\text{DAL PRINCIPIO DELL'ENERGIA}} = -(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})$$

DOVUTO A QDM

NEL DIAGR. DEL TRIANGOLO DELLE VELOCITÀ SI PUÒ PASSARE DALL'UNO ALL'ALTRO CON IL TEOREMA DEI COSENI (O DI CARNOT)

$$\begin{cases} a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos\alpha \\ b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cos\beta \\ c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma \end{cases}$$

L_i → >0 MOTRICE
L_i → <0 OPERATRICE

$$L_i = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}$$

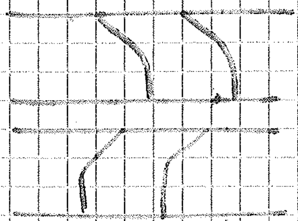
$(>0)(>0)\ (>0)(<0)$

$(+7)\cdot(+9)\ (+3)(+6)$ ← NEL NOSTRO ESEMPIO

$63 + 18 = 81 > 0$ → MACCHINA MOTRICE

NEL NOSTRO CASO X OPERATR.:

X LA NOSTRA MACCH. MOTRICE



IN TEORIA SONO INTERSCAMBIABILI SE CAPOVOLTO DI 180°

MACCH. INTERCAMBIABILI → POMPE-TURBINE

MACCH. AD AZIONE O AD IMPULSO SE SFRUTTA QDM (SPINTA), (QDM USCENTE TRASCURABILE)

PUÒ SUCCEDERE CHE NELLA GIRANTE SI TRASF. PRESS. IN VELOC. X FAVORIRE SPINTA X REAZIONE

X MACCH. MOTR. SUCCEDE SIA IN GIRANTE CHE NEL DIFFUSORE

GRADO DI REAZIONE: SE C'È CADUTA DI PRESSIONE NELLE GIRANTE

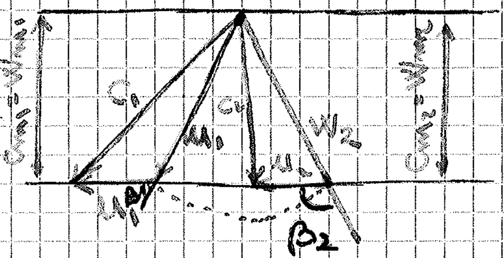
(PUÒ ESSERE = ∅ X MACCH. OPERATRICI

R, χ HANNO VALORI NUMERI LEGGERMENTE $\neq$

TURBINA MONOSTADIO ASSIALE AD IMPULSO

TURBOMACCHINA MOTRICE AD AZIONE $\rightarrow R = \emptyset$ OPPURE $\chi = \emptyset$

$R = 0 \rightarrow |W_1| = |W_2|$ $\quad u_1 = u_2$



$(C_{m_2} = W_{m_2}) = (C_{m_1} = W_{m_1})$

MACCHINA AD AZIONE $\Rightarrow$ PALETTATURA SIMM.

MA I TRIANGOLI NON SONO SIMM!!

(C_1 NON SIMM. A C_2)

$L_{is} = -(u_2 C_{u_2} - u_1 C_{u_1}) = u (C_{u_1} - C_{u_2})$

$C_{u_2} = W_{u_2} + u$

$W_{u_2} = W_2 \cos \beta_2 = W_1 \cos \beta_1 \overset{(<0)}{=} -W_{u_1} = -W_1 \cos \beta_1$

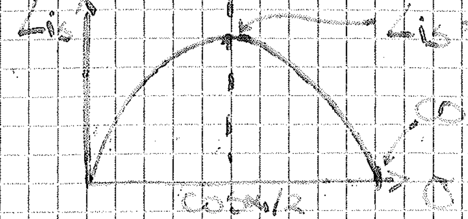
$W_{u_1} = C_{u_1} - u$

$C_{u_2} = -(C_{u_1} - u) + u$ $\qquad C_1 \cos \alpha_1$

$L_{is} = u (C_{u_1} + (C_{u_1} - u) - u) = 2u (C_{u_1} - u)$

$= C_1^2 \cdot 2 \cdot \left(\frac{u}{C_1}\right)\left(\cos \alpha - \left(\frac{u}{C_1}\right)\right)$ $\qquad \sigma = u / C_1$

$= C_1^2 \, 2\sigma \cdot (\cos \alpha_1 - \sigma)$



$L_{is} = C_1^2 \left(\frac{\cos \alpha_1}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} C_1^2 \cos^2 \alpha_1$

$L_i = \frac{1}{2} C_{u_1}^2$

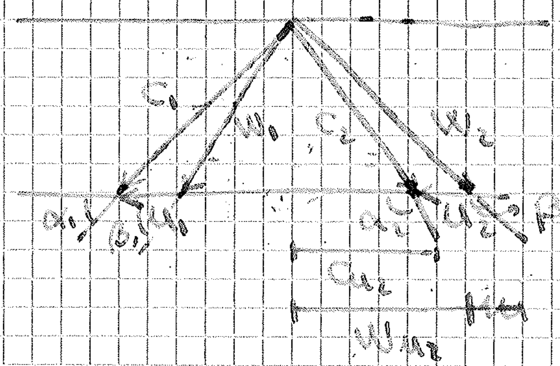
TURBINA MONOSTADIO ASSIALE A REAZIONE
↳ MOTRICE ↳ $u_1=u_2$
CON GRADO DI REAZ. CINETICO $R = 0,5$

$$R = \frac{(w_2^2-w_1^2)-\cancel{(u_2^2-u_1^2)}}{-(c_2^2-c_1^2)+(w_2^2-w_1^2)-(u_2^2-u_1^2)} = \frac{1}{2}$$

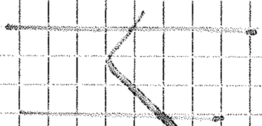
$$(w_2^2-w_1^2) = \frac{1}{2}(w_2^2-w_1^2) - \frac{1}{2}(c_2^2-c_1^2)$$

$$\frac{1}{2}(w_2^2-w_1^2) = \frac{1}{2}(c_1^2-c_2^2) \Rightarrow w_2^2+c_2^2 = w_1^2+c_1^2$$

SCELGO CASO PARTICOLARE IN CUI:
$w_2^2=c_1^2$; $w_1^2=c_2^2$



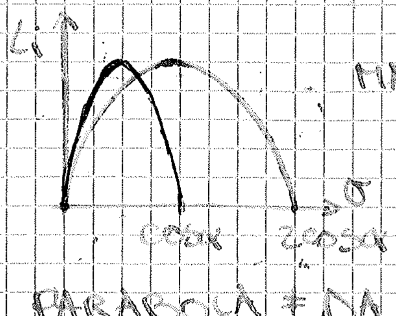
$\alpha_1+\beta_2=180° = \alpha_2+\beta_1$
$c_{u2} = -w_{u1}$
$w_{u2} = -c_{u1}$
TRIANGOLI SIMMETRICI



PALETTE ASIMMETRICHE
$(\beta_1 \neq \beta_2)$

$L_i = -(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) = u(c_{u2}-c_{u1})$

$c_{u1} = c_1\cos\alpha_1$ $\qquad L_i = c_1^2\left(\frac{u}{c_1}\right)\left[2\cos\alpha_1-\left(\frac{u}{c_1}\right)\right]$
$c_{u2} = w_{u2}+u$ $\qquad = c_1^2\,\sigma\,[2\cos\alpha_1-\sigma]$
$= -c_{u1}+u$
$w_{u2} = -c_{u1}$



MAX A c_{u1}^2

IN BASE A σ USO
MACCHINA AD AZIONE
O A REAZIONE

PARABOLA ≠ DA PRIMA

X LA GIRANTE:

