

FMRGroup @ DMA-URLS

*Impianti motore a vapore (IMV)
Schemi di impianto, component e cicli termodinamici*

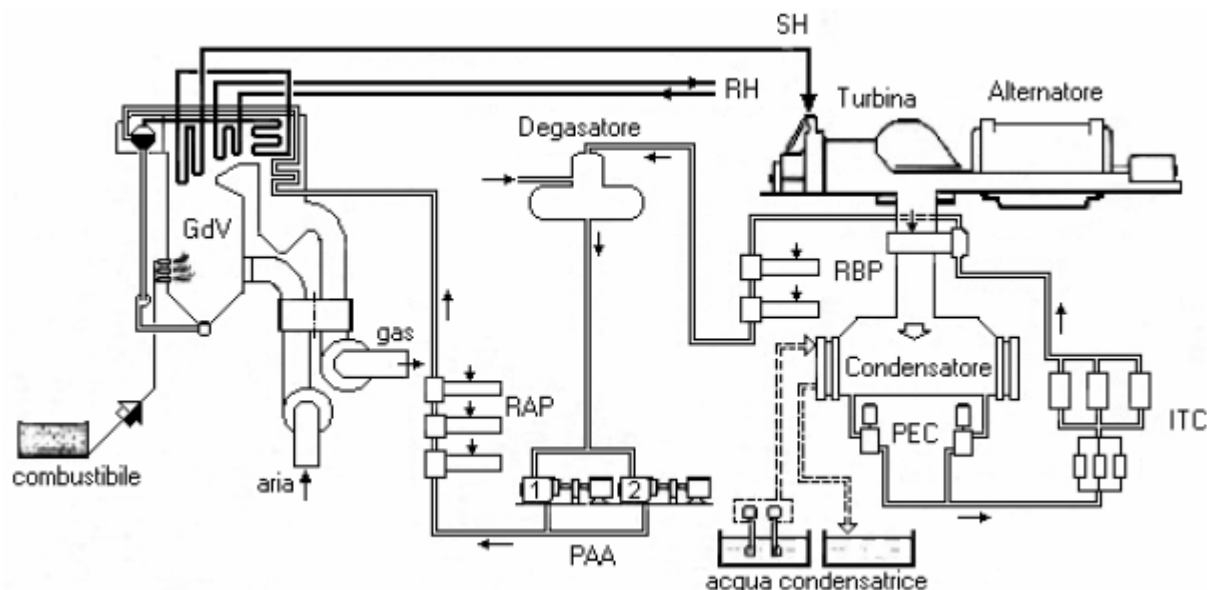
Alessandro Corsini

Università di Roma "La Sapienza"

e.mail: alessandro.corsini@uniroma1.it, corsini@dma.ing.uniroma1.it

Centrali termoelettriche a vapore

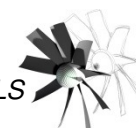
Circuito acqua-vapore



L'acqua viene estratta dal pozzo caldo del condensatore per mezzo delle pompe di estrazione del condensato e, dopo aver attraversato l'impianto di trattamento, incrementa la propria temperatura nei riscaldatori di bassa pressione. Perviene al degasatore e da qui, ripresa dalle pompe alimento, attraversa i riscaldatori di alta pressione ed entra nel generatore di vapore.

Il vapore surriscaldato, in uscita dal generatore di vapore, viene introdotto in turbina nel corpo di alta pressione da cui, dopo una prima espansione, torna in caldaia per essere risurriscaldato.

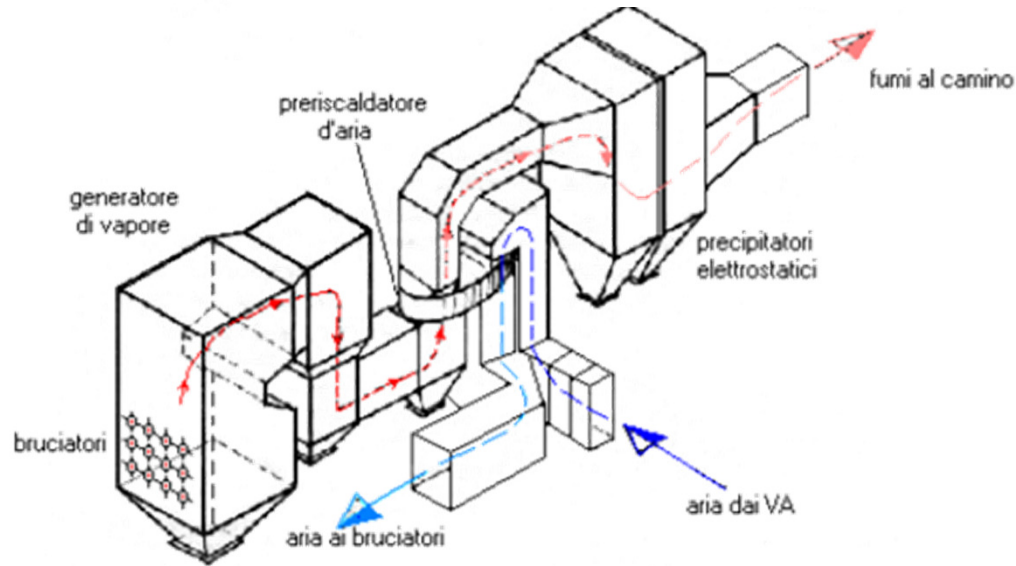
Il vapore risurriscaldato ritorna in turbina per espandersi nei restanti corpi di media e di bassa pressione; viene infine scaricato nel condensatore, dove condensa scambiando calore con l'acqua condensatrice e accumulandosi nel pozzo caldo.



Centrali termoelettriche a vapore

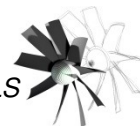
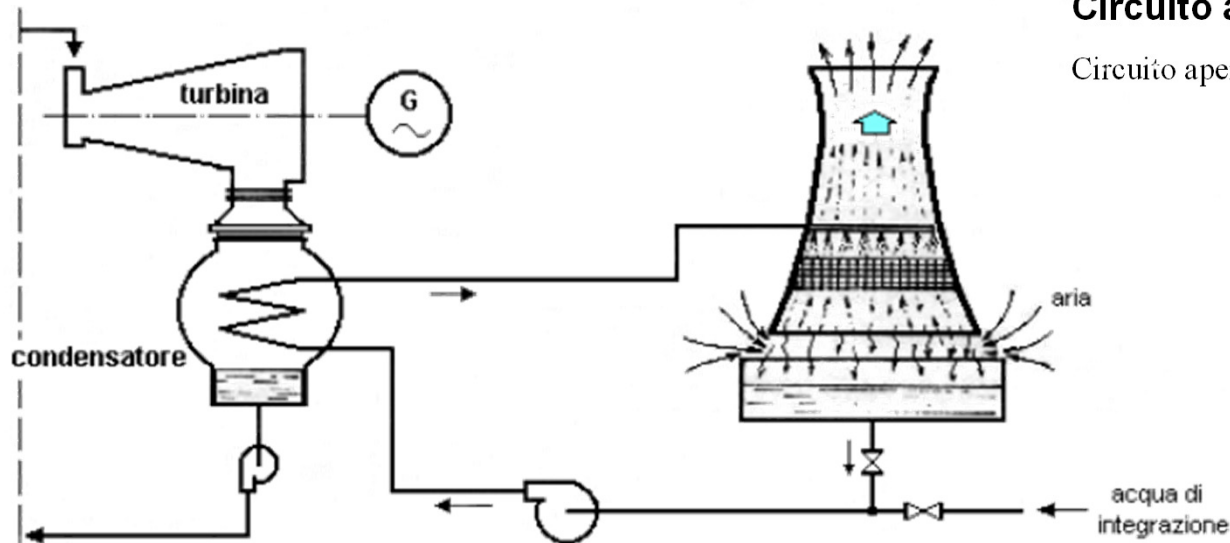
Circuito aria-gas

Esso comprende i ventilatori aria, i condotti e le casse aria dei bruciatori, la camera di combustione della caldaia, i condotti dei gas, i preriscaldatori d'aria, i precipitatori elettrostatici, la ciminiera.

