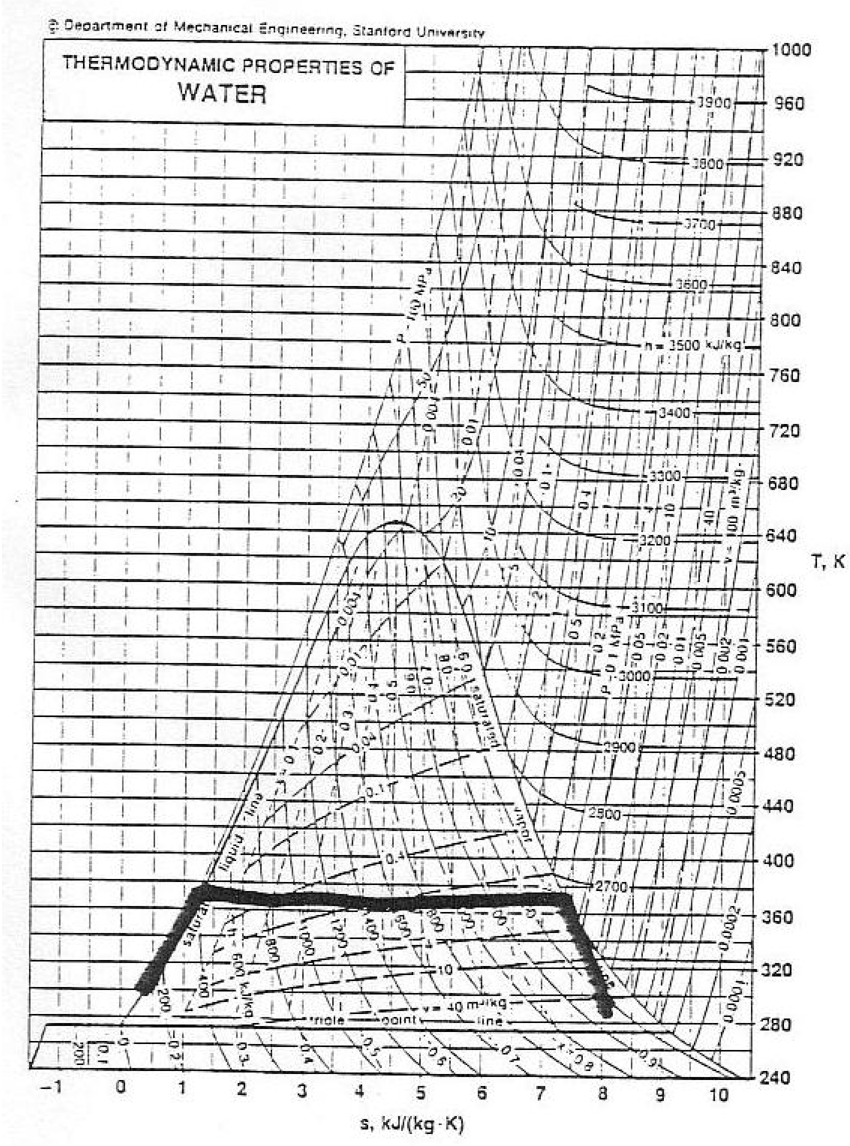
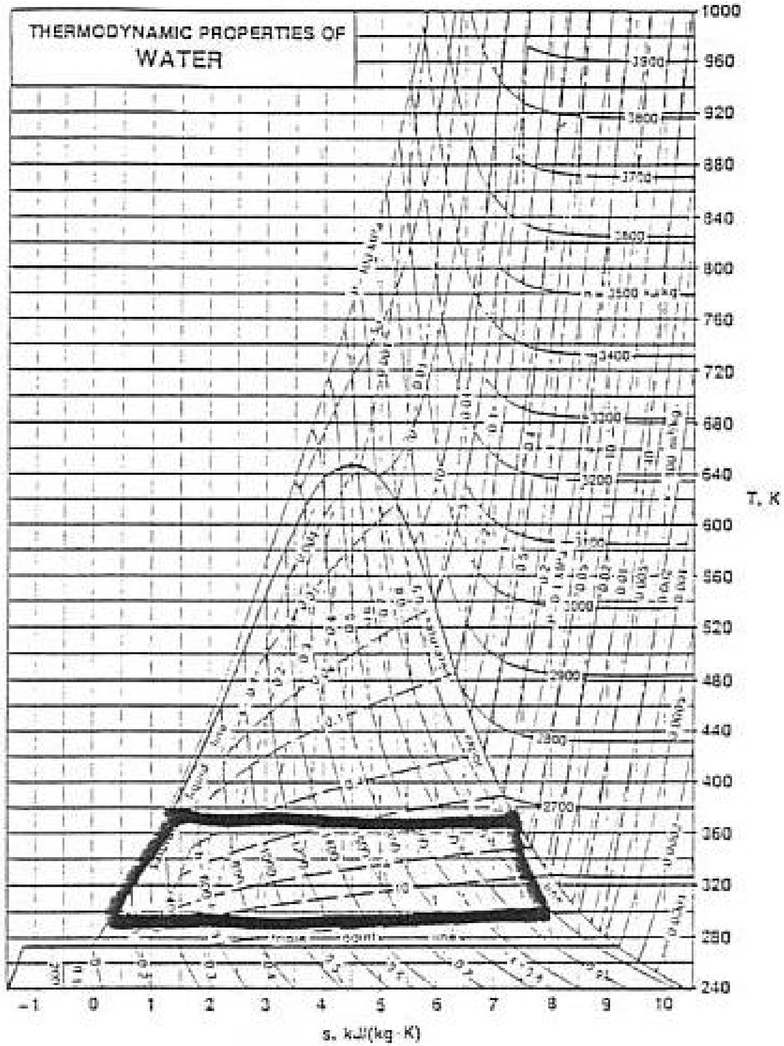
Impianti a vapore