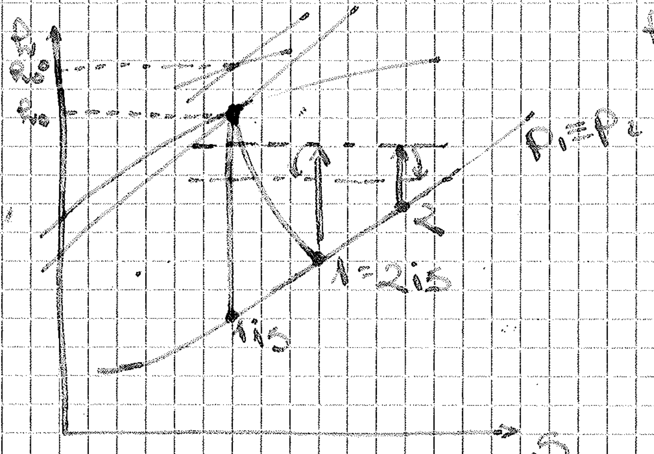
$$Q = \Delta h + L_i + \Delta E_c + \Delta E_g + \Delta E_p$$

$$\cancel{Q} = (h_{2is} - h_1) + \cancel{Q} + \frac{w_{2is}^2 - w_{1is}^2}{2} - \cancel{\frac{u_2^2 - u_1^2}{2}}$$

SE $\lambda = \phi \Rightarrow W_{1is} = W_1$

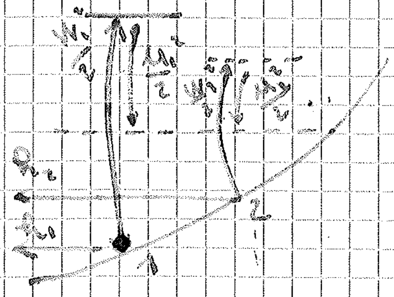
$$Q = \Delta h + L_i + \Delta E_c + \ldots$$

$$\phi = h_2 - h_0 + L_i + \frac{c_2^2 - c_0^2}{2} \qquad \underbrace{h_0 + \frac{c_0^2}{2}}_{h_0^0} = \underbrace{h_2 + \frac{c_2^2}{2}}_{h_2^0} + L_i$$



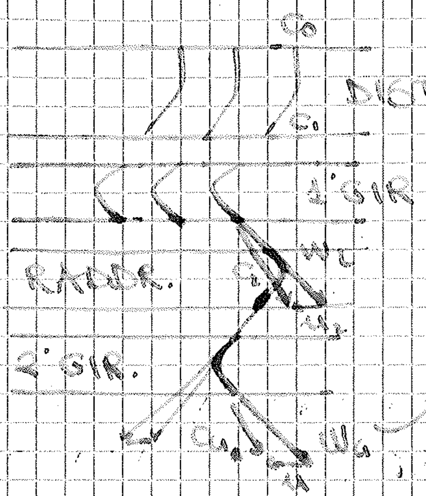
$$h_1 + \frac{W_1^2}{2} - \cancel{\frac{u_1^2}{2}} = h_{2is} + \frac{W_{2is}^2}{2} - \cancel{\frac{u_2^2}{2}} = h_2 + \frac{W_2^2}{2} - \cancel{\frac{u_2^2}{2}}$$

SE $u_2 < u_1$



CI SONO 2 STADI AD AZIONE

IL PRIMO È UN VERO DIFF[illegible], LA 2ª PALETTATURA FISSA NON RIACCELERA, SERVE SOLO X RADDRIZZ.



DIVENTA SEMPRE + DEFLESSO (+ SIMILE ALL'ESSE)

RIESCE QUANDO $\frac{u}{c_1}$ È PICCOLO

ALLA FINE DELLE 2 GIRANTI (+ 2 RADDRIZZATORI)

NELLA RUOTA CURTISS:

$$L_i = \underbrace{-(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})}_{L_i(I)} \underbrace{-(u_4 c_{u4} - u_3 c_{u3})}_{L_i(II)}$$

$$L_i = u(c_{u1} - c_{u2}) + u(c_{u3} - c_{u4})$$

$$c_{u2} = w_{u2} + u = -\psi(c_{u1} - u) + u$$

$$w_{u2} = \psi w_{u1} = -\psi(c_{u1} - u)$$

$$w_{u1} = c_{u1} - u$$

$$L_i = u(1+\psi)(c_{u1} - u) + u(1+\psi')(c_{u3} - u)$$

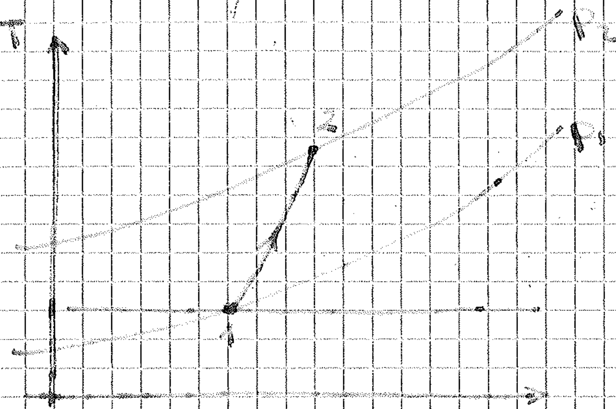
$$c_{u3} = \varphi' c_{u2}$$

CONVIENE INTERREFRIGERARE? NON SOVRACCARI CARE FATICA ∀ COMPRESSORE.

ASSIALE ?

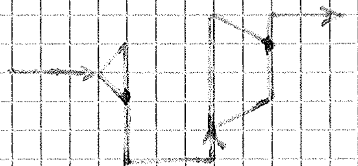
$\beta_c = \frac{p_2}{p_1}$

RAPPORTO COMPRESS.

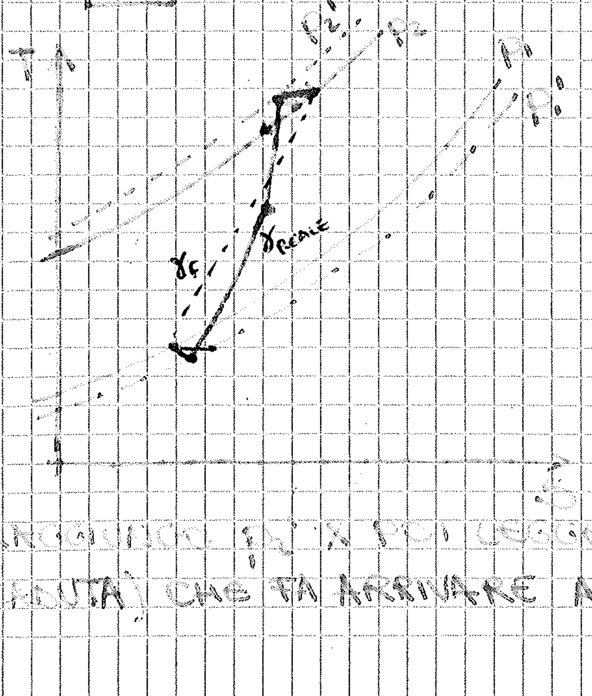


QUESTO È QUELLO CHE VEDI DA FUORI (GLOBALMENTE)

IN REALTÀ ALL'INIZIO C'È UN INVITO



FUNZIONA DA PICCOLO EFFUSORE (FA IL RISUCCHIO)



DA p_1 A p_1'