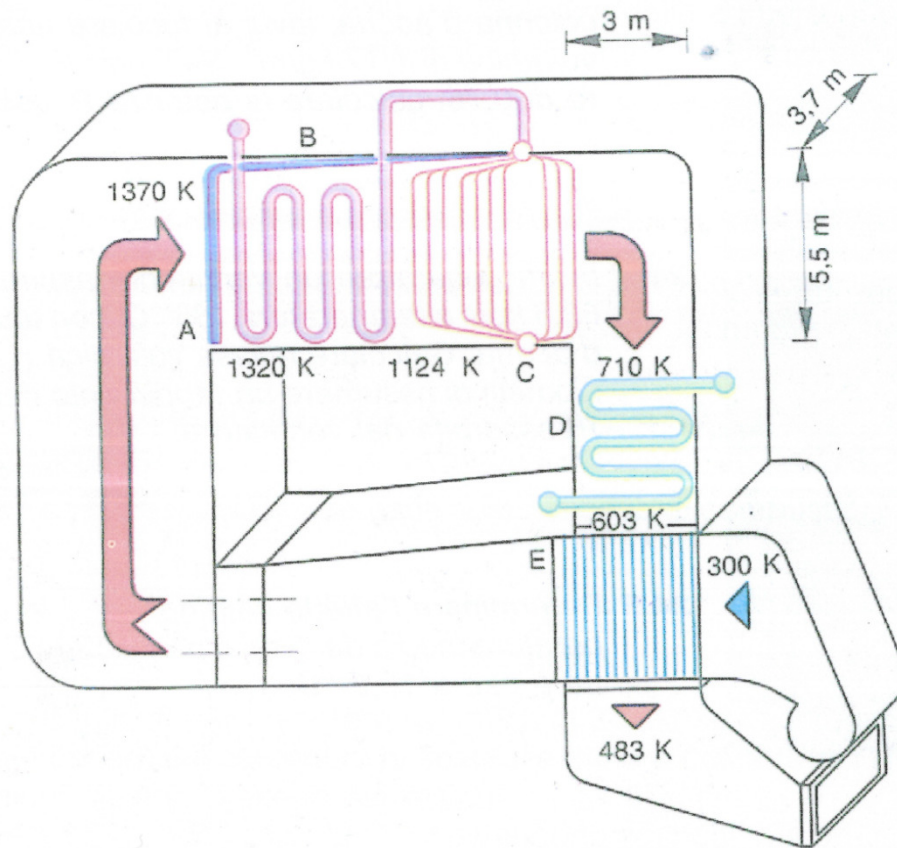


Circuito acqua di raffreddamento

Circuito aperto, circuito chiuso



Centrali termoelettriche a vapore, componenti, GV



*Centrali termoelettriche a
vapore, componenti GV*

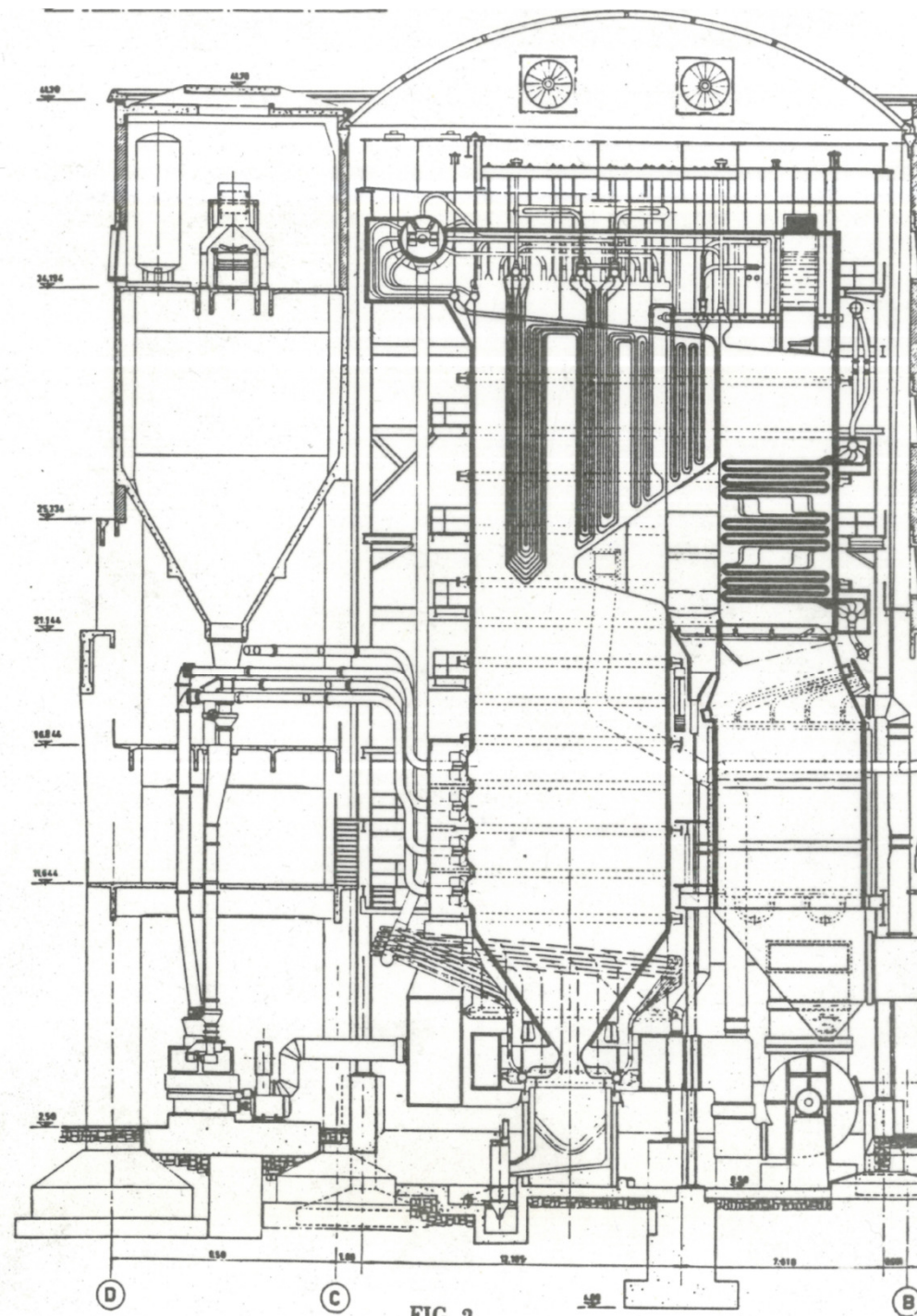


FIG. 2

Centrali termoelettriche a vapore, componenti GV

Una caldaia (fig. IV-1) è costituita dai seguenti elementi: la caldaia propriamente detta 7, 10, 9; il surriscaldatore di vapore 12; l'economizzatore ad acqua 14; il preriscaldatore d'aria 15; la camera di combustione 2; la muratura 16; l'incastellatura 5; armatura accessori, e tubi e canali di comunicazione.

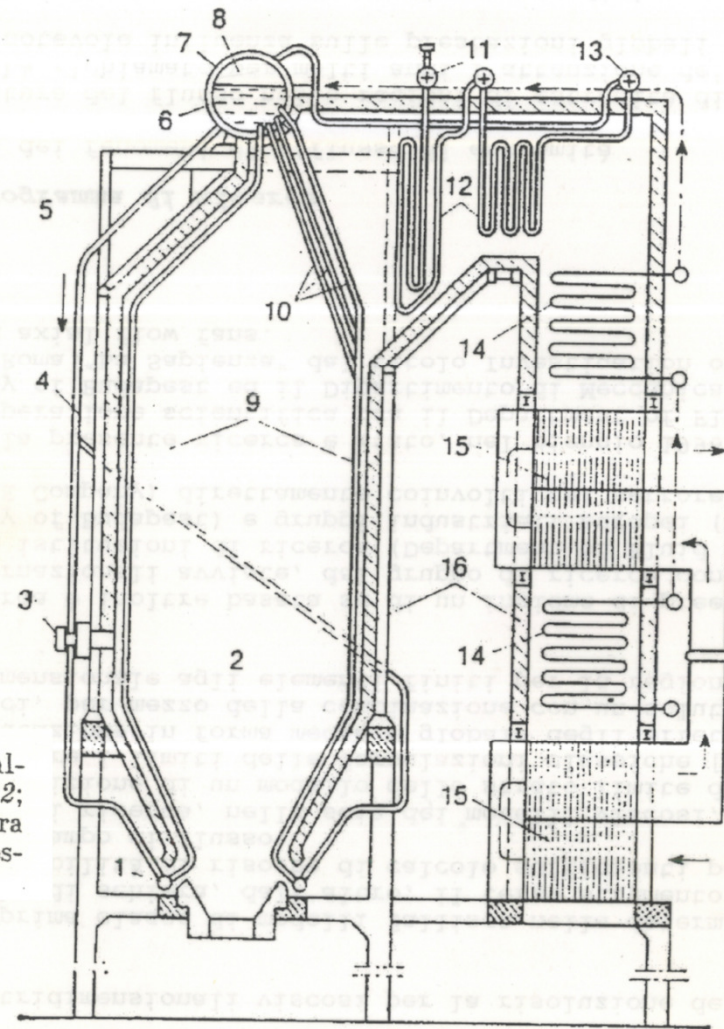
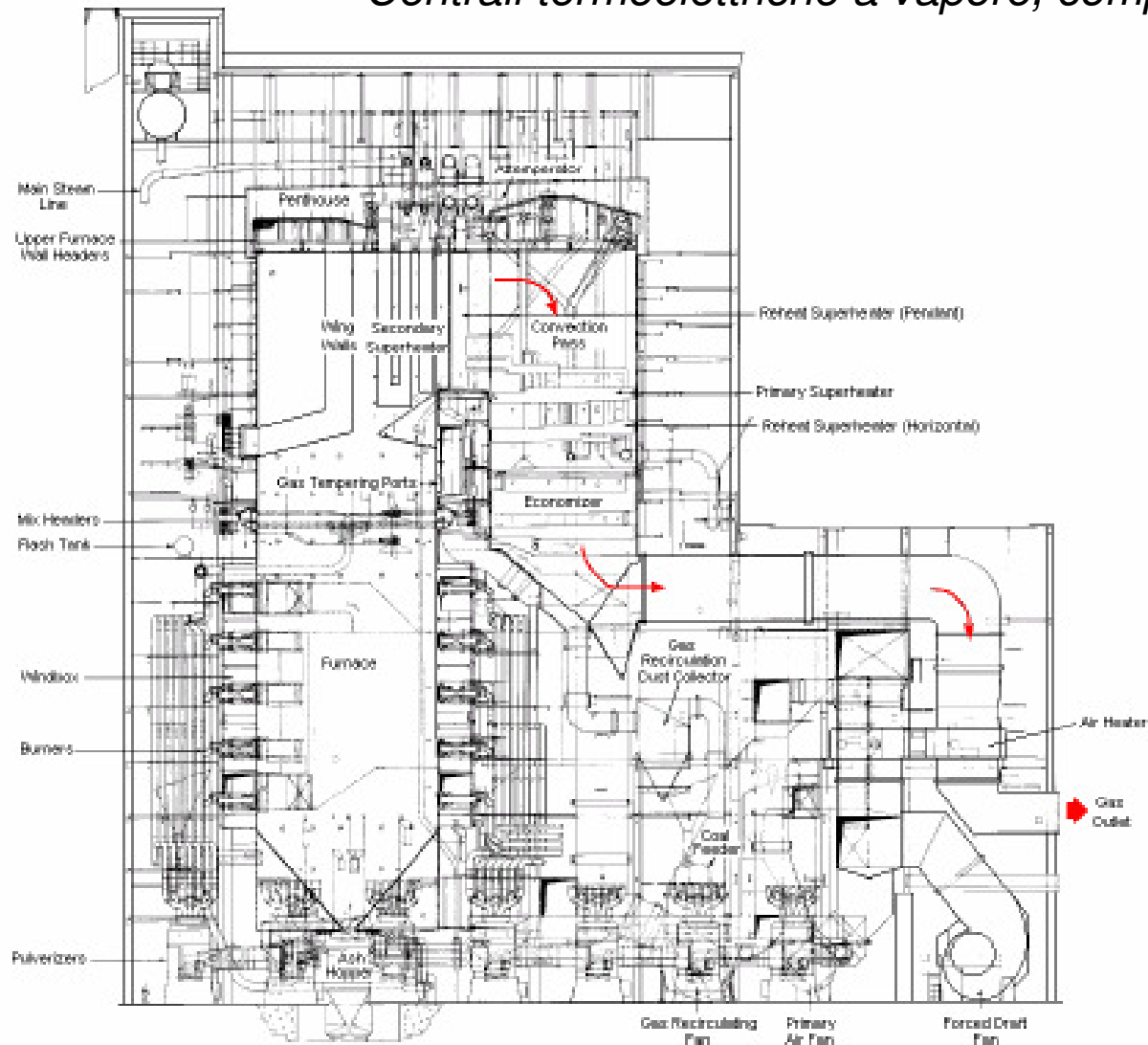
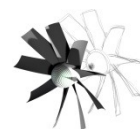


Fig. IV-1. Schema di una caldaia.