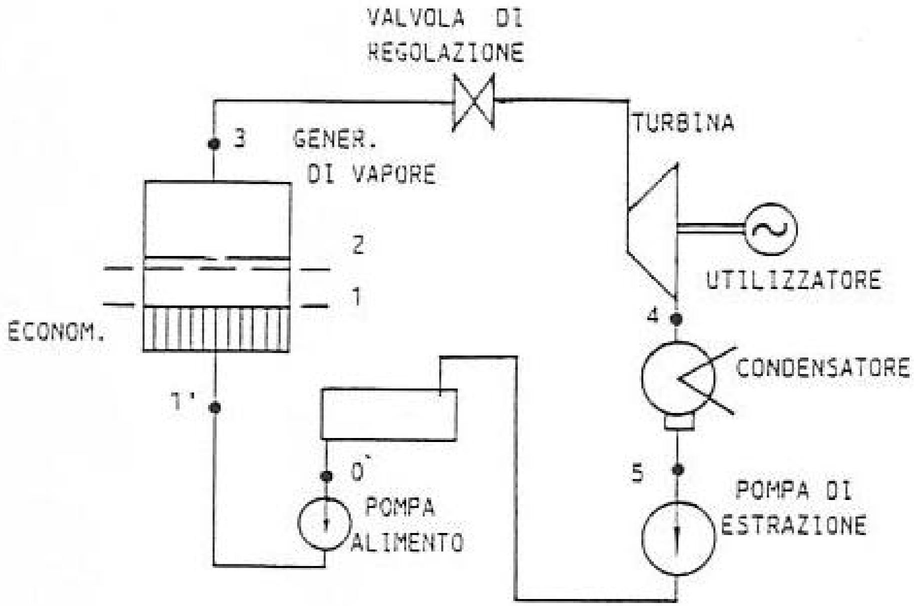
Impianti a vapore



1. Il consumo specifico di combustibile rispetto agli impianti moderni è elevatissimo per due ragioni termodinamiche che saranno più chiare nel seguito: basse pressione e temperatura di generazione del vapore, qualità del vapore generato (vapore allo stato saturo) e elevata pressione allo scarico del ciclo (pressione atmosferica). Nelle prime locomotive a vapore i suddetti parametri erano limitati dalla tecnologia dell’epoca: alte pressioni e temperature di generazione del vapore richiedono materiali in grado di reggere alle sollecitazioni termiche e meccaniche e anche sistemi di controllo e regolazione affidabili.
2. Il ciclo richiedeva un’aggiunta continua di acqua perché il vapore espanso veniva scaricato nell’atmosfera. Per le locomotive a vapore si provvedeva a ricaricare l’acqua durante le soste nelle stazioni ferroviarie. Per tale operazione la pressione nella caldaia doveva essere abbassata per permettere l’ingresso dell’acqua, richiedendo tempi molto lunghi, come avviene per la ricarica di un ferro da stiro con caldaia pressurizzata.
3. L’alimentazione del combustibile veniva fatta a mano o con sistemi molto rudimentali di convogliamento dal tender alla locomotiva. Ciò causava combustioni imperfette e comunque a basso rendimento.