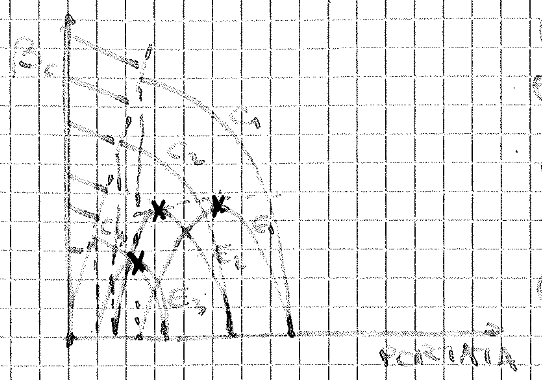
O ISOTERMICO (TRAT. CAMB. ISOENTALPICO DI JOULE-THOMSON)

O LEGGERA PERDITA

USIAMO γ_{finale} CHE CONSIDERA PERDITE

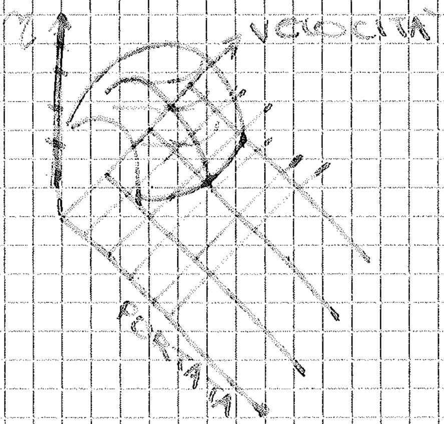
RACCORDO [illegible] X POI LEGGERA PERDITA X [illegible] (CADUTA) CHE FA ARRIVARE A p_2

SE $C_2 \neq C_1$ ANCHE $E_2 \neq E_1$ CON ANCHE UN MAX ≠



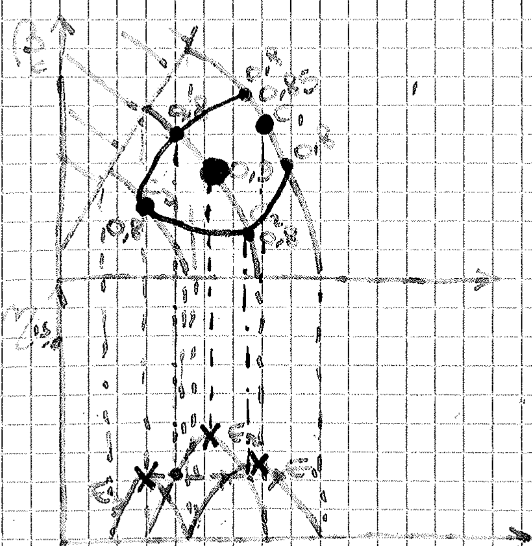
LE E SI SOVRAPPONGONO E SI SPOSTANO ANCHE I MAX
↓
MA HANNO UN MAX DEI MAX A UNA CERTA VELOCITÀ (NEL NOSTRO CASO IL RENDIM. MAX È MAX PER E_2)

CAMBIA LA VELOCITÀ U, CAUSANDO URTI DI EXTRADOSSO/INTRADOSSO SE VARIA, QUINDI PEGGIORA IL η



SE TAGLIO ORIZZONTALM. OTTENGO SUP. CHIUSE CON ISORENDIMENTO CONCENTRICHE

È UN SUPERFICIE TOPOGRAFICA (PROIETTABILE SENZA SPAZI/CONTRADDIZ.)
↓
NO SOTTOSQUADRI
↓
NON VISTO IN CARTINA GEOGRAFICA TOPOGRAFICA



IN E_2 C'È IL MAX DEI MAX

IL MAX η DI E_3 LO TROVO TROVO 2 VOLTE SU E_2 (E ANCHE SU E_1)

LE 2 SEZ. SONO ≠, MA HANNO LA STESSA u
↳ CONVIENE USARE LE u E IL RAPPORTO TRA I DIAMETRI
↳ FORMA ≠

α_1 PUÒ ESSERE ≠ α_2 E COSÌ VIA

$$u_1 = \omega \cdot r_1 = 2\pi \left[\frac{rad}{giro}\right] \cdot \frac{n\,[giri/min]}{60\,[s/min]} \cdot \frac{d_1\,[m]}{2}$$

$$= \text{COST} \cdot n \cdot d$$

$$c_{m_1} = \text{COST} \cdot n \cdot d \cdot f(\alpha, \beta, \delta)$$

$$G = \rho A c = \frac{AC}{V} = K_G \cdot \frac{n d^3}{V} f_G(\alpha, \beta, \delta) \cdot \Xi_1 \left(\frac{b_1}{d_1}\right)$$

POSSIAMO RIFERIRCI ALLA SEZ. + COMODA → 1/2

$$L_{ic} = -(u_2 c_{u_2} - u_1 c_{u_1}) < \emptyset$$

↳ POICHÉ MACCH. (OPERATR.)

OPPURE USO IN MODULO $|L_{ic}|$

$$|L_{ic}| = u_2^2 f(\alpha_2, \beta_2) - u_1^2 (\alpha_1, \beta_1) = u^2 f(\alpha, \beta, \delta)$$

$$\delta = \frac{d_2}{d_1} = \frac{u_2}{u_1} \qquad |L_{ic}| = K_i n^2 d^2 f_i(\alpha, \beta, \delta)$$

POTENZA:

$$P_i = G \cdot |L_{ic}| = \ldots = K_p \frac{n^3 d^5}{V} f_p(\alpha, \beta, \delta) \cdot \Xi_1 \left(\frac{b_1}{d_1}\right)$$

X FAR RADDOPPIARE n DEVO FARE P X 8 VOLTE

(SE STESSA FORMA MA DIM. DOPPIE → 32 VOLTE LA P
FISSATE LE ALTRE CONDIZIONI AL CONTORNO

$$\underset{\text{UNITARIA}}{|L_{ic}|} = \frac{P_{ic}}{G} = K_p \frac{n^3 d^5}{GV} f(\alpha, \beta, \delta) \, \Xi_1 \left(\frac{b_1}{d_1}\right)$$

$$\frac{n^3 d_1^3}{RT_1}\left(\frac{p_1 d_1^2}{\underbrace{G\,RT_1}_{v_1}}\right) = \left(\frac{n\, d_1}{\sqrt{RT_1}}\right)^3 \left(\frac{p_1\, d_1^2}{G\sqrt{RT_1}}\right)$$

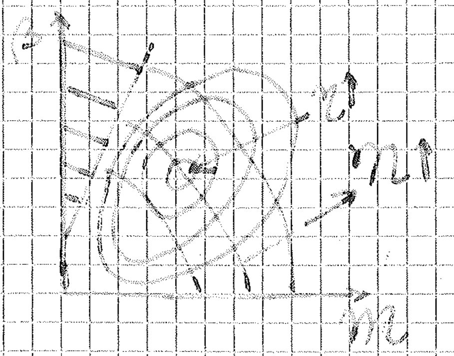
$$(RT_1)^2 = \left(\sqrt{RT_1}\right)^3 \cdot \sqrt{RT_1}$$

$$\frac{\sqrt{RT_1}}{d_1} = \frac{\sqrt{\frac{m^2}{s^2 K}\cdot K}}{m} = \frac{\sqrt{\left(\frac{m}{s}\right)^2}}{m} = \frac{m/s}{m} = \left[\frac{1}{s}\right] = n^*$$

STESSA COSA X TERMINE VICINO A G, HA LE STESSE DIM. CHE CHIAMO G^*

$$\underbrace{\left(\frac{n}{n^*}\right)^3}_{=\,\tilde{n}} \underbrace{\left(\frac{G^*}{G}\right)}_{=\,\tilde{m}} \longleftarrow \text{RAPPORTI ADIM.}$$

SUL GRAFICO β E η SONO GIÀ ADIMENSIONALI, COSÌ RIUSCIAMO (USANDO $\tilde{n}$ E $\tilde{m}$) OTTENGO GRAFICO CON 4 PARAM. ADIM.