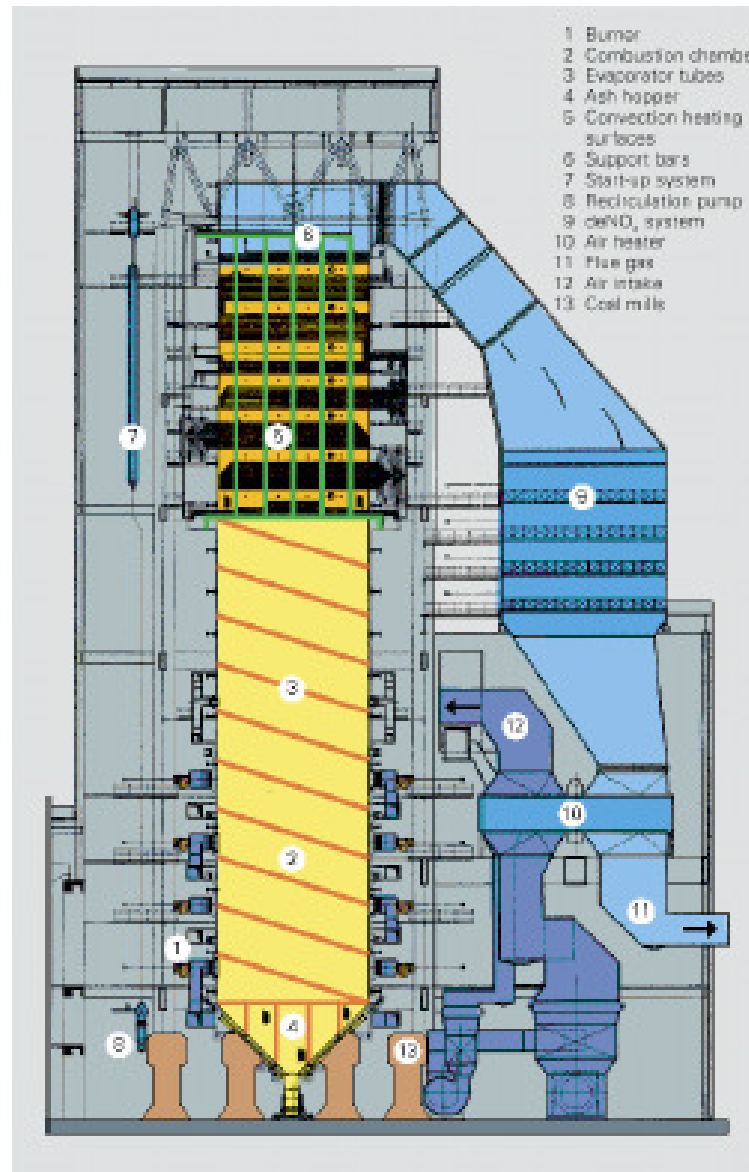
Centrali termoelettriche a vapore, componenti (i), GV



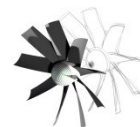
Generatore di vapore UP-143 (costr. B&W)
 Potenza elettrica 1500 MW
 Pressione vapore SH 26,5 MPa
 Temperatura vap. SH / RH 545°C / 538°C
 Combustibile carbone bituminoso



Centrali termoelettriche a vapore, componenti (i), GV



Generatore di vapore Benson
260 bar-343/362°C
330 MW elettrici
Centrale di Staudinger (Germania)



Centrali termoelettriche a vapore, componenti GV

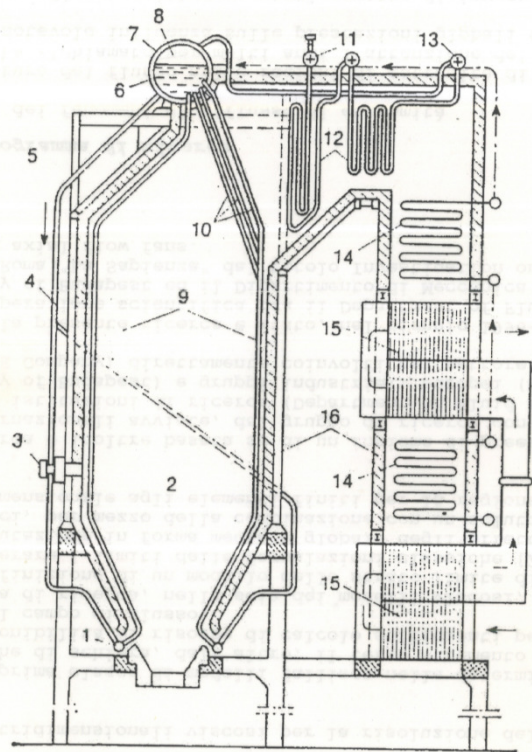


Fig. IV-1. Schema di una caldaia.

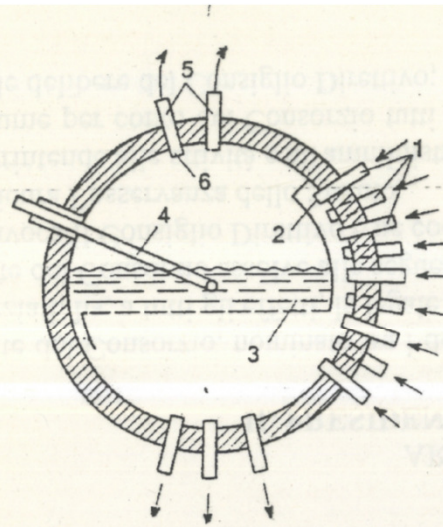


Fig. IV-36. Schema di un dispositivo separatore con sottoalimentazione dell'acqua.

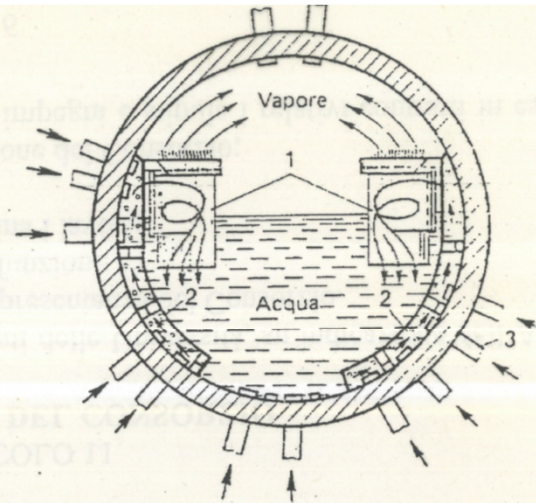


Fig. IV-37. Schema di un dispositivo separatore con cicloni all'interno del tamburo.

Centrali termoelettriche a vapore, componenti GV

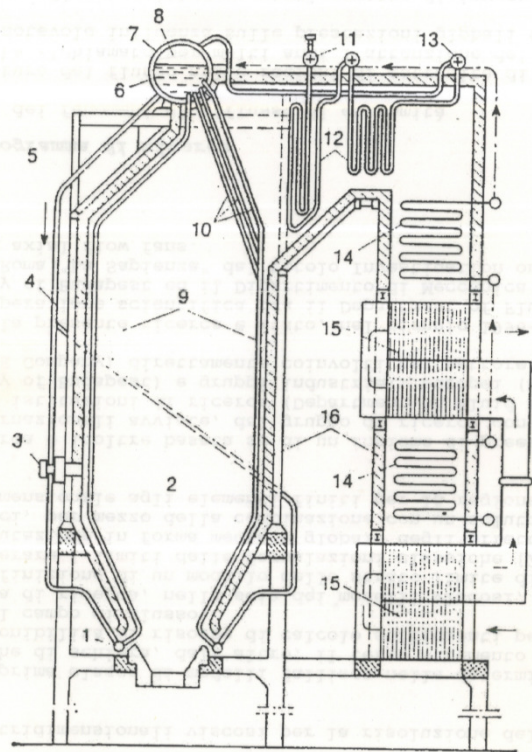
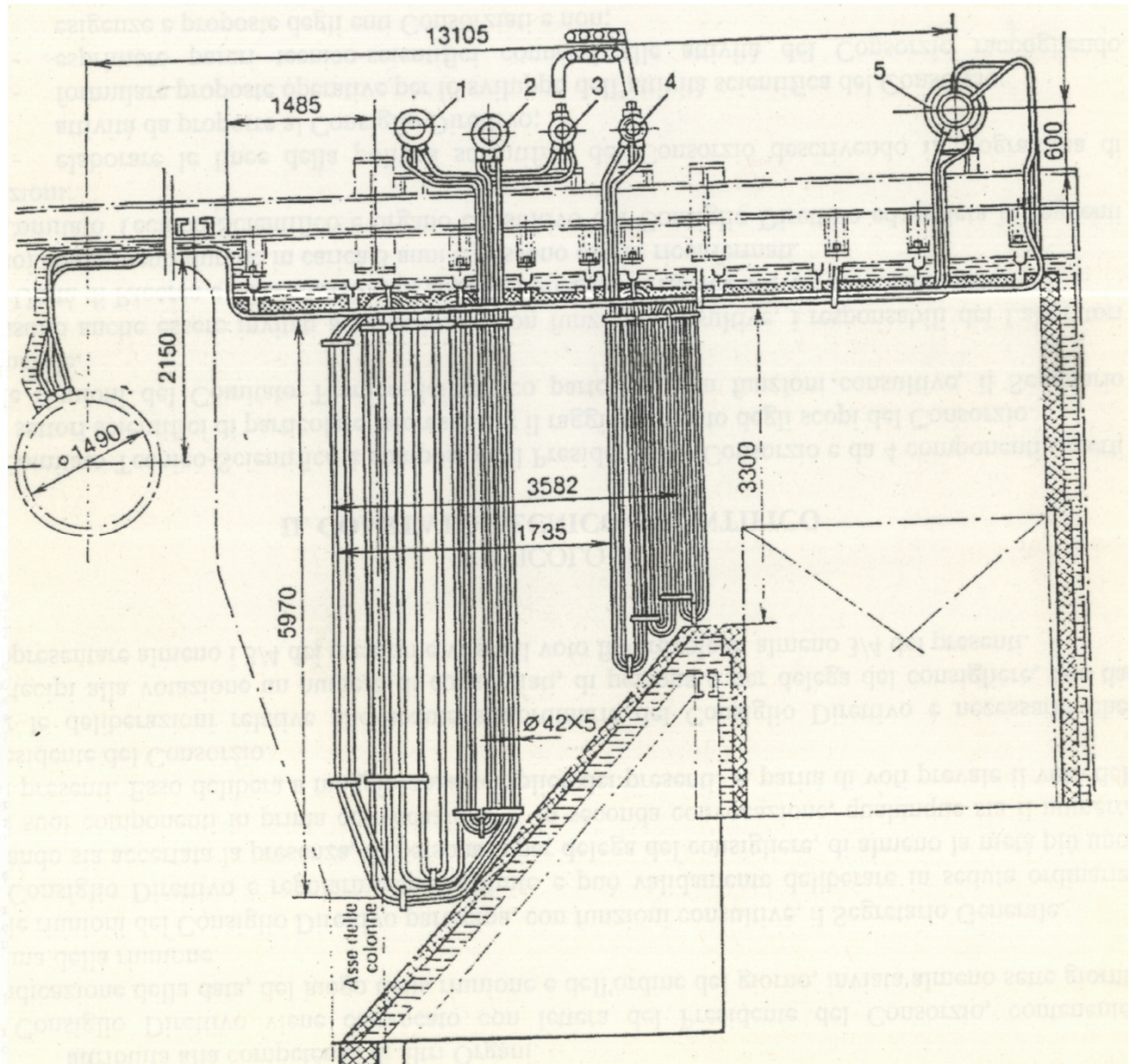


