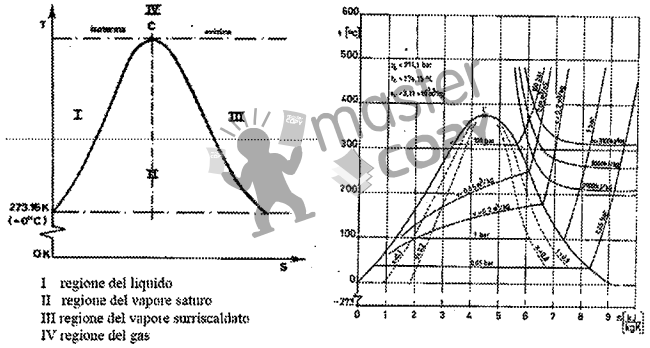
Machine a fluido: cicli e macchine motrici a vapore

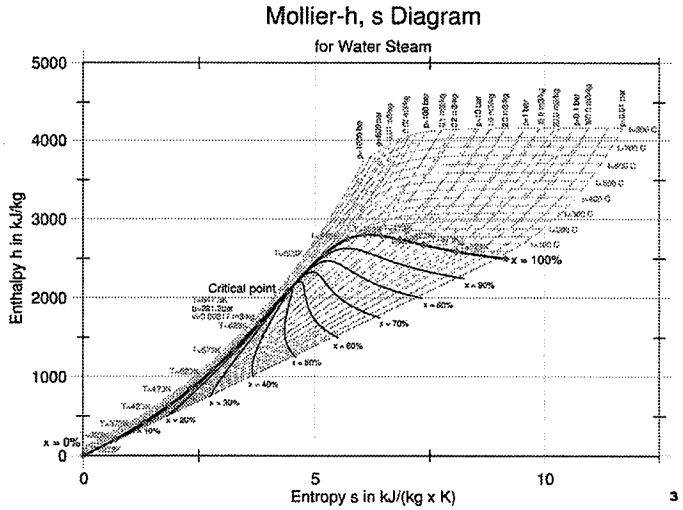
Sistemi liquido vapore: impianti motori termici che impiegano fluidi bifase utilizzando l'acqua come fluido evolvente.

Per la loro rappresentazione si utilizzano i diagrammi ***T-S*** e ***h-S***.

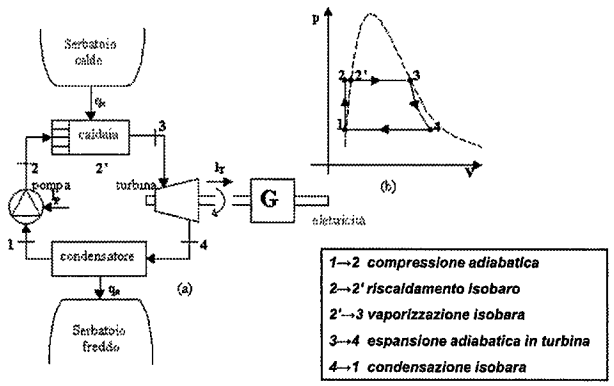


I regione del liquido
II regione del vapore saturo
III regione del vapore surriscaldato
IV regione del gas

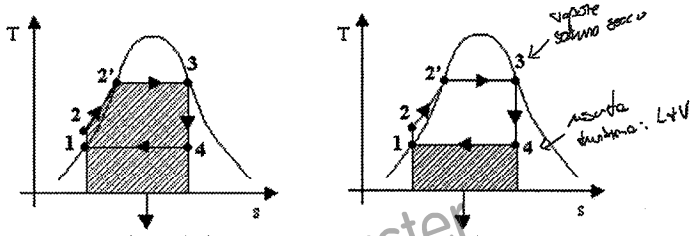
L'andamento del liquido bifase segue il diagramma di Mollier. Ricorda che **x** è il titolo di vapore (massa vapore/massa totale).



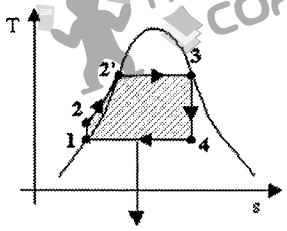
Il ciclo termodinamico su cui è basato il funzionamento della macchina a vapore è il **ciclo di Rankine.**