POSSO ADATTARE GRAFICO ALLE CONDIZ. CLIMATICHE COME RAPPORTI

ENTRO CERTI LIMITI IL GRAFICO VALE ANCHE X GAS ≠.

POSSO USARE LO STESSO GRAFICO X TAGLIA DI MACCHINE ≠ (SI COMPENSANO)

POSSO USARE LO STESSO GRAFICO X ≠ CONDIZ.

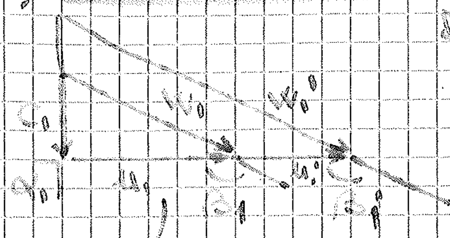
∃ SEMPLIFICAZIONE

SE USO SEMPRE X L'ARIA POSSO TOGLIERE R

QUINDI USO: $\frac{n\, d_1}{\sqrt{T_1}}$ $\frac{G\sqrt{T_1}}{p_1 d_1^2}$ (NON + ADIM.)

MACCH. GEOMETRICAM. SIMILI HANNO PALETTATURE SIMILI, CON STESSI ANGOLI

2) CINEMATICA → SE SONO SIMILI I TRIANGOLI DI VELOCITA'



POSSO RIFERIRSI A MACCHINE GEOMETRICAM. SIMILI MA ≠ X DIMENS. (E ≠ G), CHE LAVORANO CON CINEMATICA SIMILE

NELLA STESSA MACCHINA POSSO FAR LAVORARE IN CONDIZ. MA CON SIMILITUDINE CINEMATICA

3) FLUIDODINAMICA → SE LE DISSIPAZ. FLUIDODIN. (L_w) SEGUO LA STESSA LEGGE CON I LAVORI

$$L_{wc} = COST \cdot w_2^2 = \xi\, w^2/2 = CONST\, \xi_1\, n^2 d^2 f(\alpha,\beta,\delta)$$

$$|L_{ic}| = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1} = \ldots = \underbrace{u_2^2}_{n^2 d^2} f(\alpha,\beta,\delta) \rightarrow \frac{L_{wc}}{|L_{ic}|} = COST\, \xi\, f(\alpha,\beta,\delta)$$

$$\eta_{y,c} = 1 - \frac{L_{wc}}{L_{ic}} = //$$

4) TERMOFLUIDODINAMICA → 1) + 2) + 3)

$$\lambda = \frac{L_i}{c_p T_1} \leftrightarrow \text{SON T.F.DIN} \approx \Longleftrightarrow \lambda = COST.$$

$$G = \frac{A \cdot c}{v} = COST\, \xi_1 \left(\frac{b_1}{d_1}\right) \cdot \frac{n}{v} f_G(\alpha,\beta,\delta) \cdot d^3$$

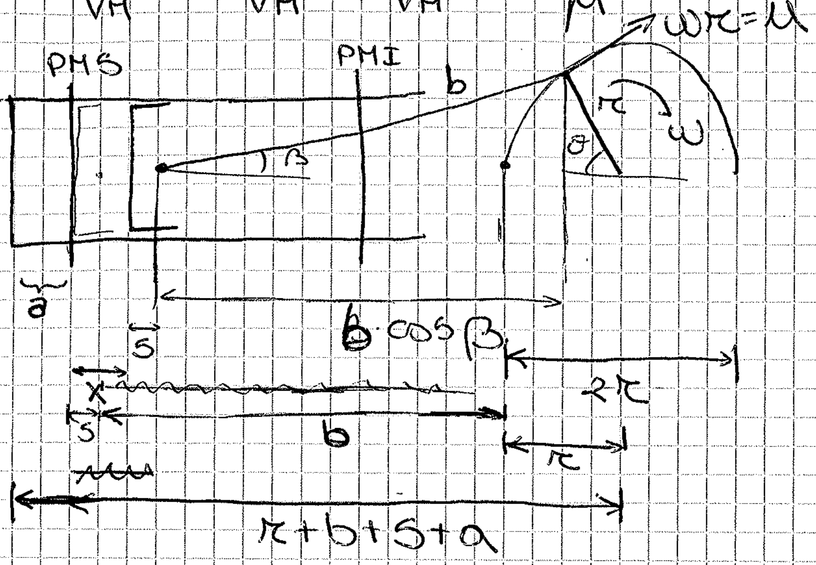
$$|L_{ic}| = k_i\, n^2 d^2 f_i(\alpha,\beta,\delta)$$

$$P_{ic} = \ldots = k_p \frac{n^3 d^5}{G v} \xi_1 \left(\frac{b_1}{d_1}\right) f_p(\alpha,\beta,\delta)$$

$$\boxed{\beta_c = \left[1 + COST \cdot \eta_{is,c} \frac{n}{m}\right]^{c_p/R}} \leftarrow \beta_c = \left(1 + \eta_{is,c} |L_{ic}| \frac{k-1}{k} \cdot \frac{1}{R T_1}\right)^{k/(k-1)}$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \dfrac{V_{MAX}}{V_{MIN}} = \dfrac{V_1}{V_M} \longrightarrow \text{RAPPORTO DI COMPRESSIONE VOLUMETRICO} \\ \mu = \dfrac{V_M}{V} \end{cases}$$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_M} = \frac{V + V_M}{V_M} = \frac{V}{V_M} + 1 = \frac{1}{\mu} + 1$$



$$a + b + s + r = a + x + s + b\cos\beta + r\cos\theta$$

$$x = r(1-\cos\theta) + b(1-\cos\beta)$$

$$= r\left[(1-\cos\theta) + \frac{1}{\lambda}(1-\cos\beta)\right]$$

$$\frac{x}{c} = \frac{1}{2}\left[(1-\cos\theta) + \frac{1}{\lambda}(1-\cos\beta)\right]$$

$r \sin\theta = b \sin\beta$ TEOREMA DEI SENI

$$\operatorname{sen}\beta = \lambda \operatorname{sen}\theta$$

$$\cos\beta = \sqrt{1-\sin^2\beta} = \sqrt{1-\lambda^2\sin^2\theta}$$

$$x = r\left[(1-\cos\theta) + \frac{1}{\lambda}\left(1-\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\theta}\right)\right]$$

$$= r\, f_x(\lambda, \theta)$$

$$Q = \Delta U + \mathcal{L}$$

$\mathcal{L} \rightarrow \int p\,dV - \mathcal{L}_w$

$\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}_{as} + \mathcal{L}_{am}$

$\mathcal{L}_{as} \Rightarrow \mathcal{L}_e$; $\mathcal{L}_{am} \Rightarrow \Delta E_{cg}, \dots$

$$\int_{sup} (c_p, \tau)_{sup}\, dH_{sup}\, dx$$

$$\int_{sup} p\,dV - \mathcal{L}_{w_{sup}}$$

$$\mathcal{L}_{ciclo} = \mathcal{L}_o = \oint p\,dV + \cancel{\mathcal{L}_{wo}}^{\,0}$$

$= $ AREA INTERNA DELLA FIGURA

$$\mathcal{L}_o = \underbrace{\int_1^2 p\,dV}_{<0} + \underbrace{\int_2^3 p\,dV}_{<0} + \underbrace{\int_3^4 p\,dV}_{>0} + \underbrace{\int_4^1 p\,dV}_{>0}$$