Fig. IV-1. Schema di una caldaia.



Centrali termoelettriche a
vapore, componenti GV

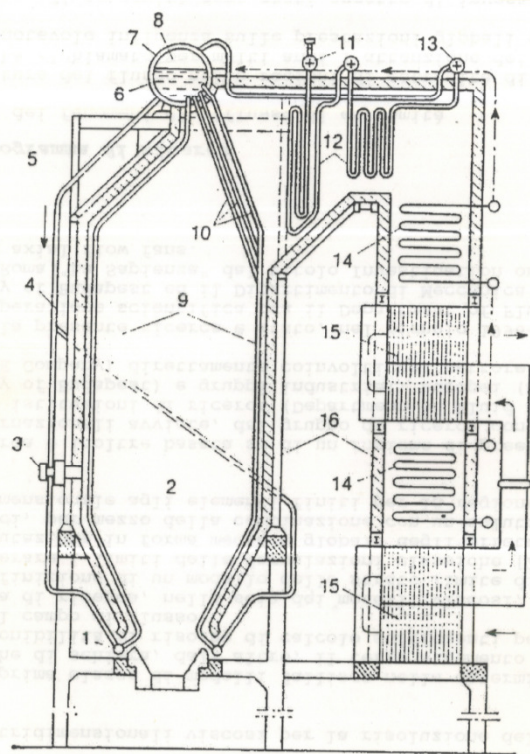


Fig. IV-1. Schema di una caldaia.

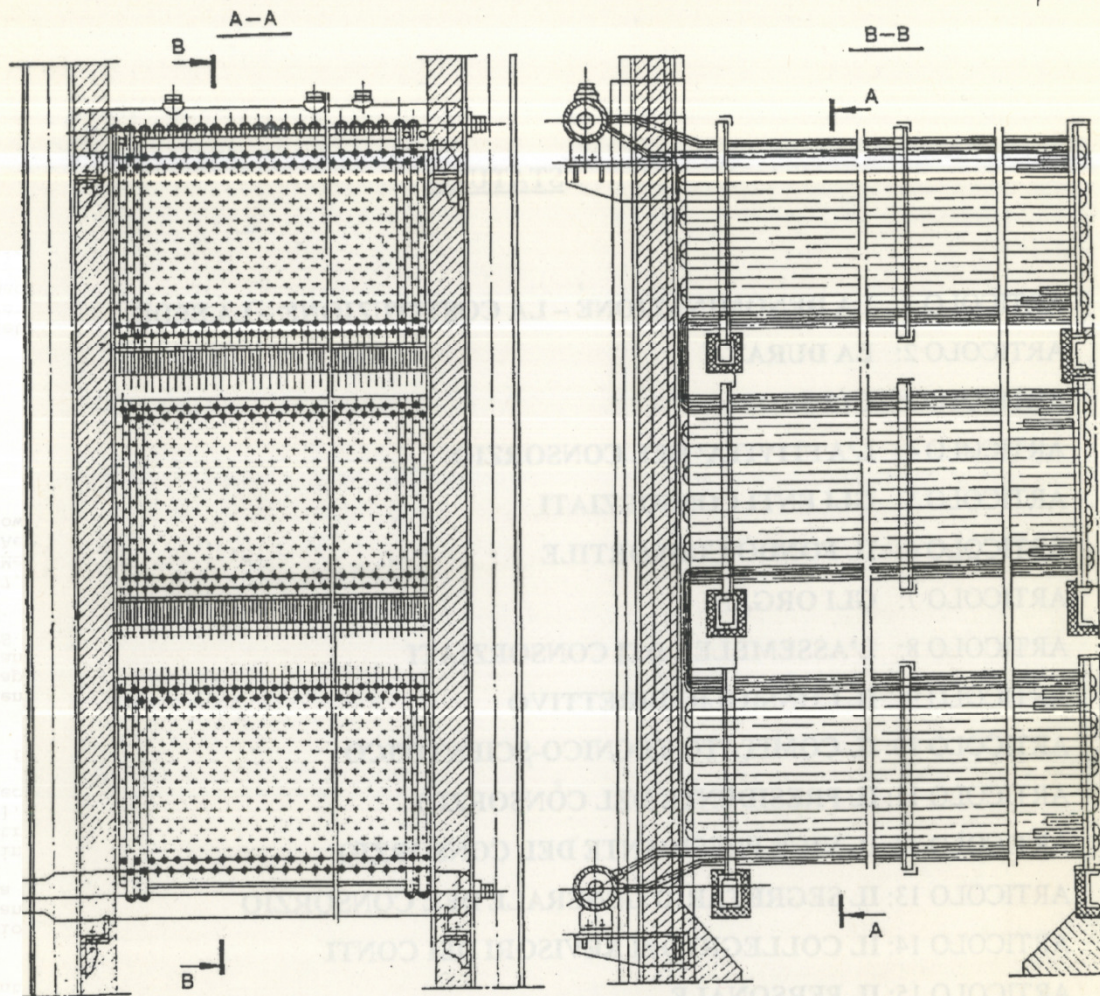
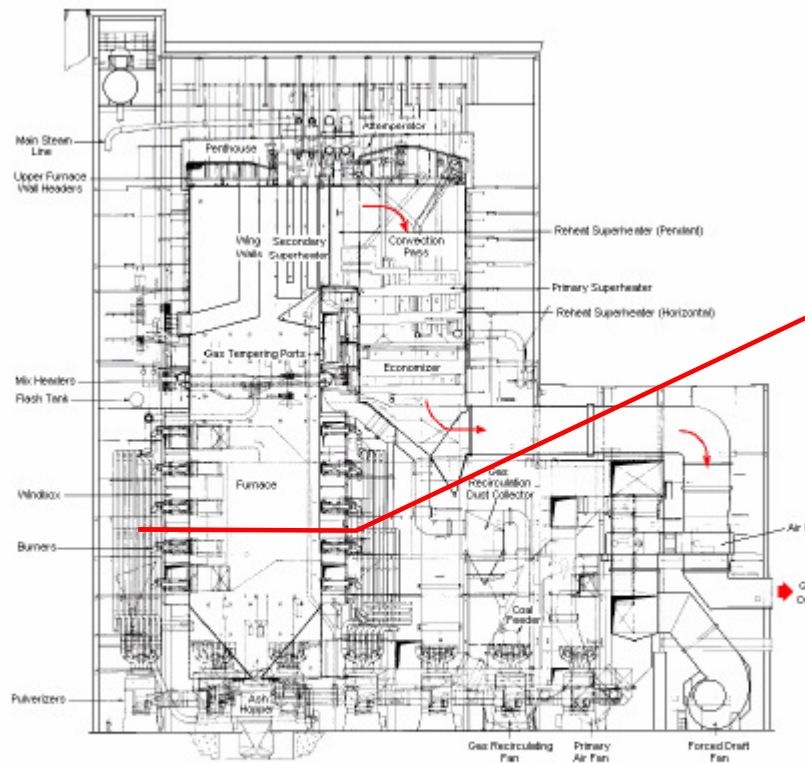


Fig. IV-44. Economizzatore ad acqua della caldaia ТП-230.

Centrali termoelettriche a vapore, componenti (i), GV



Generatore di vapore UP-141 (costr. B&W)
 Potenza elettrica 1300 MW
 Pressione vapore SH 26,5 MPa
 Temperatura vap. SH / RH 545°C / 538°C
 Combustibile carbone bituminoso

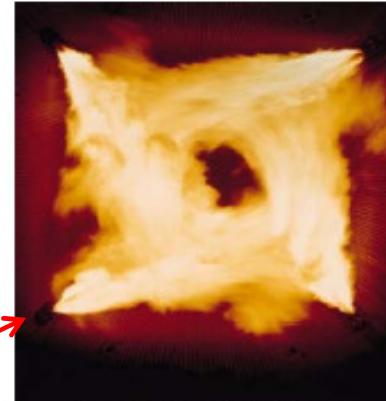
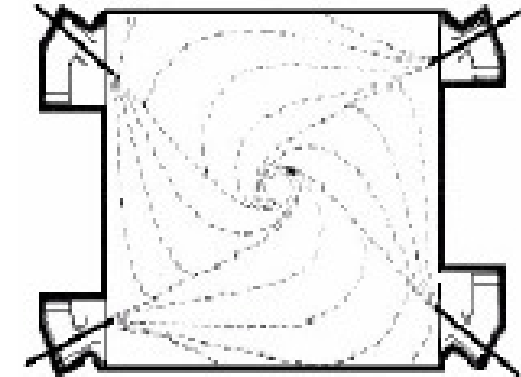


Foto (presa dall'alto) della fiamma in una caldaia a bruciatori tangenziali



"ciclone"

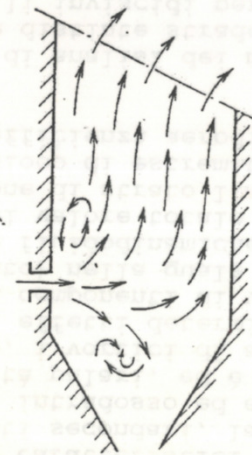


Fig. IV-4. Schema della combustione a fiamma.