1→2 compressione adiabatica
2→2' riscaldamento isobaro
2'→3 vaporizzazione isobara
3→4 espansione adiabatica in turbina
4→1 condensazione isobara



q_c calore della caldaia q_s calore ceduto al serbatoio freddo



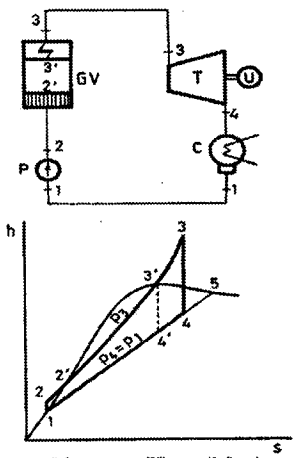
calore netto trasformato in lavoro

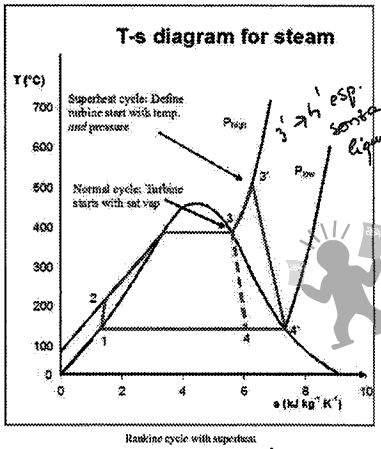
Il ciclo di Rankine prevede l'azione della pompa per elevare la pressione, quindi in riscaldamento isobaro fino ad ottenere vapore saturo secco quindi espanso in una macchina motrice e fatto poi condensare isotermobaricamente.
Utilizzato agli inizi del '800 in applicazioni a bassa temperatura (circa 300°) oppure quando l'espansore era una macchina volumetrica alternativa (vecchie locomotive).

Avvento delle turbine. ——> Ciclo Rankine inutilizzabile perché a fine espansione in turbina il vapore si ritrovava con un titolo troppo basso quindi elevata presenza di liquido che impattavano sulle palettature degli stadi di bassa pressione della turbina, danneggiandola per usura in brevissimo tempo.

Per elevare il titolo del vapore in uscita dalla turbina si ricorre al **ciclo HIRN.**

Il surriscaldamento (isobaro) nel ciclo HIRN accresce il rendimento per l'aumento della temperatura media di adduzione ed aumenta il titolo di vapore allo scarico della turbina con vantaggio per il rendimento reale.





Schema semplificato di funzionamento di un impianto motore a vapore rappresentazione del ciclo termodinamico di Hirn nei piani *Ts, hs, pv*
(Se $T_1 = 30$ °C, $p_1 \approx 0{,}05$ bar)
GV. Generatore di vapore; T. Turbina; U. Utilizzatore; C. Condensatore; P. Pompa.

N.B. Aumenta il rendimento perché aumenta la temperatura media di adduzione ma aumenta anche il calore fornito al ciclo.

$$\eta = 1 - \frac{T_{ms}}{T_{ma}}$$

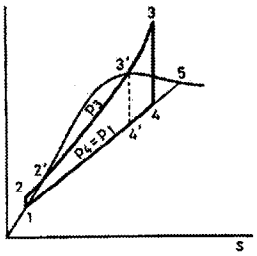
diagramma h–s

$Q_s = (h_4 - h_1)$ [kJ/kg] sottratto

$L_t = (h_3 - h_4)$ [kJ/kg] lavoro utile (esp. turbina)

$L_p = (h_2 - h_1)$ [kJ/kg] lavoro perso

$Q_f = (h_3 - h_2)$ [kJ/kg] fornito dal comb.



Rendimento limite del ciclo Hirn.

$$\eta_l = \frac{L_t - L_p}{Q_f} = \frac{Q_f - Q_s}{Q_f}$$

$$\eta_l = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Trascurando il lavoro della pompa dato il piccolo volume specifico dell'acqua si ottiene:

$h_2 \equiv h_1$ e pertanto risulta:

$$\eta_l = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1}$$

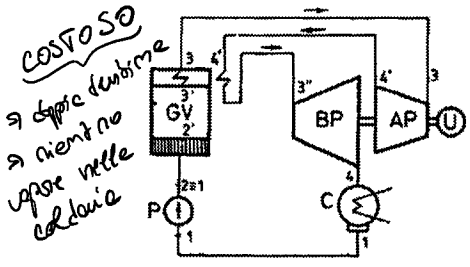
Metodi per aumentare il rendimento del ciclo HIRN.

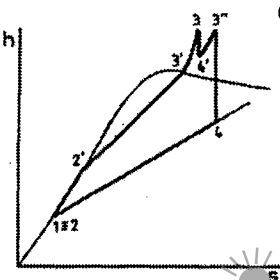
Il rendimento, come visto per il ciclo di Carnot, si aumenta distanziando tra loro le isoterme di adduzione e sottrazione del calore:

- **Abbassamento dell'isoterma inferiore**(temperatura alla quale si trova il condensatore) dipende dalla temperatura alla quale si trova il fluido di raffreddamento e dal tipo di condensatore (se permette di lavorare a p < p(atm)).
- **Aumento della temperatura superiore del ciclo** si ottiene con l'aumento della pressione di esercizio del liquido e di conseguenza la temperatura di vaporizzazione. N.B. Aumentando la pressione si riduce eccessivamente il titolo di vapore allo scarico e temperature di surriscaldamento troppo elevate generano stress termico del surriscaldatore.