Impianti a vapore



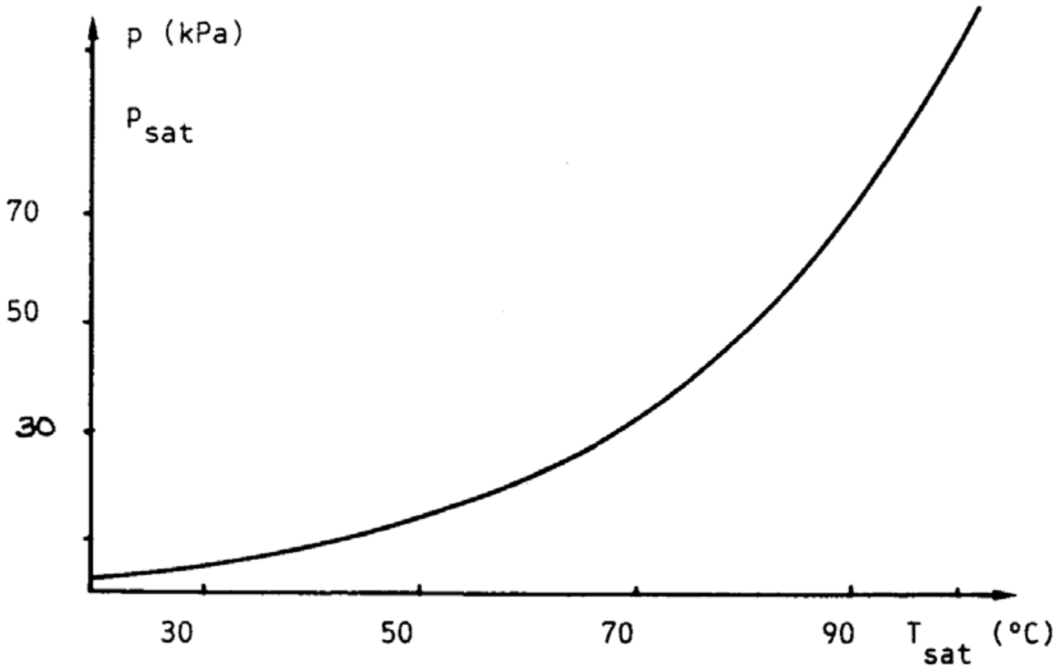


Impianti a vapore

- Miglioramenti al ciclo
  - Abbassamento della pressione al condensatore
  - Surriscaldamenti
  - Rigenerazione termica