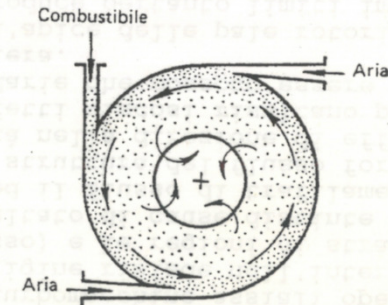
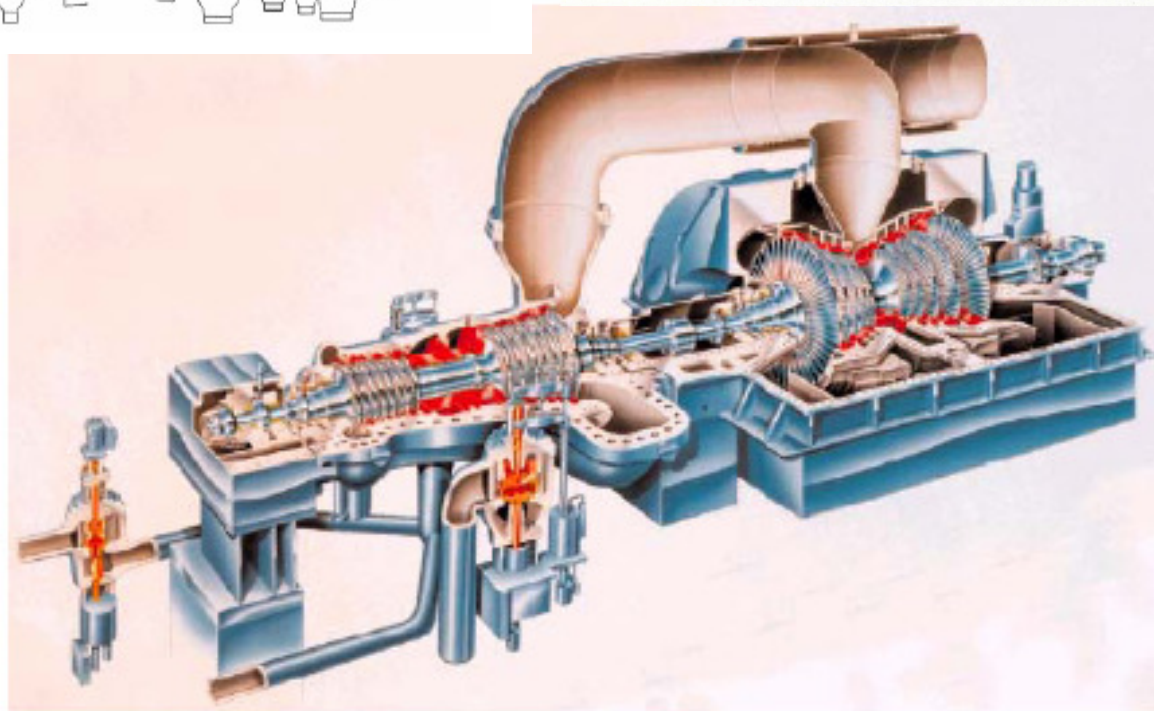
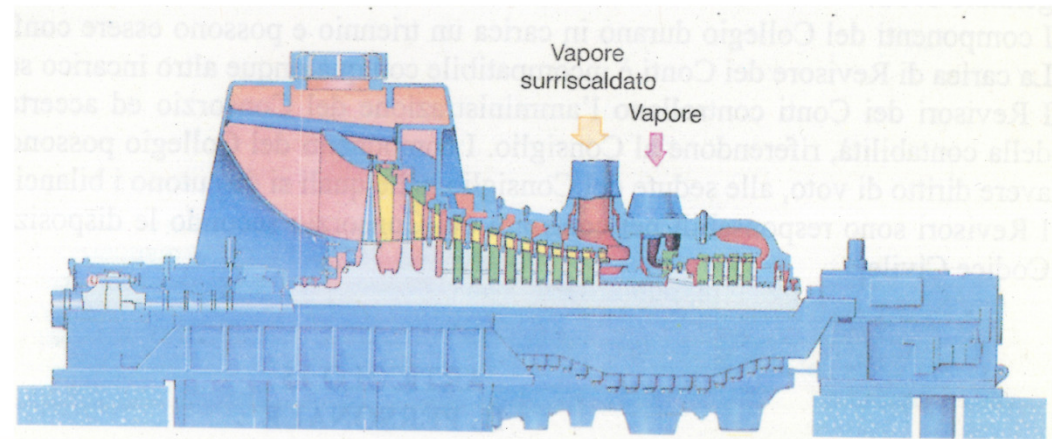
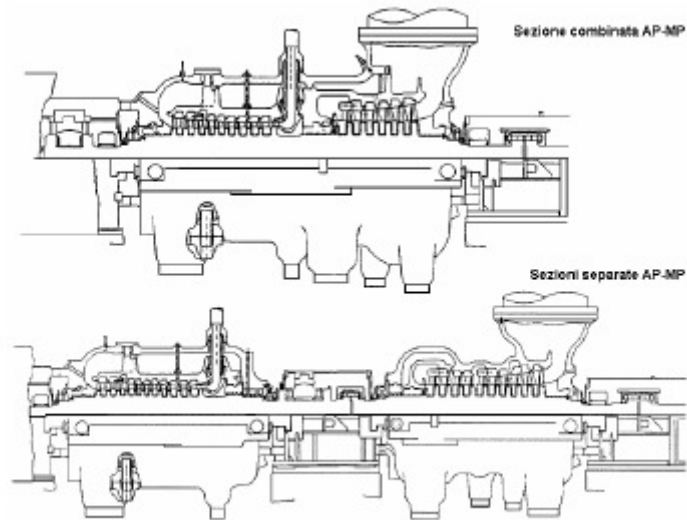


Fig. IV-5. Schema della combustione a ciclone.

Centrali termoelettriche a vapore, componenti (ii), TV



Turbina General Electric per ciclo combinato

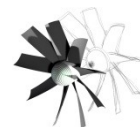


Figura 27.1-b - Turbina a vapore a estrazione regolata e a contropressione; potenza 15 MW a 143,3 giri/s (8600 giri/min), alimentazione del vapore a pressione di 6,5 MPa e temperatura di 450 °C, estrazione regolata a 1,2 MPa, contropressione di 450 kPa (De Pretto-Escher Wyss).

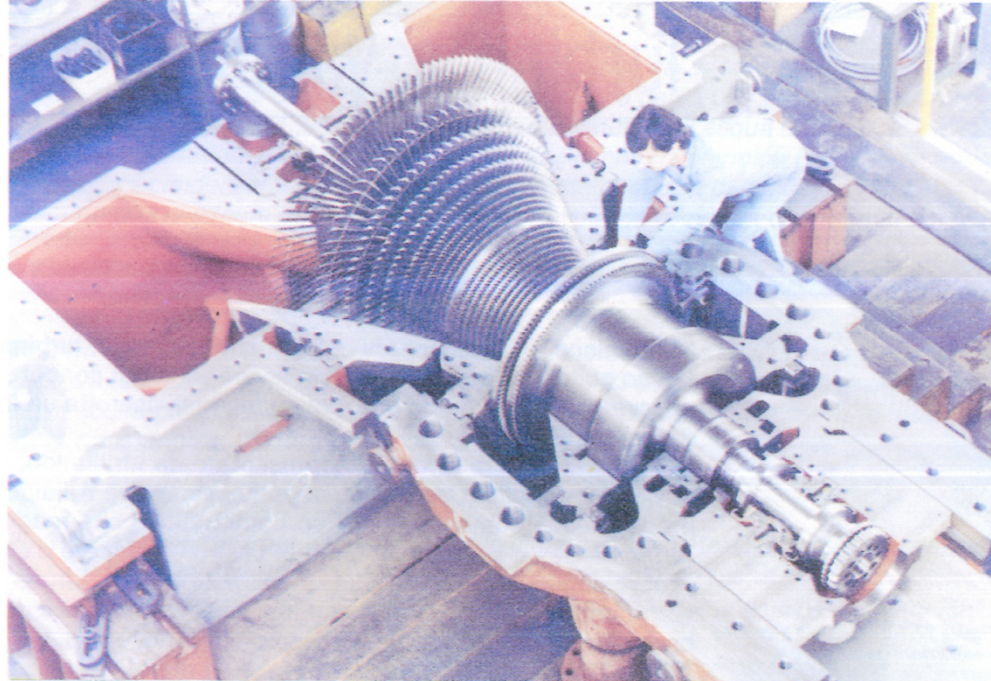
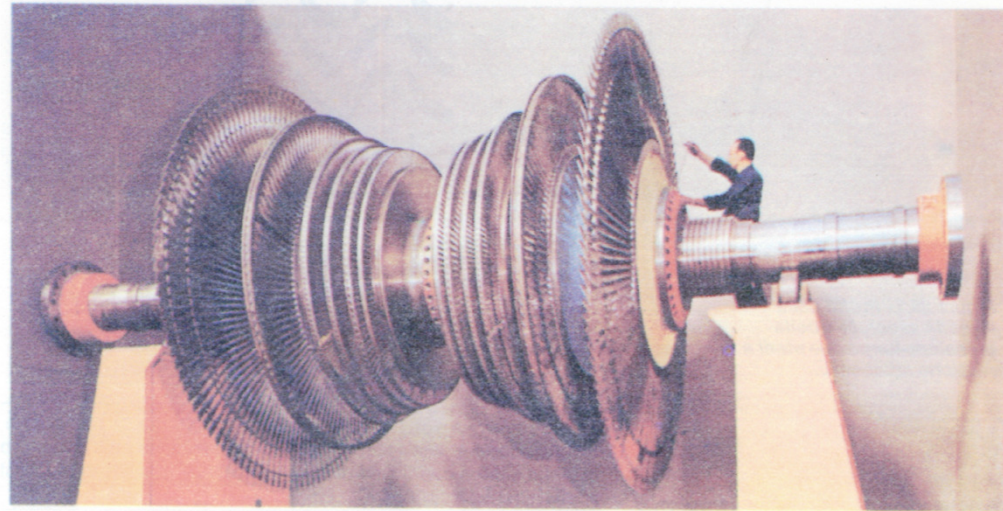
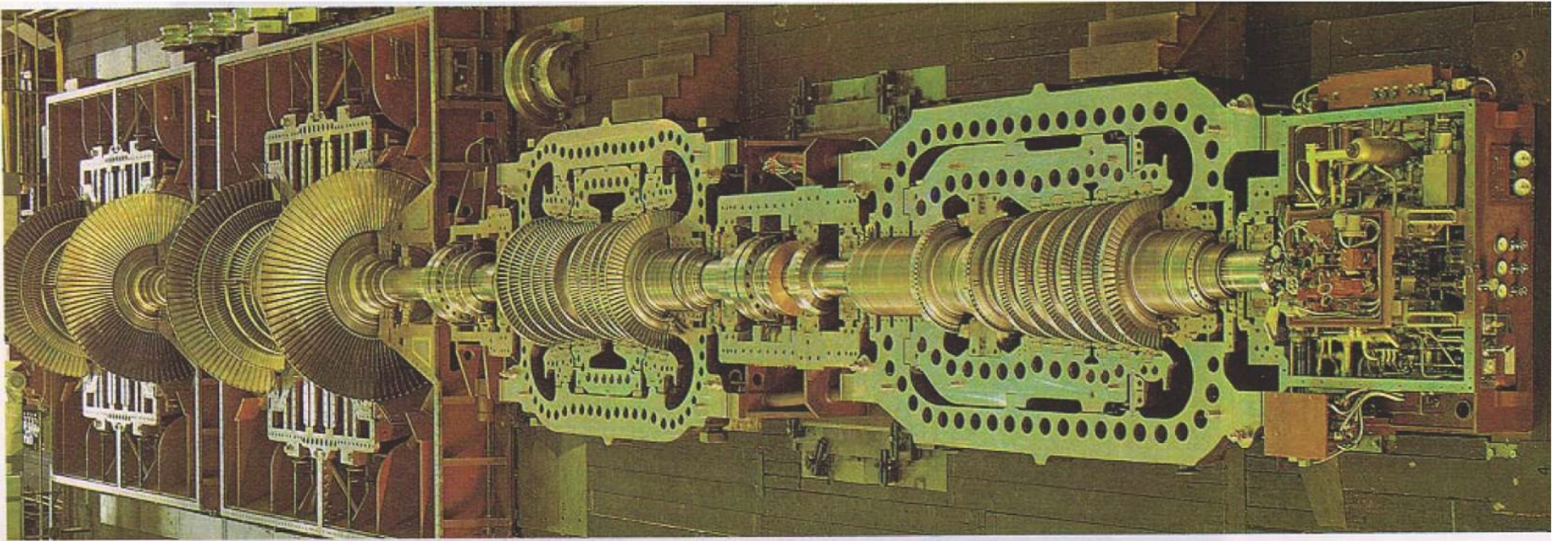