A questo problema si può ovviare con impianti a vapore con **ciclo a surriscaldamento ripetuto** che aumenta la temperatura media di adduzione del calore (+rend) ma diminuisce anche la temperatura massima del ciclo.

costoso
↑ doppia condotta
↑ rischio vapore nelle caldaie





due espansioni:
3 → 4'
3" → 4

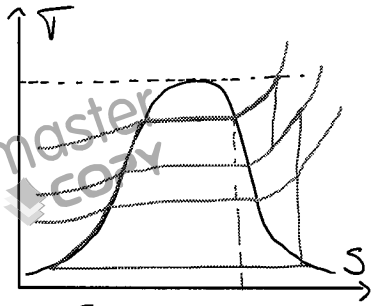


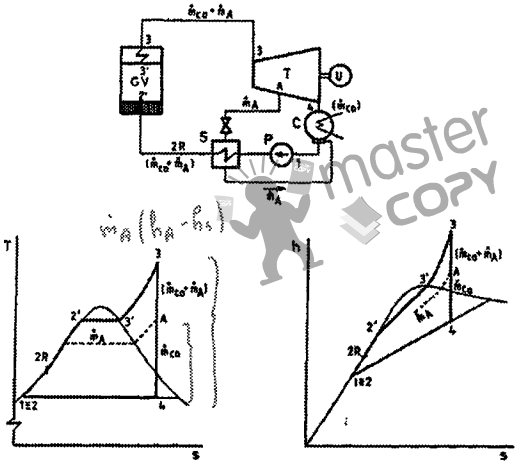
Fig. VI.2 — Schema semplificato di funzionamento di un impianto motore a vapore con surriscaldamento ripetuto e rappresentazione del ciclo termodinamico nel piano *hs*.
GV. Generatore di vapore; AP. Turbina di alta pressione; BP. Turbina di bassa pressione; U. Utilizzatore; C. Condensatore; P. Pompa.

Rendimento limite del ciclo Hirn con due surriscaldamenti:

$$\eta_l = \frac{(h_3 - h_4) + (h_{3''} - h_4)}{(h_3 - h_1) + (h_{3''} - h_{4'})} = \frac{(h_3 - h_4) + (h_{3''} - h_{4'})}{(h_3 - h_1) + (h_{3''} - h_{4'})} > \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1}$$

[× ↑ η devo ↑ T_{ma} e ↓ T_{ms}]
ma $T_{ms} = T_{oms}$
quindi gioco su T_{ma}

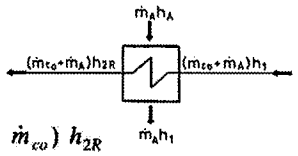
Per aumentare la temperatura media di adduzione del calore si può anche adottare la **Rigenerazione a spillamenti** cioè il preriscaldamento dell'acqua mediante il vapore spillato a pressione intermedia (solo parzialmente espanso) dalla turbina.



Sost. sacrifico una parte di vapore in espansione in turbina. Durante l'espansione una parte (**mA**) della massa complessiva di vapore (**mA + mCO**) che entra in turbina, viene prevelata dal corpo della turbina stessa ed inviata in uno scambiatore **S** (rigeneratore). Qui la portata **mA** (acqua) prima si raffredda e poi si condensa cedendo il calore **mA(hA - hl)** alla portata di liquido (**mA + mCO**) proveniente dal condensatore **C** che viene così preriscaldata incrementando la sua entalpia da **hl** a **h2R**. La portata **mA** passa al condensatore nel quale si mescola con la portata **mCO**(vapore condensabile) che ha completato l'espansione in turbina e quindi la portata (**mA + mCO**) entra, come fluido freddo, nel rigeneratore **S**.

Bilancio termico del rigeneratore

(potenza termica entrante = potenza termica uscente):



$$\dot{m}_A\, h_A + (\dot{m}_A + \dot{m}_{co})\, h_1 = \dot{m}_A\, h_1 + (\dot{m}_A + \dot{m}_{co})\, h_{2R}$$

da cui: $\dot{m}_A\,(h_A - h_{2R}) = \dot{m}_{co}\,(h_{2R} - h_1)$

portata da spillare per portare l'entalpia dell'acqua a h_{2R}: $\dot{m}_A = \dfrac{\dot{m}_{co}\,(h_{2R} - h_1)}{(h_A - h_{2R})}$