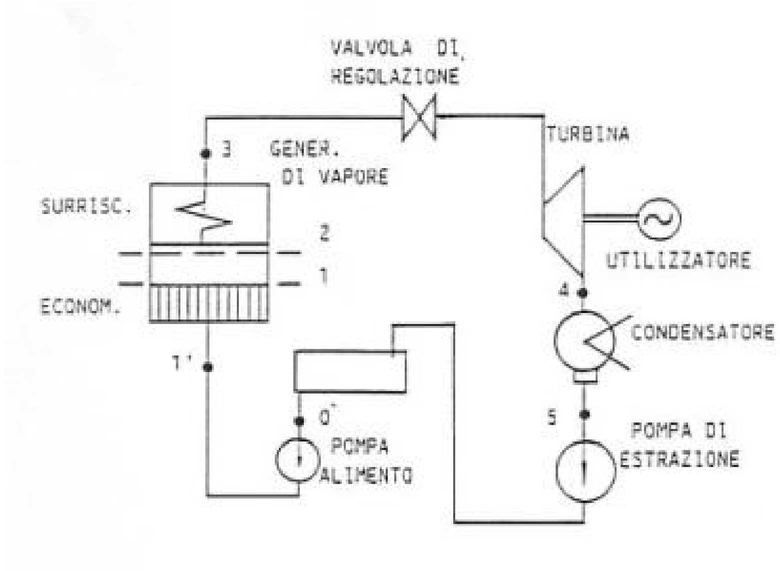
Impianti a vapore

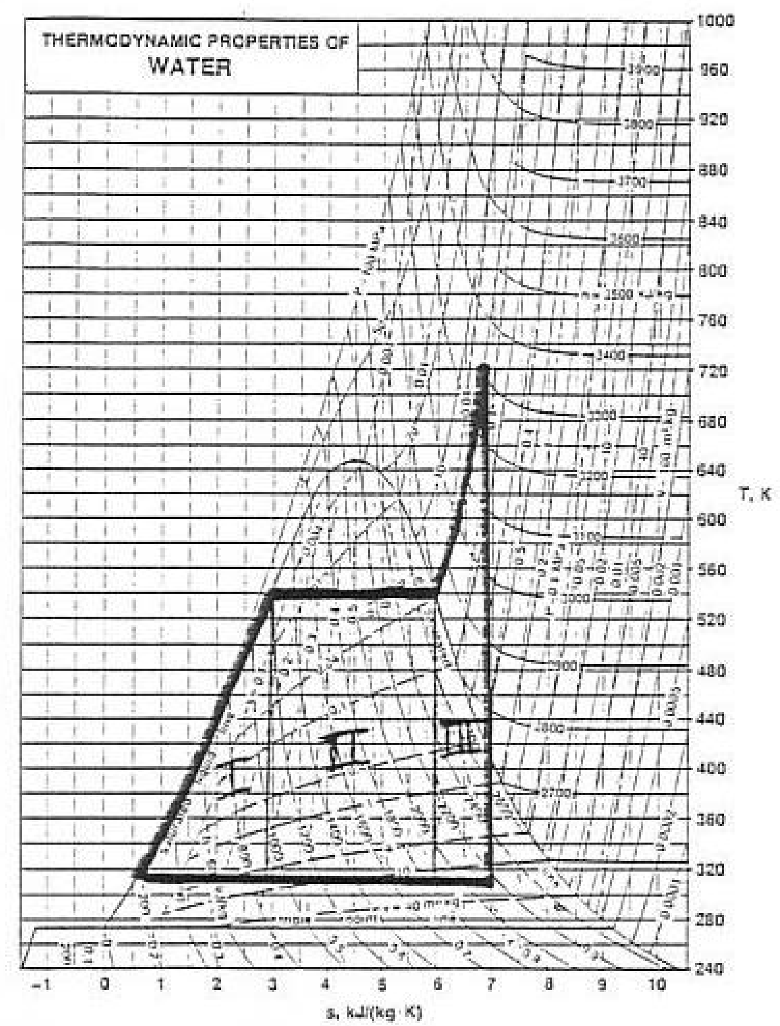
- Abbassamento temperatura al condensatore



Impianti a vapore

- Aumento della pressione e della temperatura in caldaia: surriscaldamento





Impianti a vapore

- Il surriscaldamento del vapore comporta un aumento del lavoro utile (area del ciclo) e del rendimento.

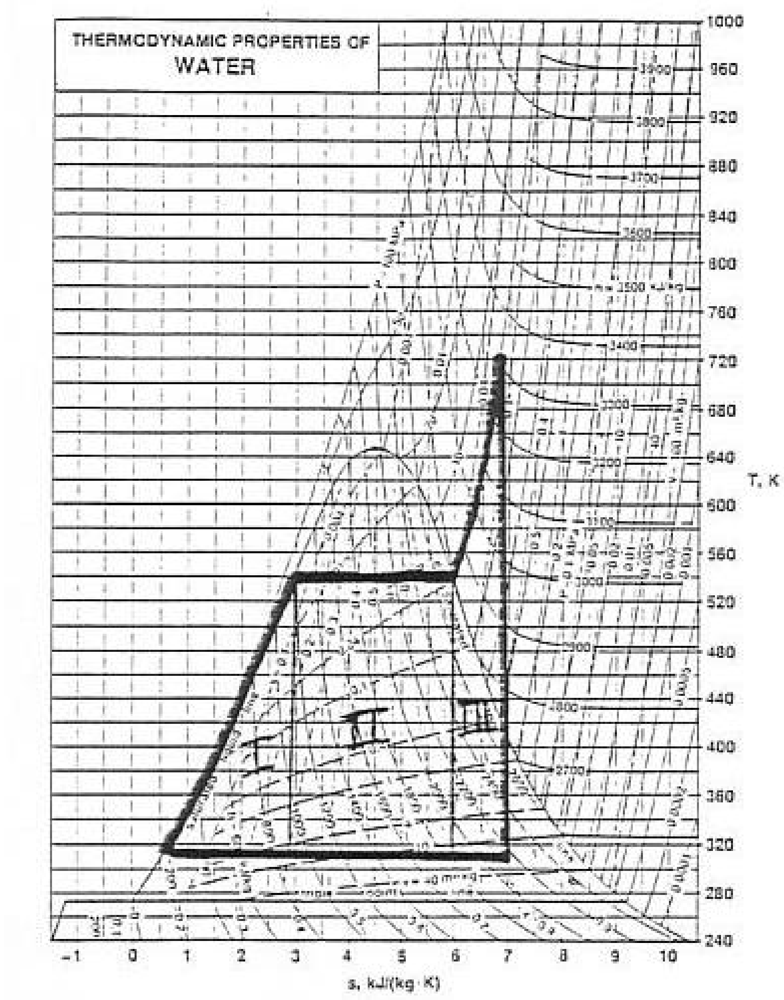
$$\eta = \frac{W_I + W_{II} + W_{III}}{Q_{1,I} + Q_{1,II} + Q_{1,III}}$$

$$W_i = \eta_i * Q_{1,i}$$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_{mi}}$$