L'AREA NETTA INTERNA HA UN VALORE NEGATIVO

È IL LAVORO DI UNA MACCHINA OPERATRICE ($\mathcal{L}_o < 0$)

$$|\mathcal{L}_o| = \left|\int_1^2 p\,dV\right| + \left|\int_2^3 p\,dV\right| - \left|\int_3^4 p\,dV\right| - \left|\int_4^1 p\,dV\right|$$

$$\mathcal{L}_o = \oint p\,dV = -\oint V\,dp = -\int_1^2 V\,dp - \underbrace{\cancel{\int_2^3 V\,dp}}_{0} - \int_3^4 V\,dp - \underbrace{\cancel{\int_4^1 V\,dp}}_{0}$$

SI VEDE DAL GRAFICO

NON SONO PERÒ I LAVORI X LE SINGOLE FASI (VALE SOLO IL COMPLESSIVO)

$$\mathcal{L}_o = -\underbrace{\int_1^2 V\,dp}_{\gamma} - \underbrace{\int_3^4 V\,dp}_{\gamma'} = -\frac{\gamma}{\gamma-1}(p_2V_2 - p_1V_1) - \frac{\gamma'}{\gamma'-1}(p_4V_4 - p_3V_3)$$

p_1, p_2 SONO SPESSO NOTI $\rightarrow p_4 = p_1$; $p_3 = p_2$

V_1, V_3 NOTI DALLA GEOMETRIA

$V_3 = V_M$

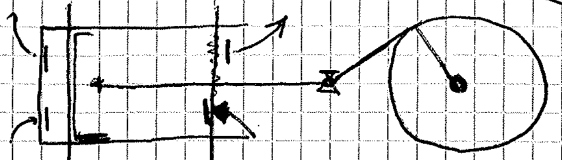
QUELLO CHE ABBIAMO CALCOLATO È IL LAVORO PER UN CICLO

È IMPORTANTE IL NUMERO DI CICLI NELL'UNITÀ DI t

$$f_c\left[\frac{cicli}{s}\right]=\frac{1}{60[s/min]}\cdot n\left[\frac{giri}{min}\right]\cdot z\left[\frac{cicli}{giri}\right]$$

Hz

∃ A DOPPIO EFFETTO → A TESTA A CROCE



$z=2$

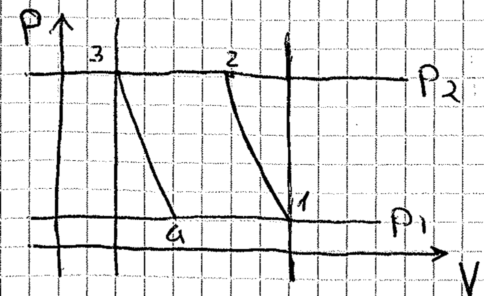
NEGLI ESEMPI PRECEDENTI $z=1$

$$\begin{cases} \mathcal{L}_0 = \dots\left[\frac{joule}{ciclo}\right] \\ f_c = \dots\left[\frac{cicli}{s}\right] \end{cases} \Longrightarrow \mathcal{L}_0 f_c = P_{CICLO}$$

$\hat{P}_{MOTORE\ ESTERNO}$

$P_M = \frac{P_{io}}{\mu_0}$ → RENDIMENTO ORGANICO/MECCANICO

È IMPORTANTE LA MASSA ELABORATA PER CICLO



$m_{aspirata} = m_1 - m_4$

$m_{mand} = m_2 - m_3$

$m_{asp} = m_{mand}$ SE $\eta_{\varphi_{1,2}} = 1$

$$\eta_{\varphi_{1,2}} = \frac{m_{mand}}{m_{asp}}$$

$$m_{asp} = m_1 - m_4 = \rho_1 V_1 - \rho_4 V_4 = \frac{p_1}{RT_1} V_1 - \frac{p_4}{RT_4} V_4$$

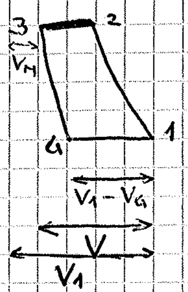
T_1 E T_4 VISTI = X TRAFILAM. ISOENTALPICO

$p_1 = p_4$, $R_1 = R_4 = R$

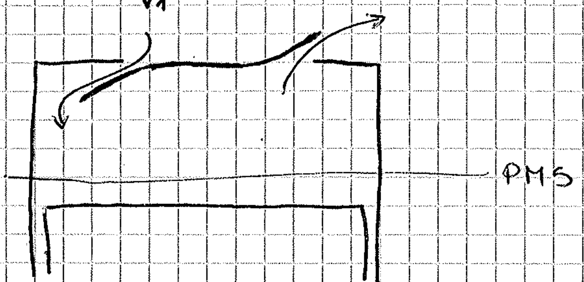
$$m_{rif} = \rho_a V = \frac{p_a}{R T_a}(V_1 - V_M) = \frac{p_a}{R T_a} V_1 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$$

λ_v = COEFF. DI RIEMPIM. = $\frac{m_{man}}{m_{rif}} = \eta_{\varphi 12} \frac{p_1/p_a}{T_1/T_a} \underbrace{\frac{\varepsilon - \beta_c^{1/\gamma}}{\varepsilon - 1}}_{\frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_M}}$

IMPROPRIAM. CHIAMATO RENDIM. VOLUMICO



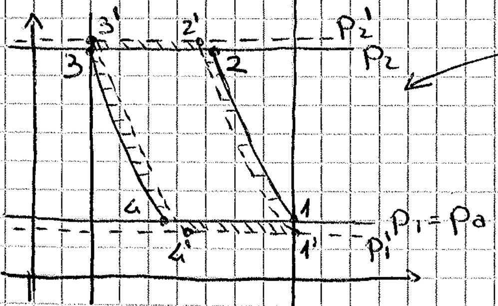
I GAS DEL V_M
RUBANO SPAZIO
ESPANDENDOSI



HO DELLE PICCOLE
PERDITE DI PRESS.
NELLE VALVOLE
↳ LAMINAZIONI

$+\Delta p$ $\quad -m_{asp}$

HO 2 EFFETTI COSTRANTANTI



$$p_1' = p_1 - \Delta p_1 = p_1(1 - \delta_1)$$

$$p_2' = p_2 + \Delta p_2 = p_2(1 + \delta_2)$$

$$\beta_c = \frac{p_2}{p_1} \qquad \beta_c' = \frac{p_2'}{p_1'}$$

$$\beta_c' = \frac{p_2}{p_1} \frac{1 + \delta_2}{1 - \delta_1} = \beta_c \delta_c$$

↳ COMPLESSIVO

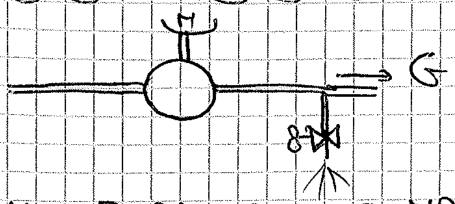
NELLA REALTÀ CURVE DA ~~p~~ 2' A 3' E DA 4' A 1'
SONO + COMPLICATE

$$\mathcal{L}_0 = \ldots \underbrace{p_1(1 - \delta_1)} \ldots \left[\left(\underbrace{\beta_c \delta_c}\right) \ldots\right] \ldots$$

TUTTE LE VOLTE CHE COMPAIONO NELLE FORMULE

OPPURE METODO TRAMITE RIFLUSSO O DISPERS.

