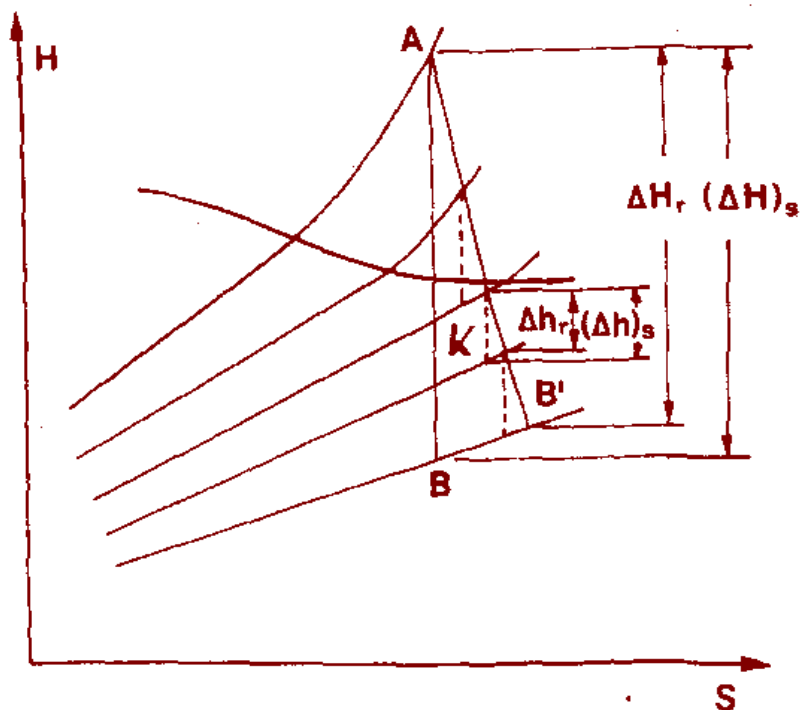


## FATTORE DI RECUPERO

Se analizziamo il rendimento complessivo di una turbina vediamo che tale rendimento risulta



maggiore del rendimento medio di stadio, intendendo come rendimento medio di stadio, il rendimento medio pesato sul salto entalpico. Questo merita delle considerazioni. Immaginiamo di considerare il piano H-S l'espansione del fluido in questione. In questa sede facciamo riferimento soprattutto agli impianti a vapore e per questo nella figura abbiamo rappresentato la parte destra del ciclo a vapore, ma il discorso vale per qualsiasi aeriforme.

Chiaramente per le turbine a vapore il discorso ha interesse notevole date le esigenze di rendimenti molto alti per le taglie grandi, per il fatto anche del numero molto elevato di stadi che vanno dai 20-30 per le macchine a vapore (5-6 stadi per le turbine a gas). Il discorso del recupero del rendimento ad opera di stadi posti a valle è molto più interessante per la macchina a vapore. Consideriamo l'espansione di una grande turbina e facciamo riferimento all'espansione del vapore. Indichiamo con AB l'espansione isoentropica e con AB' l'espansione reale,  $(\Delta H)_s$  il salto entalpico limite, isoentropico dell'intera turbina,  $(\Delta H)_r$  il salto entalpico reale. Il rendimento adiabatico di una turbina che indichiamo con  $\eta_T$  inteso come rendimento di trasformazione è pari al rapporto tra il salto entalpico reale e il salto entalpico isoentropico

$$h_r = \frac{L_r}{L_s} = \frac{(\Delta H)_r}{(\Delta H)_s}$$

Se volessimo che tale rapporto esprimesse esattamente i rapporti dei lavori specifici reali e isoentropici, per il teorema dell'energia si dovrebbe tenere conto delle perdite dell'energia cinetica del fluido tra l'ingresso della turbina e lo scarico della stessa. Ma nell'ambito dell'intera macchina tale contributo è talmente modesto che non avrebbe senso introdurlo (possiamo approssimare i lavori specifici reali e limiti nelle rispettive realtà). Ci chiediamo in quale misura il rendimento adiabatico della turbina nel suo complesso dipende dal numero degli stadi (che è molto elevato nel caso di grandi taglie), ovvero dal rendimento dei singoli stadi che lo compongono? Cerchiamo cioè la legge  $\eta_T = \eta_T(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_z)$ . Se rappresentiamo nel piano H-S le isobare relative in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita di uno stadio, noi possiamo considerare uno stadio generico per esempio quello k-esimo.

per il quale, indicando con  $\Delta h_k$  il salto entalpico e con  $\Delta H$  il salto entalpico dell'intera turbina

$$(\mathbf{h}_T)_r = \frac{(\Delta h_k)_r}{(\Delta h_k)_s}$$

In realtà questo calcolo non è precisissimo dato che nell'ambito dello stadio singolo otterremo una precisione migliore se tenessimo conto anche dei contributi cinetici, tuttavia il risultato che si ottiene dall'analisi che facciamo non stravolge la realtà. Volendo tenere conto dei termini cinetici è possibile ma a scapito di una complicazione formale. Oltre tutto il fattore di recupero lo si può analizzare anche nell'ambito di uno stadio singolo, studiandolo tra statore e rotore e cioè analizzando il rendimento di uno stadio singolo in funzione dei rendimenti separati, statorico e rotorico. Vogliamo vedere con quale legge il rendimento di una turbina dipende dai rendimenti dei singoli stadi. Per fare questo basta scrivere che il salto entalpico reale (al numeratore) di tutta la turbina è ovviamente la somma dei salti entalpici reali dei vari stadi.