$$T_{mi} = \int \frac{dQ_{1i}}{ds}$$

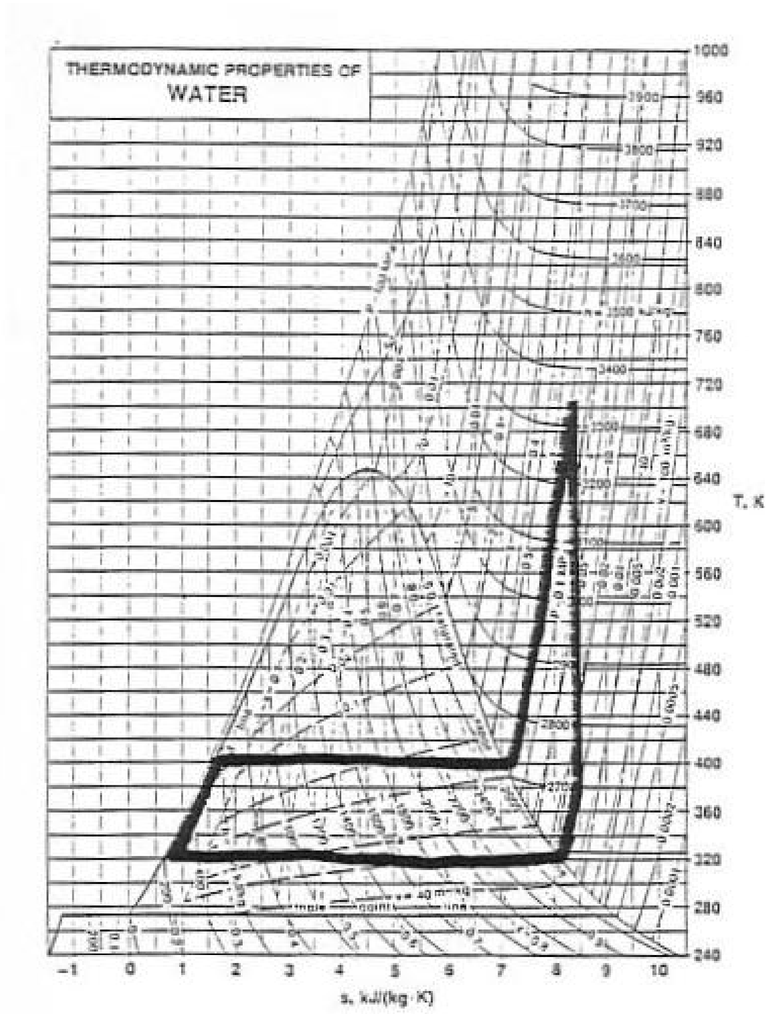
$$\eta = \frac{\sum \eta_i * Q_{1,i}}{\sum Q_{1,i}}$$



Impianti a vapore

- Se il ciclo surriscaldato ha una pressione in caldaia troppo bassa rispetto alla temperatura massima il vantaggio si perde parzialmente