Figura 29.3-c - Albero di bassa pressione per turbina a vapore con altezza delle palette nell'ultima fila di 850 mm (Franco Tosi).





Centrali termoelettriche a vapore, componenti (iii), condensatore

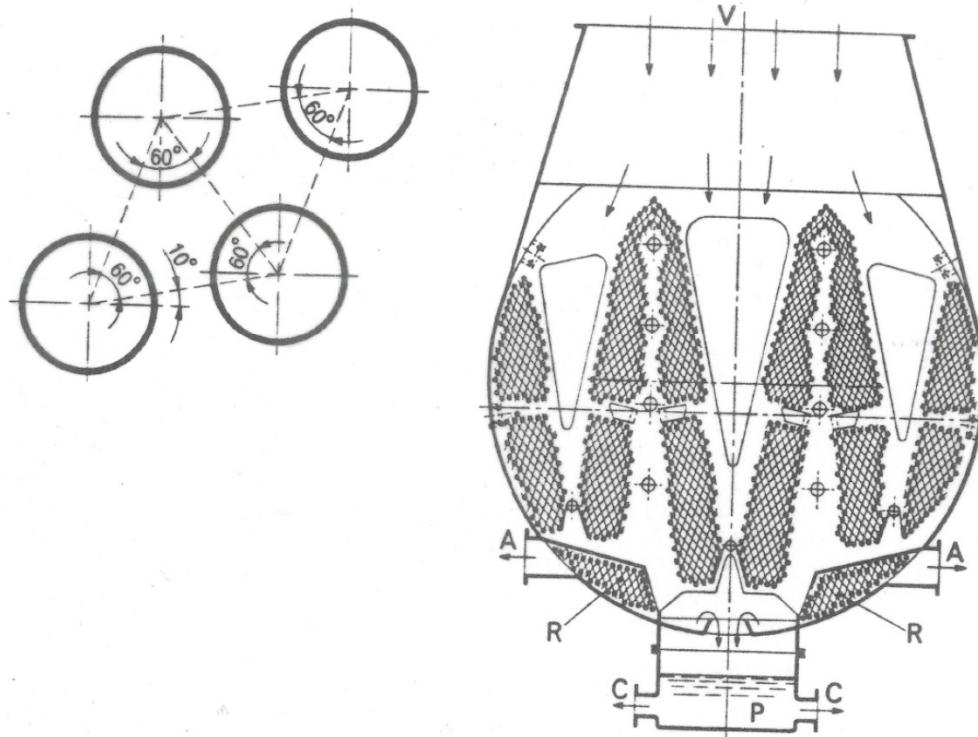
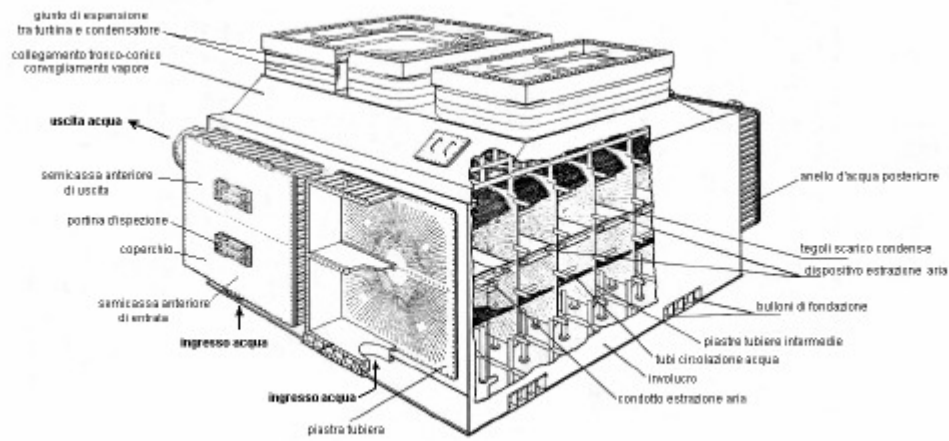
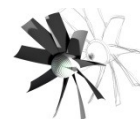
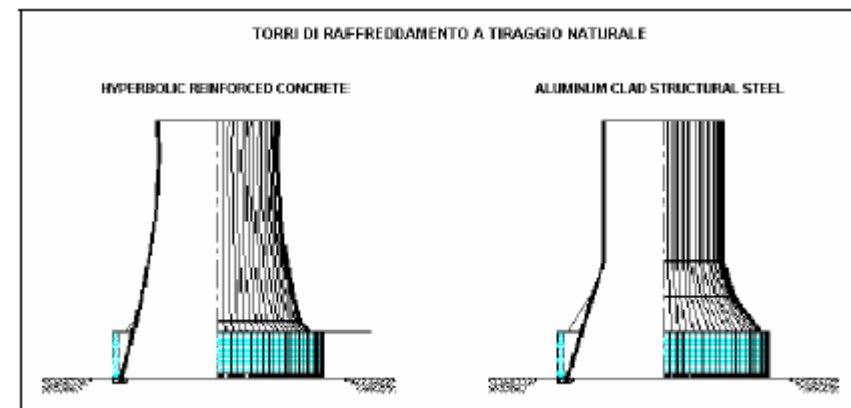
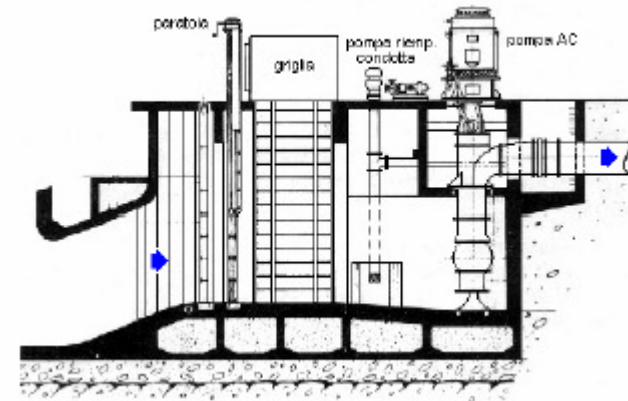


Fig. 2.1.3. — Condensatore a circolazione diretta.