Rendimento limite nel caso di un solo spillamento: $\eta_{l,R} = \dfrac{\dot{m}_A\,(h_3 - h_A) + \dot{m}_{co}\,(h_3 - h_4)}{(\dot{m}_A + \dot{m}_{co})\,(h_3 - h_{2R})}$

Sommando al denominatore $\dot{m}_{co}\,(h_{2R} - h_1)$ e sottraendo l'uguale quantità $\dot{m}_A\,(h_A - h_{2R})$

$$\eta_{l,R} = \frac{\dot{m}_{co}\,(h_3 - h_4) + \dot{m}_A\,(h_3 - h_A)}{\dot{m}_{co}\,(h_3 - h_1) + \dot{m}_A\,(h_3 - h_A)} > \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1}$$

N.B. Se da un lato la rigenerazione aumenta il rendimento del ciclo, dall'altro riduce il lavoro utile perché parte del vapore non completa l'espansione in turbina e aumenta la temperatura dei fumi all'uscita della caldaia perché ad essi viene sottratto il compito di preriscaldare l'acqua.

Per evitare la conseguente perdita di rendimento del generatore occorre usare l'**entalpia dei fumi** per preriscaldare l'aria comburente attraverso scambiatori di calore.

QUINDI: Si danno sempre due o più spillamenti. (Grandi centrali termoelettriche)

Potenza di un impianto a vapore:

$$P = \dot{m}_v \cdot \Delta h \cdot \eta \ [\mathrm{kW}]$$

dove m_v è la portata di vapore, Δh il salto entalpico e η il rendimento della turbina.

MACCHINE MOTRICI A VAPORE.

Motrice alternativa: il ciclo termodinamico di riferimento è il Rankine. Solitamente sono a doppio effetto e spesso vengono adottate soluzioni a espansioni multiple. Il ciclo comprende tre fasi:

- Ammissione del vapore AB
- Espansione BC
- Scarico CD

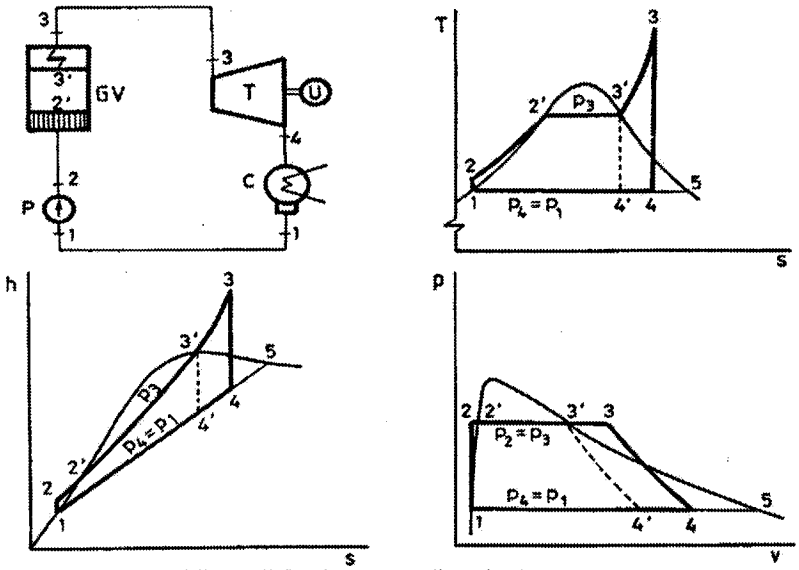
master COPY

TURBINA A VAPORE.

Macchina dinamica motrice costituita da diversi stadi: **AZIONE** e **REAZIONE**.

La potenza P erogata è esprimibile (trasformazione isoentropica) come:

P= mV(h3 - h4) [kW] dove mV è la portata di vapore trattato dalla turbina (kg/s).



Schema semplificato di funzionamento di un impianto motore a vapore rappresentazione del ciclo termodinamico di Hirn nei piani *Ts, hs, pv*.
(Se $T_1 = 30$ °C, $p_1 \approx 0{,}05$ bar)
GV. Generatore di vapore; T. Turbina; U. Utilizzatore; C. Condensatore; P. Pompa.

Campi di applicazione delle TV.

- Impianti termoelettrici
- Impianti termonucleari
- Impianti di generazione per stabilimenti industriali
- Impianti di cogenerazione
- Azionamenti di pompe e compressori
- Propulsione marina

master COPY

La turbina a vapore costituita da numerosi stadi, sino a trenta, disposti in serie. In questo modo il vapore espande attraversando diversi stadi di successione e questo accorgimento serve a migliorare l'efficienza complessiva della turbina. La massima efficienza si ha quando l'espansione del vapore rappresenta un processo ideale (rev.) in cui la pressione del vapore diminuisce, diventando lavoro