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_{m2}}{T_{m1}}$$

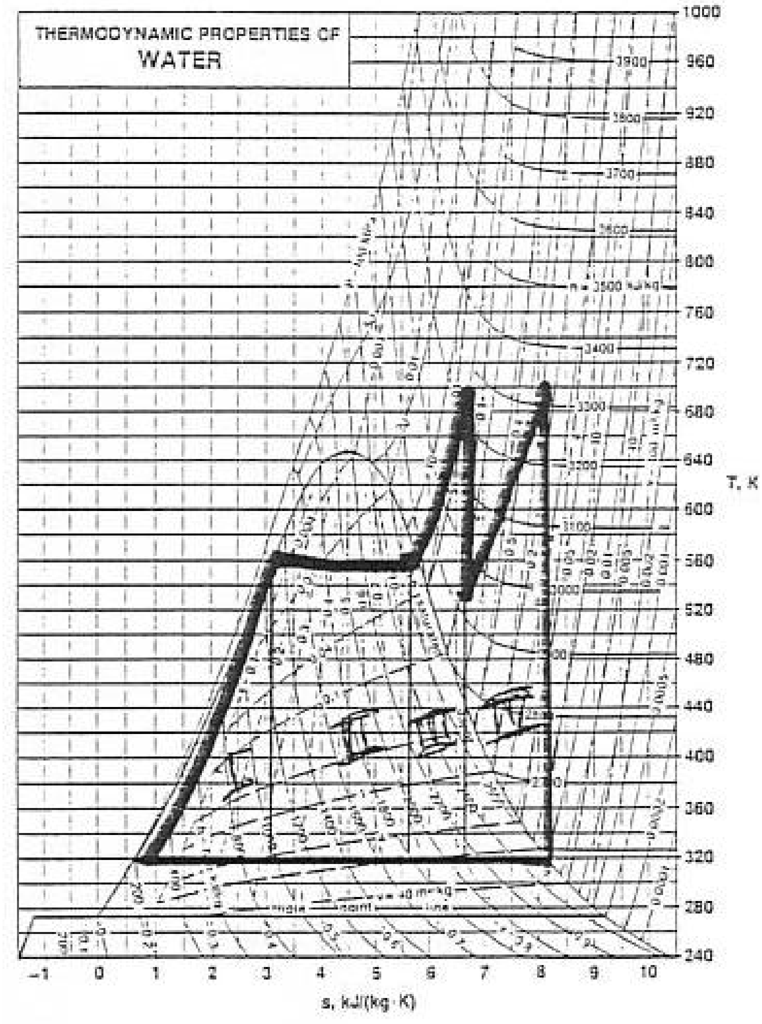


Impianti a vapore

- Si possono fare più surriscaldamenti

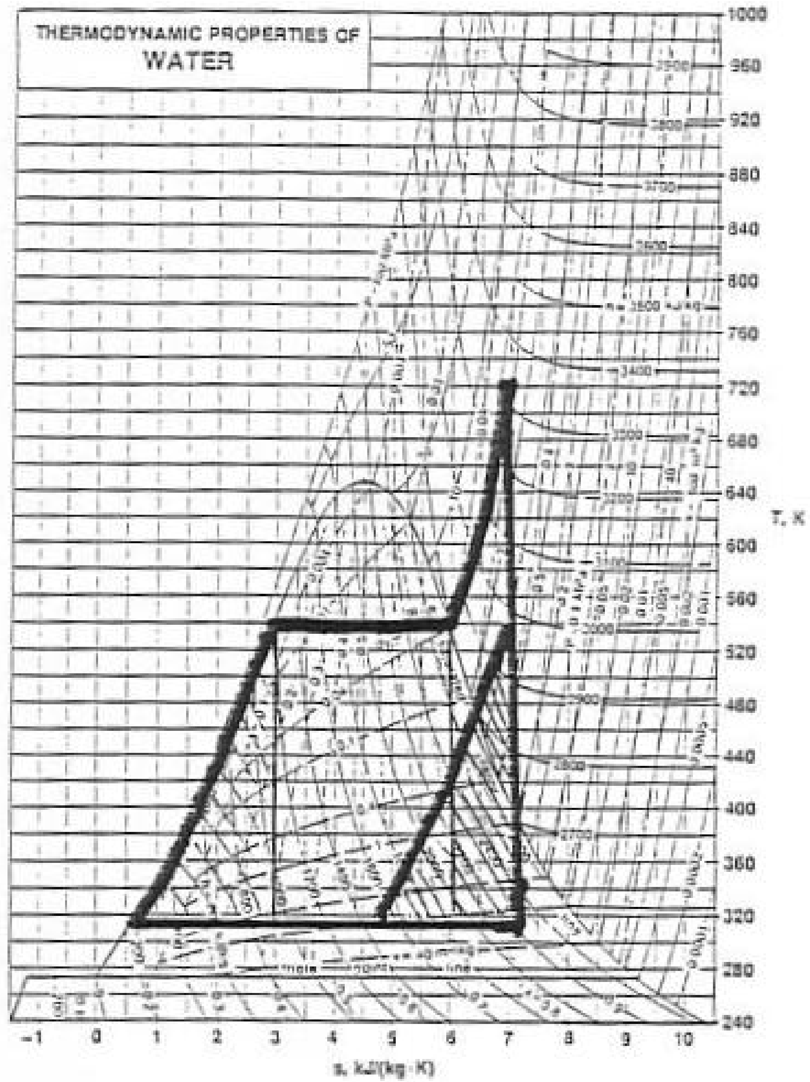
$$\eta = \frac{\eta_I * Q_{1,I} + \eta_{II} * Q_{1,II} + \eta_{III} * Q_{1,III} + \eta_{IV} * Q_{1,IV}}{\sum Q_{1,i}}$$

- Anche in questo caso l'ultima espansione non deve finire nella zona del vapore surriscaldato.