Centrali termoelettriche a vapore, componenti (iv), Ausiliari



Condensatore a doppio passo



Centrali termoelettriche a vapore, componenti (iv), Ausiliari

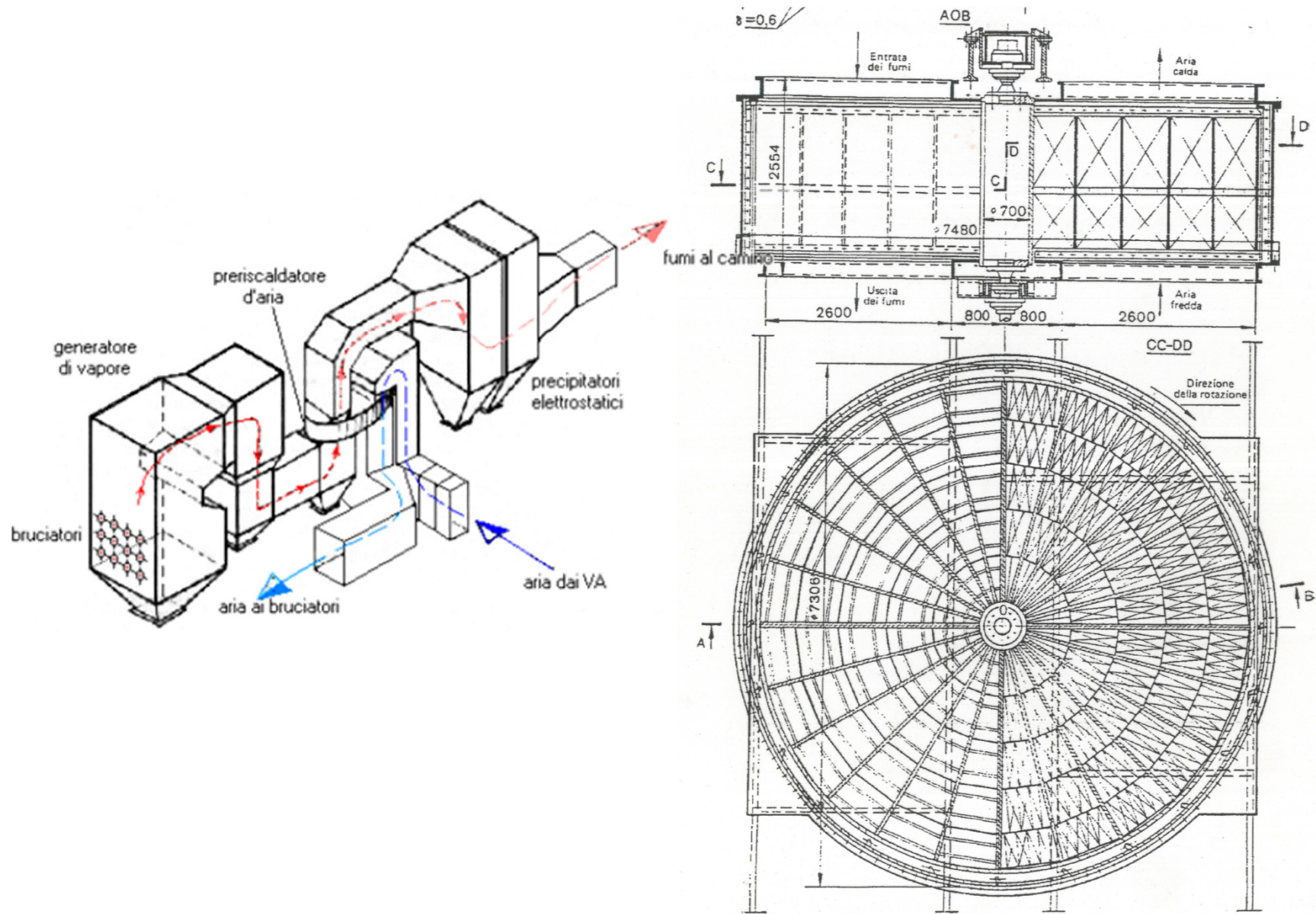
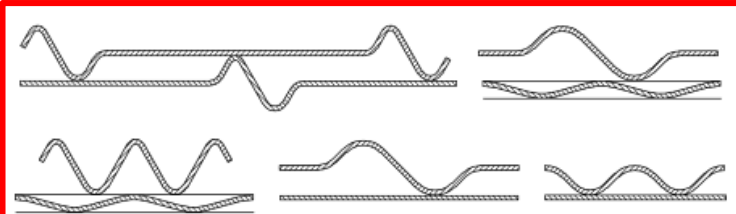
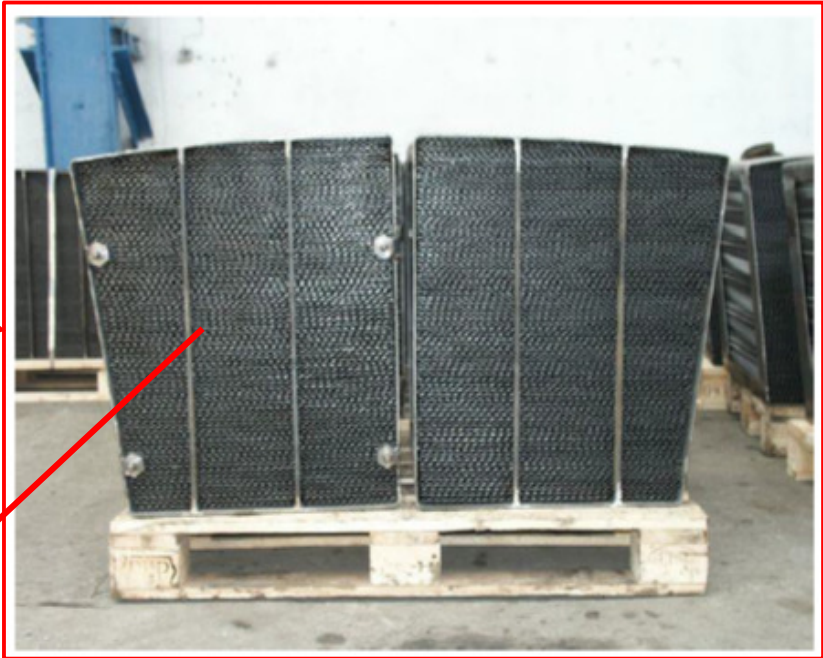
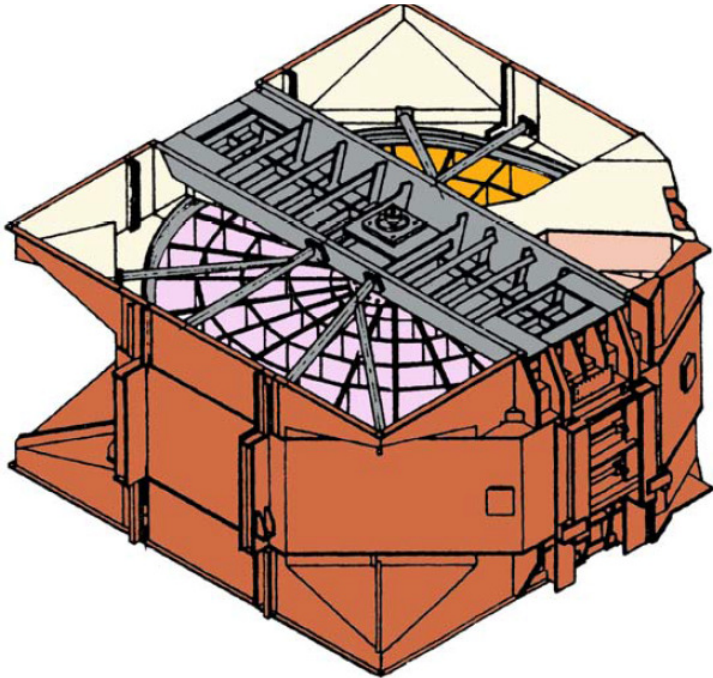
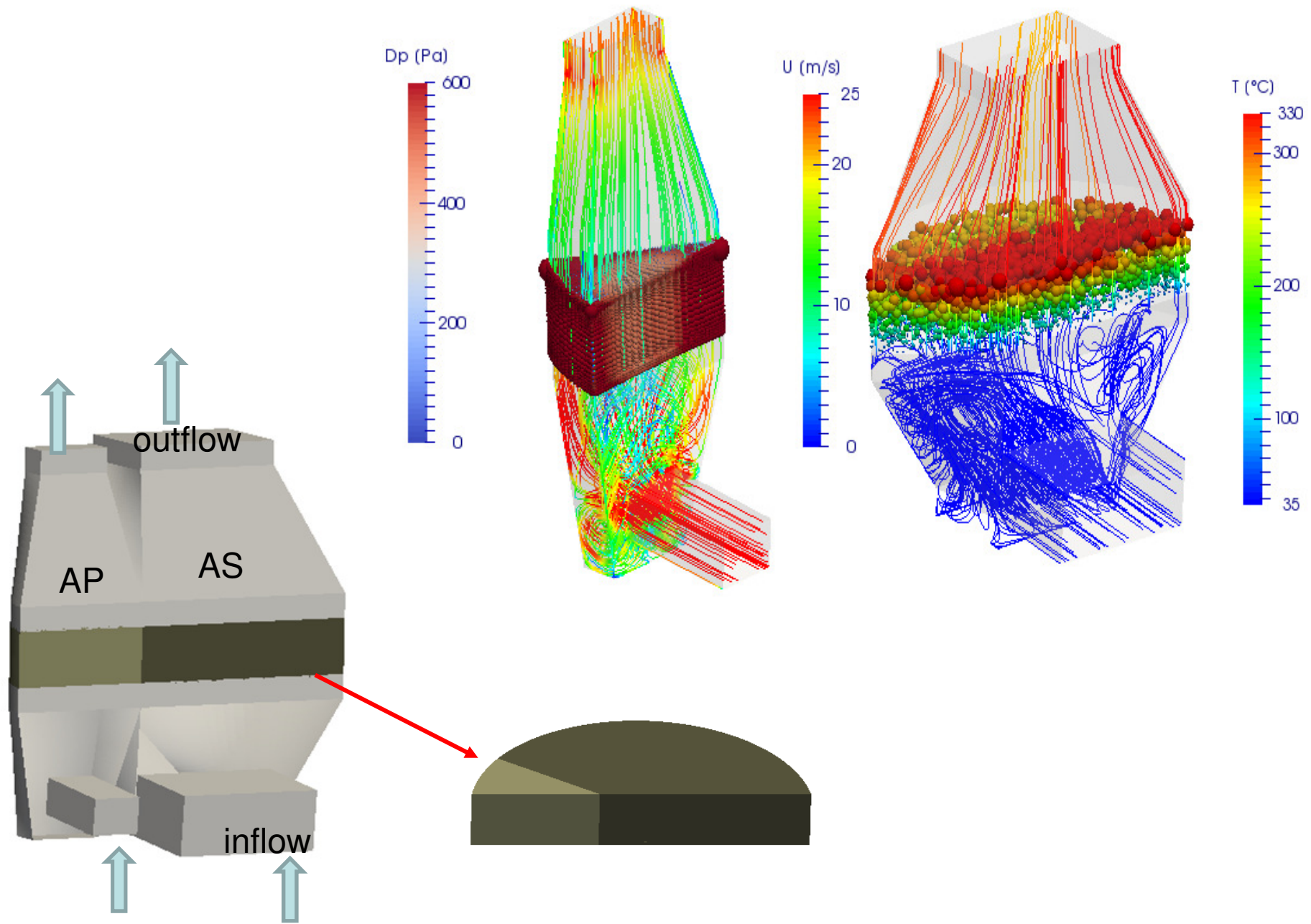


Fig. IV-46. Riscaldatore d'aria rotativo a rigenerazione TR3.