$$\mathbf{h}_T = \frac{(\Delta H)_r}{(\Delta H)_\lambda} \quad \mathbf{h}_{T,k} = \frac{(\Delta h_k)_r}{(\Delta h_k)_\lambda}$$

$$(\Delta H)_r = \sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_r = \sum_{k=1}^z \mathbf{h}_{T,k} (\Delta h_k)_\lambda$$

$$\mathbf{h}_T = \left( \frac{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_r}{(\Delta H)_l} \right) \text{ Moltiplicando e dividendo per } \sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda \text{ si ottiene:}$$

$$\mathbf{h}_T = \frac{(\Delta H)_r}{(\Delta H)_\lambda} = \left( \frac{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_r}{(\Delta H)_\lambda} \right) = \left( \frac{\sum_{k=1}^z \mathbf{h}_{T,k} (\Delta h_k)_\lambda}{(\Delta H)_\lambda} \right) \left( \frac{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda}{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda} \right) = \bar{\mathbf{h}} \cdot \mathbf{f} \text{ ove:}$$

$$\bar{\mathbf{h}} = \frac{\sum_{k=1}^z \mathbf{h}_{T,k} (\Delta h_k)_\lambda}{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_l} \quad \mathbf{f} = \frac{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda}{(\Delta H)_\lambda}$$

$\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_s$  non è uguale al  $(\Delta H)_s$  e ciò lo vediamo geometricamente dalle figure in quanto

facendo riferimento a due isobare vicine tra loro nella misura in cui l'intersezione su tali isobare con le verticali si sposta a sinistra, le verticali di riferimento e quindi il salto entalpico isoentropico va a coincidere con quello che corrisponde, a parità di pressione, alle isoentropiche di riferimento della turbina AB (le isobare sono tutte curve congruenti tra loro e quindi il segmento intercettato tra due isobare qualsiasi è tanto più lungo spostandosi verso destra). Per questo motivo il fattore  $\mathbf{f}$  è maggiore dell'unità.

Tale fattore ha un significato fisico ben preciso in quando al posto del  $\Delta h_r$  dello stadio generico possiamo sostituire il prodotto del rendimento dello stadio per il salto entalpico isoentropico dello stadio stesso. In altri termini possiamo scrivere che il rendimento delle turbine  $\eta_T$  è pari al rendimento medio di stadio per il fattore  $f$ . Questo non è altro che il

$\overline{h_T} = \overline{h_{stadio}} \cdot f$  rendimento medio di stadio pesato sui salti entalpici isoentropici

$$\overline{h_{stadio}} = \frac{\sum_{k=1}^z h_{T,k} (\Delta h_k)_\lambda}{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda}$$

Il fattore  $f = \frac{\sum_{k=1}^z (\Delta h_k)_\lambda}{(\Delta H)_\lambda} > 1$  può assumere valori oscillanti tra 1.05 - 1.1 a seconda del

tipo di macchina e può salvare il rendimento complessivo di una grande turbina. In particolare i primi stadi, hanno bassi rendimenti come sempre accade quando a capo delle turbine c'è uno stadio a salti di velocità. In definitiva il fattore di recupero permette di recuperare una buona parte delle perdite di rendimento. Dal punto di vista delle giustificazione sul piano fisico, abbiamo più modi di interpretare queste possibilità di recupero. Una serie di stadi di turbina, cioè tanti stadi di turbina che lavorano in serie, non sono altro che meccanismi in serie per i quali il rendimento complessivo del meccanismo è pari al prodotto dei rendimenti dei singoli meccanismi. Per nostra fortuna non è così, in questa sede. Anche con pochi stadi di rendimento 0.9, se moltiplicassimo tale valore per una ventina di volte (quanti sono gli stadi di una turbina a vapore) otterremmo un rendimento del 18% ! La termodinamica ha un fattore intrinseco nel recupero del rendimento nell'espansione.

A) Tale fattore lo possiamo interpretare facendo riferimento al lavoro di recupero che abbiamo studiato con riferimento all'espansione, ove la maggiore dilatazione del fluido che è tanto dannosa nella compressione mentre invece è positiva nell'espansione, ci permette di recuperare una parte dell'irreversibilità. Il fattore di recupero ci permette di dare un'interpretazione chiara dell'espansione.

B) Altro modo di interpretare il recupero, istrionescamente legato al precedente, è il seguente. Consideriamo una singola espansione, di un singolo stadio, proprio per effetto dell'irreversibilità l'entalpia finale alla quale il fluido si trova allo scarico è maggiore dell'entalpia finale che il fluido avrebbe in un processo isoentropico.

NOTATE BENE non diciamo che le irreversibilità sono favorevoli !

Alla fine dell'espansione pur pagando le tasse di irreversibilità, le quali sono rappresentate anche numericamente dalla variazione positiva di entropia nel processo, per il fatto che l'adiabatica reale non è isoentropica, pur pagando l'irreversibilità dell'espansione ci troviamo con un valore entalpico maggiore di quello che competerebbe al processo isoentropico. In definitiva anche questa è una chiave per interpretare fisicamente il fattore di recupero. Naturalmente se ragionassimo in un processo di compressione anziché di espansione avremo a che fare con un fattore di controrecupero, fattore che contribuirebbe a diminuire il rendimento.