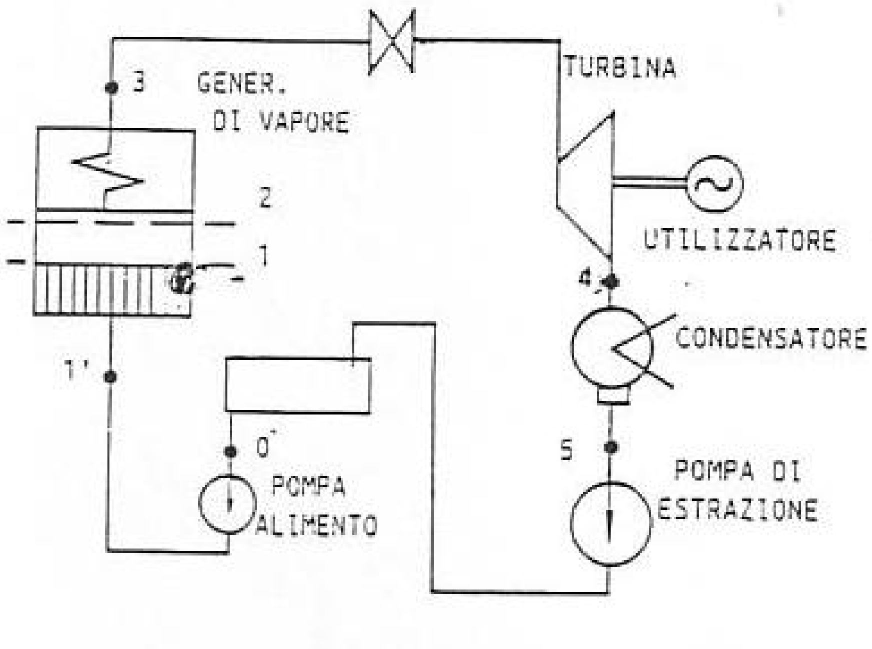


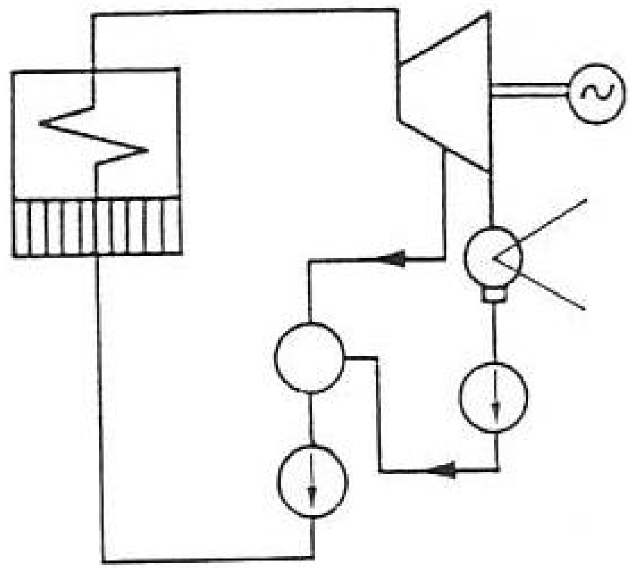
Impianti a vapore

- La rigenerazione termica consiste in un trasferimento di calore dalla espansione al preriscaldamento dell’acqua
- Tale trasferimento non può essere in realtà uno scambio di calore ma un trasferimento di massa dalla turbina a scambiatori di calore posti sulla linea di alimento dell’acqua in caldaia