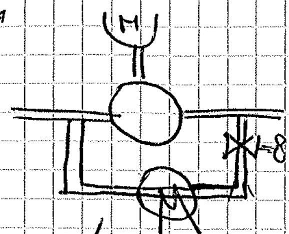
DISPERSIONE



HO PERDITE E COMPRESS. INUTILE, MA NON MODIFICO η E A VOLTE CONVIENE

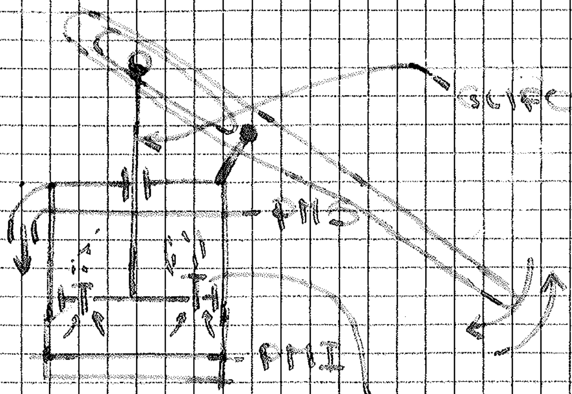
PROBL: SE FLUIDO PREZIOSO O PERICOLOSO NON POSSO, DEVO RICIRCOLARE

RIFLUSSO



MA SERVE UNA REFRIGERAZIONE X NON FARE LAVORO IN + E IN + METTO VALVOLE X CADUTE DI p

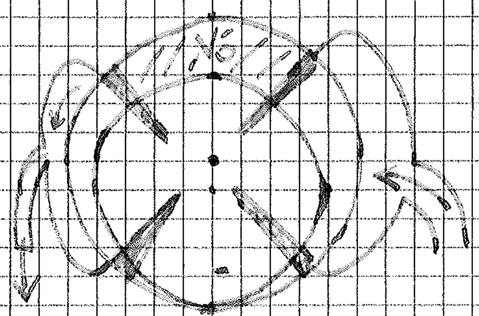
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 232



POMPA MANUALE

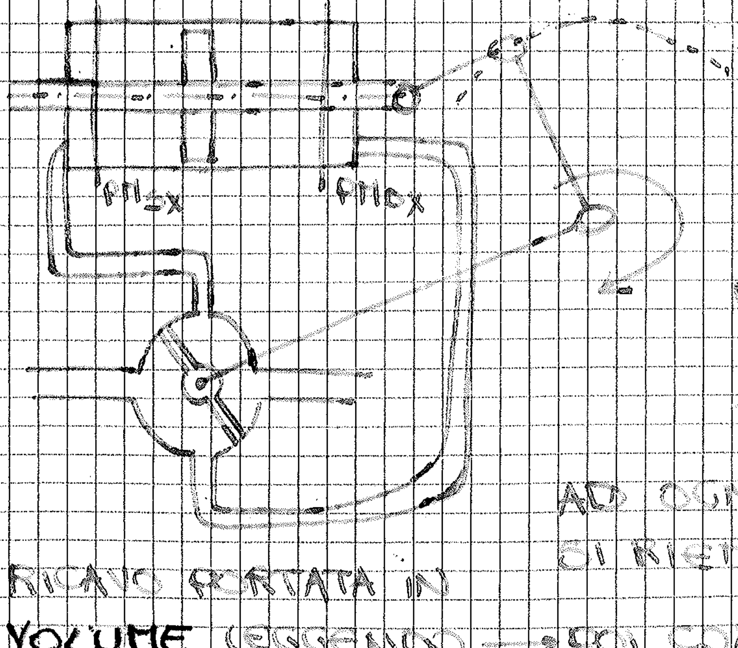
VALVOLE SULLO STANTUFFO
(AUTOMATICHE)

ROTATIVE A PALETTE



POICHÉ È INCOMPRIMIBILE

MACCHINA MOTRICE IN FOLLE
STRUMENTO DI MISURA



SUBISCE UNA
CADUTA DI
PRESSIONE

USATO X MISURA
LA PORTATA DI
FLUIDO

AD OGNI GIRO UNA CAMERA
SI RIEMPIE L'ALTRA SI SVUOTA

RICAVO PORTATA IN
VOLUME LEGGENDO
I GIRI DELL'ALBERO

POI CONOSCENDO ρ
RICAVO LA PORT. MASSICA

$P_{ip} = G|L_{ip}| = \rho \frac{Q}{\eta_{vp}} \cdot \frac{g H_p}{\eta_{yp}} = \frac{1}{\eta_{ip}} \rho g Q H_p$

$|L_{ip}| - L_{wp} = g H_p \rightarrow \eta_{yp} = \frac{g H_p}{|L_{ip}|} = \frac{|L_{ip}| - L_{wp}}{|L_{ip}|}$

PELTON X PORTATE RELATIVAM. PICCOLE CON PREVALENZE GRANDI (X GRANDI DISLIVELLI GEODETICI)

LE ELICHE/KAPLAN FANNO IL MINIMO DELLA RESISTENZA QUINDI CON PORTATE GRANDI, MA PREVALENZE BASSE (+ CENTRALI IN SERIE)

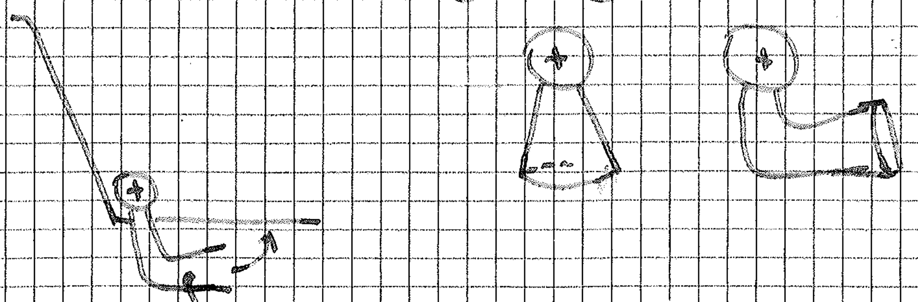
LE FRANCIS SONO UNA VIA DI MEZZO

(+ CENTRALI IN //)
↳ + USATO

MOTRICI → DISTR + GIRANTE + DIFFUSORE
PUÒ ESSERE PALETTATO O MENO

OPERATRICI → GIRANTE + DIFFUSORE
PRE-GIRANTE +
↳ X GUIDARE IL FLUSSO

DEVO LASCIARE DELL'ENERGIA CINETICA AL FLUIDO IN USCITA, PER EVITARE CONVIENE USARE SBOCCO A BOCCA PIENA ↖ DIFFUSORE X MACCH. MOTRICI



D < Desterna

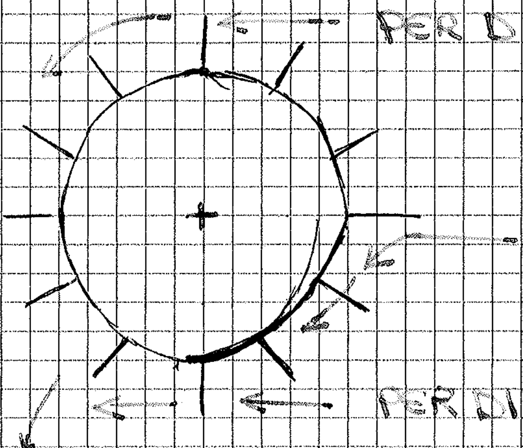
TRASPORTO H_2O → CONDOTTE FORZATE

A BOCCA PIENA → A PELO LIBERO { A CIELO APERTO / IN CONDOTTE

I TORRENTI HANNO A MONTE DELLE FRANCIS O DELLE PELTON

I FIUMI A FONDO VALLE CON ELICHE

A FLUSSO TANGENZIALE



IN BASE AL LUOGO E ALLE ESIGENZE

RUOTE DEI MULINI TRADIZIONALI/...