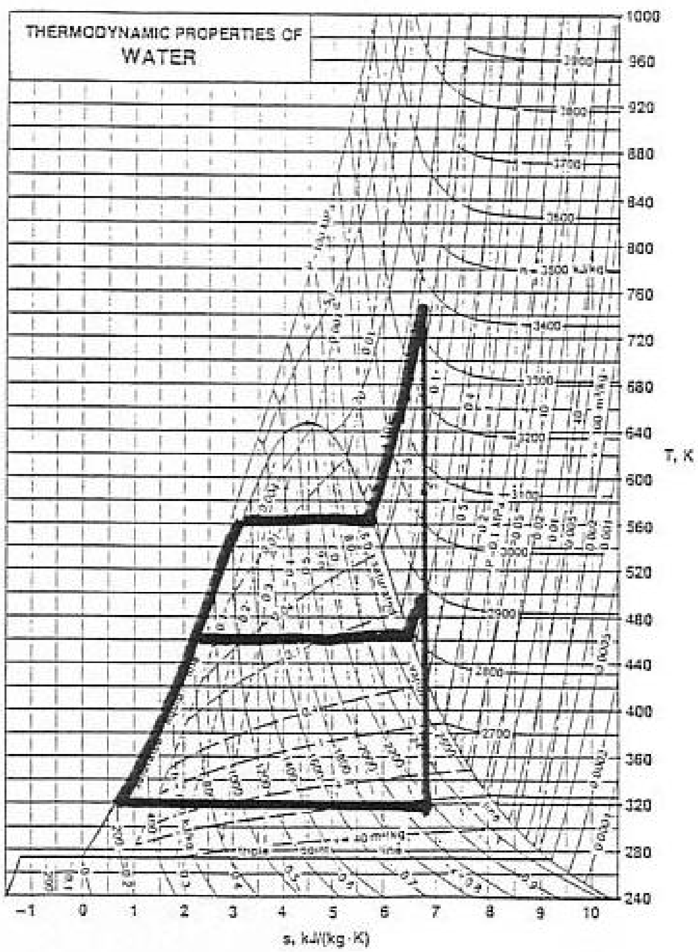
Impianti a vapore



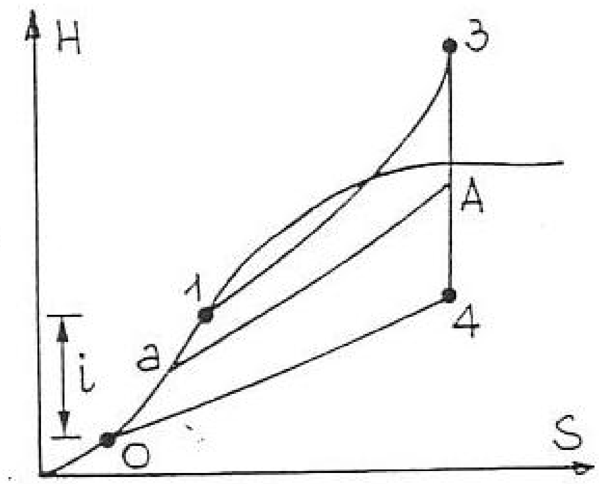


Impianti a vapore

- Si confrontano i due rendimenti:



$$\eta_{nr} = 1 - \frac{Q_2}{Q_{1nr}} \quad e \quad \eta_r = 1 - \frac{Q_2}{Q_{1r}}$$



Impianti a vapore

- Se definiamo il grado di rigenerazione come:

$$R = \frac{h_x - h_0}{h_1 - h_0} = \frac{h_x - h_0}{i}$$

- e supponiamo di riscaldare l'acqua fino al punto x, il calore fornito al ciclo rigenerato sarà:

$$Q_{1r} = (1 + m) \cdot (h_3 - h_1 + h_1 - h_x)$$

- Nel ciclo semplice abbiamo invece:

$$Q_{1nr} = (1) \cdot (h_3 - h_1 + h_1 - h_0)$$

Impianti a vapore

- Dal bilancio termico del miscelatore possiamo scrivere:

$$(1+m)\cdot h_x = 1\cdot h_0 + m\cdot h_A$$

- da cui si ottiene:

$$m = \frac{h_x - h_0}{h_A - h_x} = R\cdot\frac{h_1 - h_0}{h_A - h_x}$$

- Le proprietà termodinamiche dell'acqua sono tali che:

$$h_3 - h_1 \cong h_A - h_x \cong f_m$$

Impianti a vapore

- Possiamo quindi scrivere:

$$m = \frac{h_x - h_0}{h_A - h_x} = R \cdot \frac{h_1 - h_0}{h_A - h_x} = \frac{R \cdot i}{f_m} \qquad Q_{1nr} = (1) \cdot \left(f_m + i \right)$$

$$Q_{1r} = \left[1 + \frac{R \cdot i}{f_m} \right] \cdot \left[f_m + (1 - R) \cdot i \right] =$$

$$= \left[f_m + R \cdot i + \frac{R \cdot i^2}{f_m} - \frac{R^2 \cdot i^2}{f_m} + i - R \cdot i \right] = \left[f_m + i + \frac{R \cdot i^2}{f_m} \cdot (1 - R) \right]$$

- dato che *R* varia tra 0 e 1, si può notare che per *R*=0 e per *R*=1 si ha *Q1nr*=*Q1r*. Per tutti gli altri valori di R si ha invece

$$Q_{1r} > Q_{1nr} \Rightarrow \eta_{1r} > \eta_{1nr}$$

Impianti a vapore

- Possiamo quindi ricavare il grado di rigenerazione ottimale: infatti se il rendimento del ciclo rigenerato è identico a quello del ciclo non rigenerato ai limiti del campo di validità e in tutti i casi intermedi ha un valore maggiore di quello che raggiunge ai limiti, derivando *Q1r* rispetto a R e uguagliando a 0 otterremo un massimo per il calore fornito e quindi per il rendimento
$$\frac{\partial Q_{1r}}{\partial R} = \frac{i^2}{f_m} - \frac{2Ri^2}{f_m} = 0 \Rightarrow R = \frac{1}{2}$$
- Un ciclo con un solo spillamento ha un rendimento massimo per R=0.5

Impianti a vapore

- Se gli spillamenti sono in numero superiore ad 1, si può dimostrare che il grado di rigenerazione ottimale per avere il massimo incremento di rendimento è espresso da:

$$R_{ott} = \frac{n}{n+1}$$

- E' inoltre importante far notare che, come abbiamo dimostrato nel caso di un solo spillamento, un ciclo con grado di rigenerazione unitario e n spillamenti ha lo stesso rendimento al rendimento massimo di un ciclo con n-1 spillamenti.
- Tuttavia l'aumento di rendimento conseguente all'aumento di spillamenti, fissando in ogni caso il grado di rigenerazione ottimale, è sempre minore. Risulta quindi un valore ottimale del numero di spillamenti che è circa 8