DA QUESTA È NATA LA PELTON

HA DEI SECCHIELLI (BUCKET)

COME LE VECCHIE NORIE → SIA OPERATRICE CHE MOTRICE

SVUOTA I SECCHIELLI IN UN PUNTO + IN ALTO

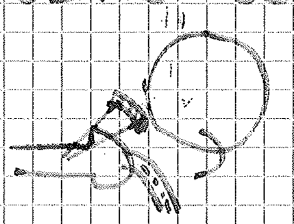
PELTON NEL PERIODO DELLA CORSA ALL'ORO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 232

SE DEVO BLOCCARE LA RUOTA

SE CHIUDESSI SOLO VALVOLA IN BASSO X COLPO D'ARIETE DELLA COLONNA SUP. SI ROMPEREBBE

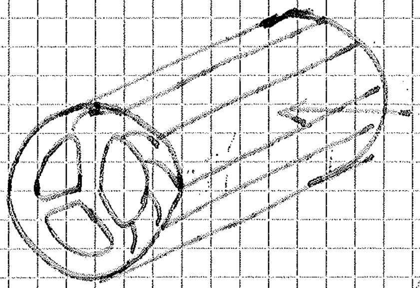
SI USANO TEGOLE, CHE DEVIANO IL FLUSSO



SE INVECE CHIUDESSI VALVOLA IN CIMA, SI FAREBBE COLPO D'ARIETE INVERSO, CHE COMPEREBBE LA TUBAZIONE

MACCHINA AD AZIONE

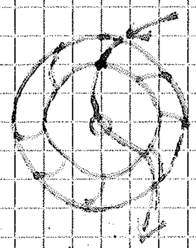
∃ ANCHE PERÒ UNA PELTON ASIMM.: TURGO



PROBL: ELIMINARE H_2O DA DENTRO LA CAVITÀ DOPO IL 1 URTO

↓

SISTEMI APPOSITO

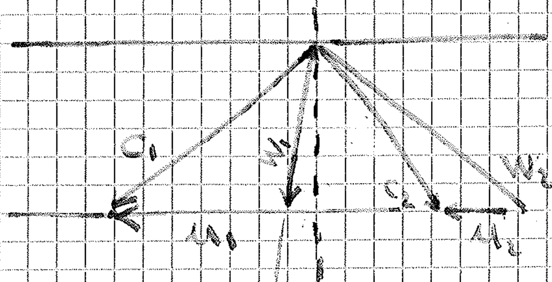


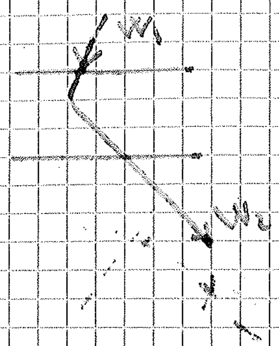
H_2O ESCE FUORI E IN + SFRUTTARE EN. CINETICA SECONDARIA NEL 2° URTO

TURBINA AD AZIONE <u>BANQUI-MITCHELL</u>

↓

PRODOTTA DA DITTA: OSSBERGER
(NE DETIENE IL BREVETTO)



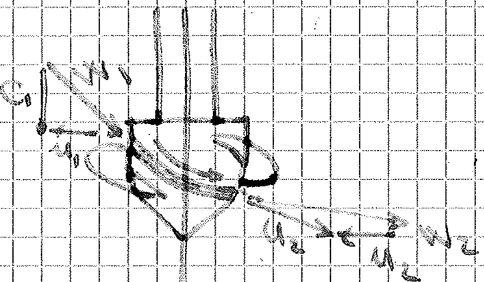


AD ELICA

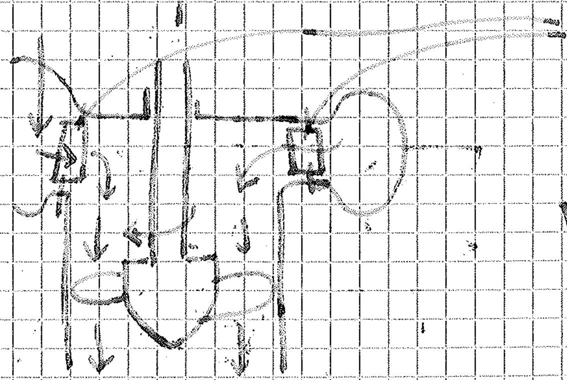
PROPELLER (SE NON A PALETTE ORIENTABILI)

TURBINA ASSIALE

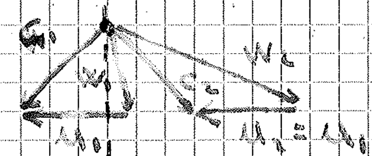
PALETTE TOZZE/ARROTONDATE/POCO NUMEROSE (≈ ELICA PROPULSIVA MARINA)



LA COMP. MERIDIANA PUÒ ESSERE = POICHÉ CAMBIA POCO LA SEZ.



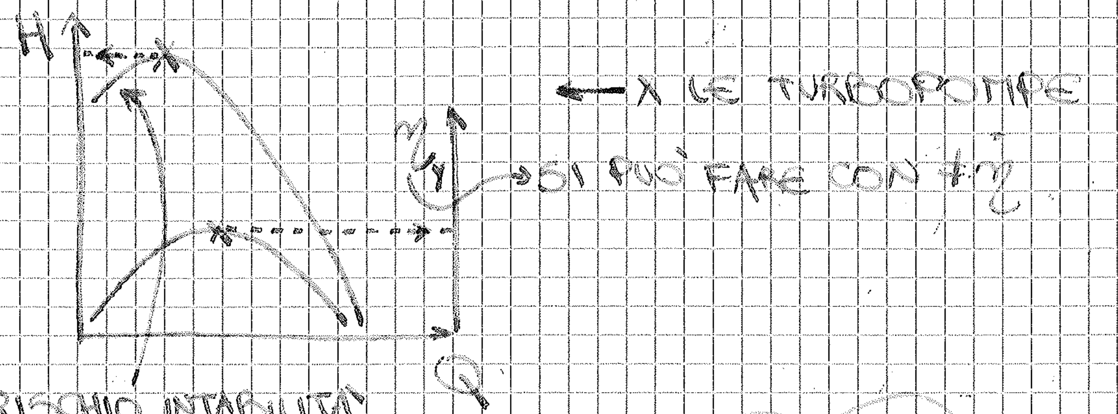
DISTRIBUTORE
↓
SE INCLINAZIONE È FATTA BENE SI CREA MOVIMENTO AD ELICA



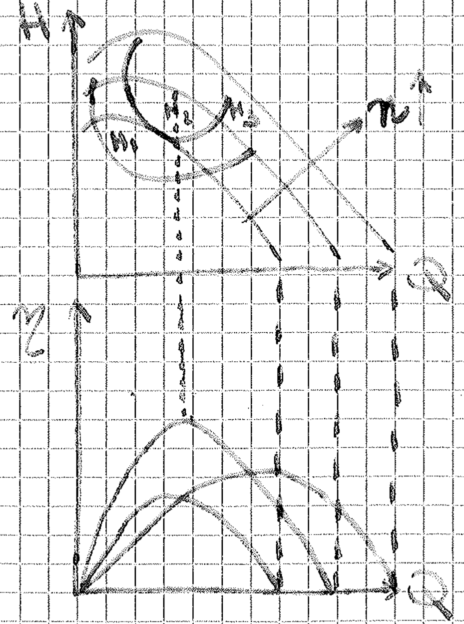
X REGOLAZIONE NON SI PUÒ VARIARE VELOCITÀ DI REAZIONE (U=COST.) A FREQ DI RETE DI 50 Hz, MA SI REGOLA LA PORTATA

TURBOPOMPE HANNO LE STESSE CARATTERISTICHE DELLE TURBINE

CI IMPORTANO: PREVALENZA (AL POSTO DI β) H, POI SI USA LA PORTATA VOLUMICA Q (TANTO ρ COST), IL PARAMETRO DI VELOCITÀ E I η



RISCHIO INTABILITÀ



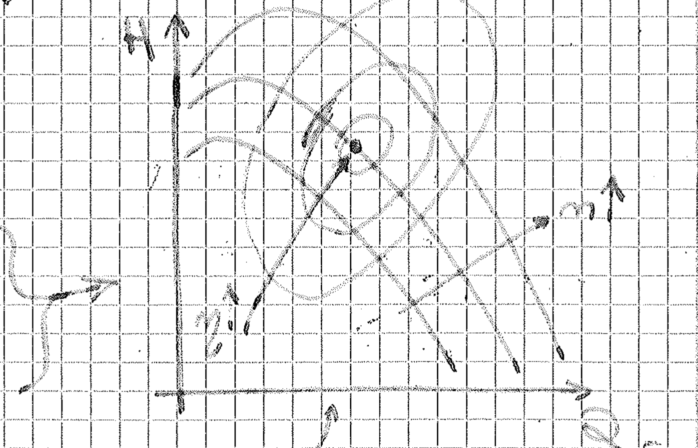


DIAGRAMMA COLLINARE

$H = f(Q, n) \qquad \eta_y = f(Q, n)$

$g H_t = L_{it} + L_{wt}$

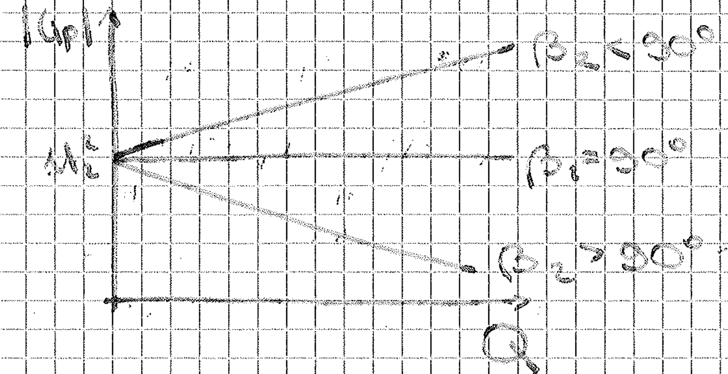
$g H_p = |L_{ip}| - L_{wp}$

$$\begin{cases} \eta_{yt} = \dfrac{L_{it}}{g H_t} = \dfrac{L_{it}}{L_{it} + L_{wt}} \\ \eta_{yp} = \dfrac{g H_p}{|L_{ip}|} = \dfrac{|L_{ip}| - L_{wp}}{L_{wp}} \end{cases}$$

$|L_{ip}| = u_2 \left(u_2 + \frac{Q}{A_2 \cot(\beta_2)} \right)$

SE $\beta_2 = 90°$ SCOMPARE IL 2° TERMINE

$|L_{ip}| = u_2^2 \rightarrow L_{ip}$ INDIP. DALLA PORTATA Q_v



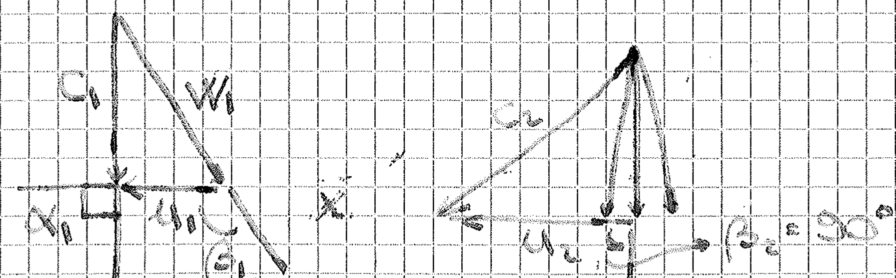
ORA DOBBIAMO CONSIDERARE $L_w = L_{w_{DIS}} + L_{w_{INC}}$

$L_{w_{DIS}} = C_f \cdot \frac{W^2}{2}$

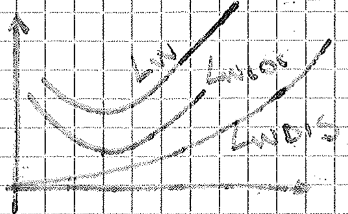
C_f DIPENDE DA Re E RUGOSITÀ

DIPENDE ANCHE DALLA PORTATA $W_m = Q/S$

CON PROFILO PARABOLICO RISPETTO ALLA Q



SE AUMENTO O DIMINUISCO LA PORTATA, MI ALLONTANO DA CONDIZ. OTTIMALE E $L_{w_{INC}} \uparrow$



EQUIVALENZA FLUIDODINAMICA:

$$G = \rho Q = \rho A c = \rho \xi_1 \pi \left(\frac{b}{d}\right) d^2 u f(\alpha, \beta, \delta)$$
$$= \rho \underbrace{\xi \left(\frac{b}{d}\right) n d^3 f(\alpha,\beta,\delta)}_{Q} \qquad u \to n d$$

$$|L_{ip}| = u_2 c_{u_2} - u_1 c_{u_1} = u^2 f_i(\alpha,\beta,\delta) = n^2 d^2 f_i(\alpha,\beta,\delta)$$

$$L_{wp} = \zeta_i \frac{w^2}{2} = \frac{1}{2} \zeta_i u^2 f_w(\alpha,\beta,\delta) = n^2 d^2 f_w(\alpha,\beta,\delta)$$

$$g H_p = |L_{ip}| - L_{wp} = n^2 d^2 f_H(\alpha,\beta,\delta)$$

$$\eta_{yp} = \frac{g H_p}{|L_{ip}|} = f_y(\alpha,\beta,\delta)$$

$$P_{ip} = G |L_{ip}| = \rho \frac{Q}{\eta_{yp}} \frac{g H_p}{\eta_{yp}} = \frac{1}{\eta_{ip}} \rho g Q H_p$$

$$= \frac{\rho g \xi_1 \left(\frac{b}{d}\right) n d^3 f_Q(\alpha,\beta,\delta) n^2 d^2 f(\alpha,\beta,\delta)}{f(\alpha,\beta,\delta)}$$

$$P_{ip} = \rho g \xi_1 \left(\frac{b}{d}\right) n^3 d^5 f_P(\alpha,\beta,\delta)$$

$$\begin{cases} G = \rho Q = \dots = K_G n d^3 f_G(\alpha,\beta,\delta) \left(\frac{b}{d}\right) \xi_1 \\ Q = A \cdot c = \dots = K_Q n d^3 f_Q(\alpha,\beta,\delta) \left(\frac{b}{d}\right) \xi_1 \end{cases}$$

$$\left.\begin{matrix} L_{ic} \\ |L_{ip}| \end{matrix}\right\} = \dots = K_i n^2 d^2 f_i(\alpha,\beta,\delta)$$

$$L_{wc} = \dots = K_w n^2 d^2 f_w(\alpha,\beta,\delta)$$

$$g \cdot H_{cp} = \dots = K_H n^2 d^2 f_H(\alpha,\beta,\delta) \cdot f(\eta_y)$$

$$P_{i,p} = \dots = K_P n^3 d^5 \left(\frac{b}{d}\right) \xi_1 f_P(\alpha,\beta,\delta) f(\eta_y)$$