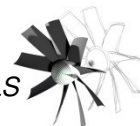
Centrali termoelettriche a vapore, componenti (iv), Ausiliari

Linea fumi, pre-riscaldatore

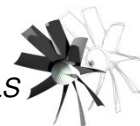
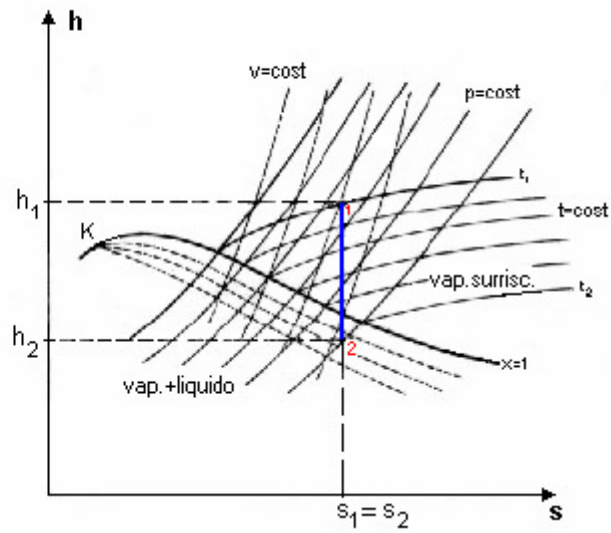
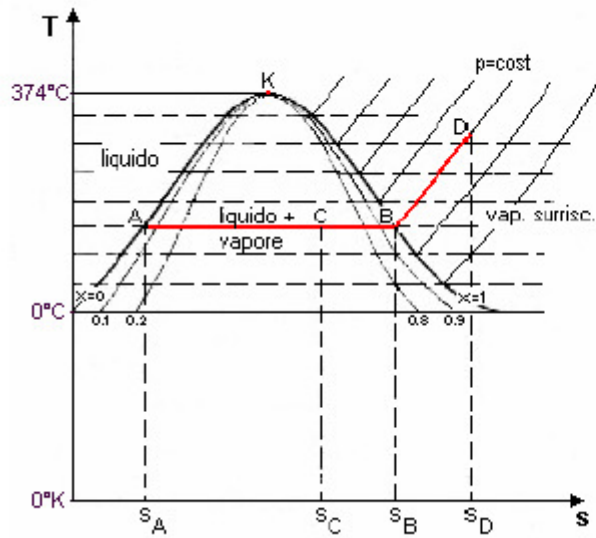
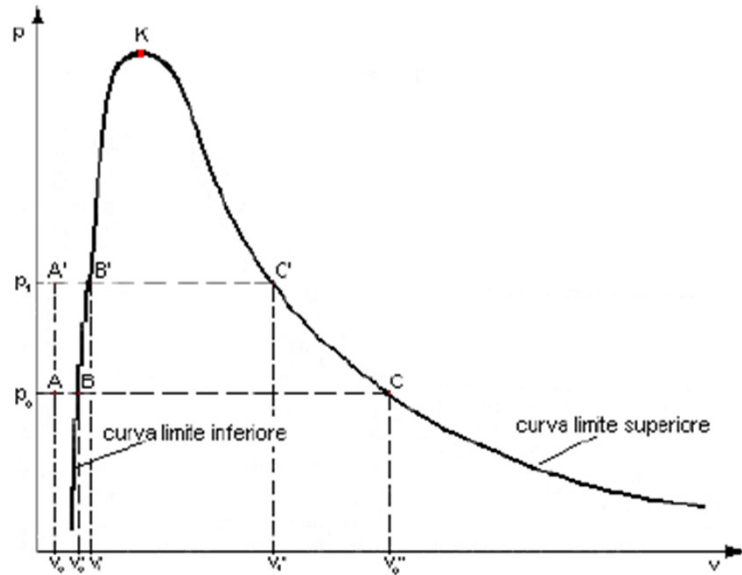
ID fan



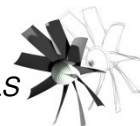
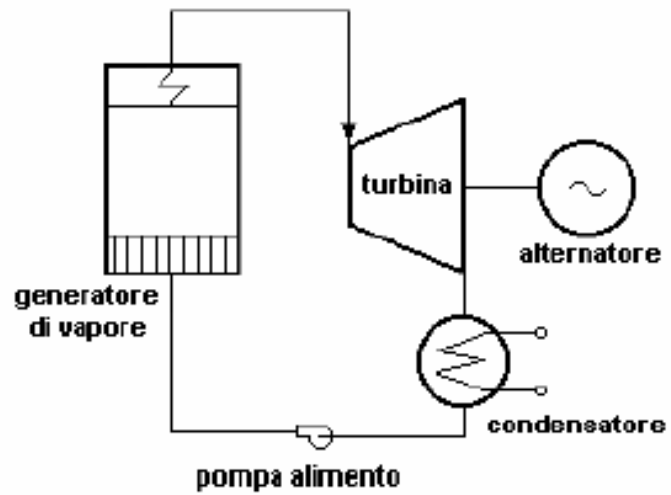
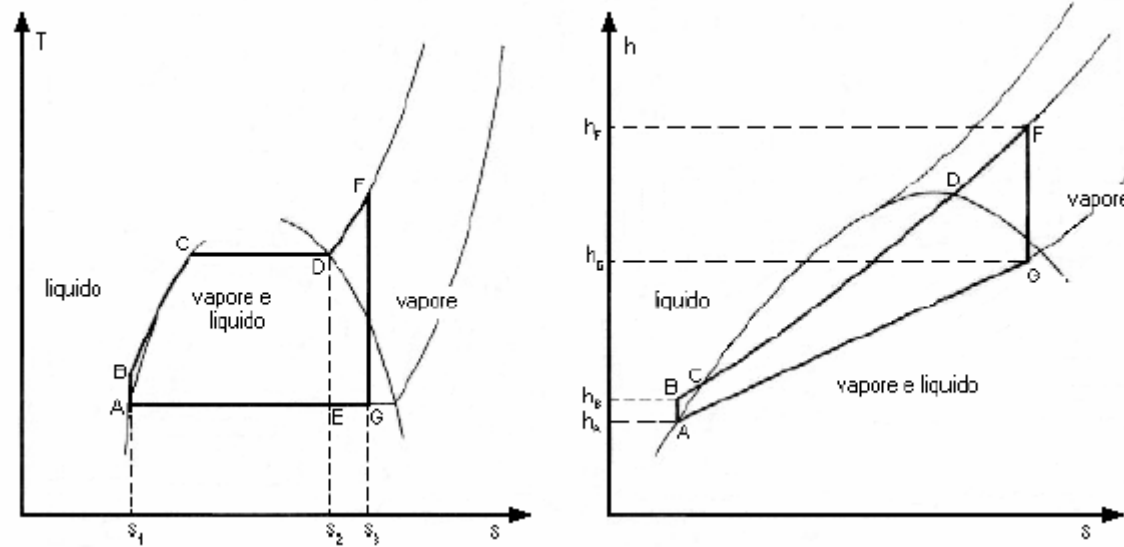
Cicli termodinamici e circuito elementare



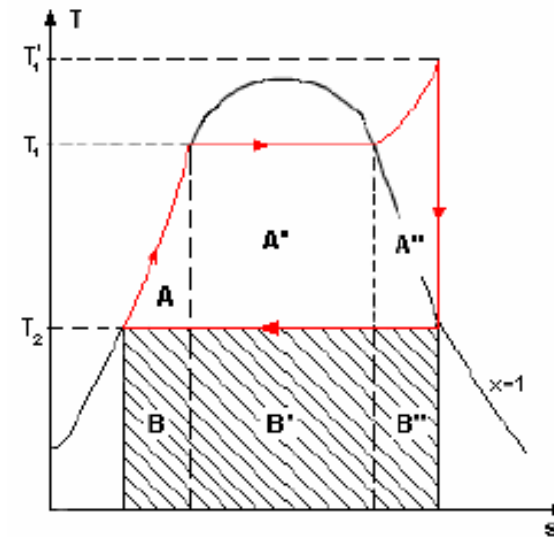
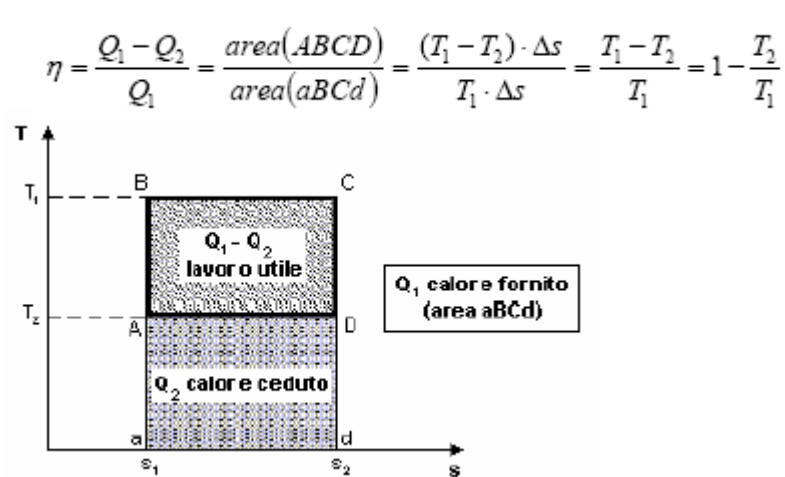
Termodinamica dell'acqua



Cicli termodinamici e circuito elementare (i)



Cicli termodinamici e circuito elementare (ii)



Il rendimento teorico del ciclo di Carnot per un impianto con turbina a vapore che utilizza vapore surriscaldato a 540°C e acqua di raffreddamento a 20°C sarà:

$$\eta = \frac{(540 + 273) - (20 + 273)}{540 + 273} \cong 64\%$$

Mentre quello del ciclo di Carnot per un motore Diesel con temperatura di combustione di 1500°C e gas di scarico a 600°C sarà:

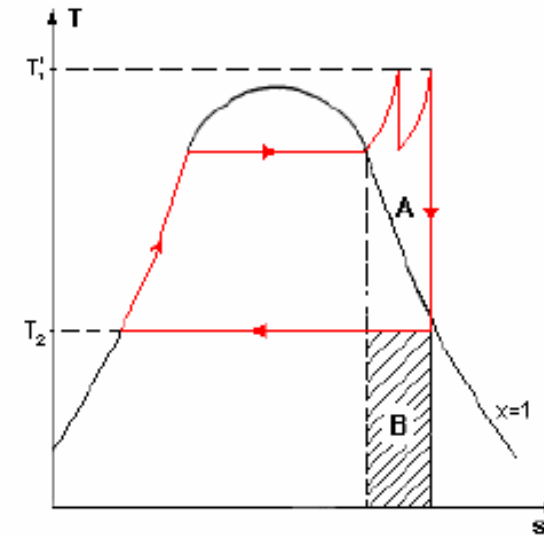
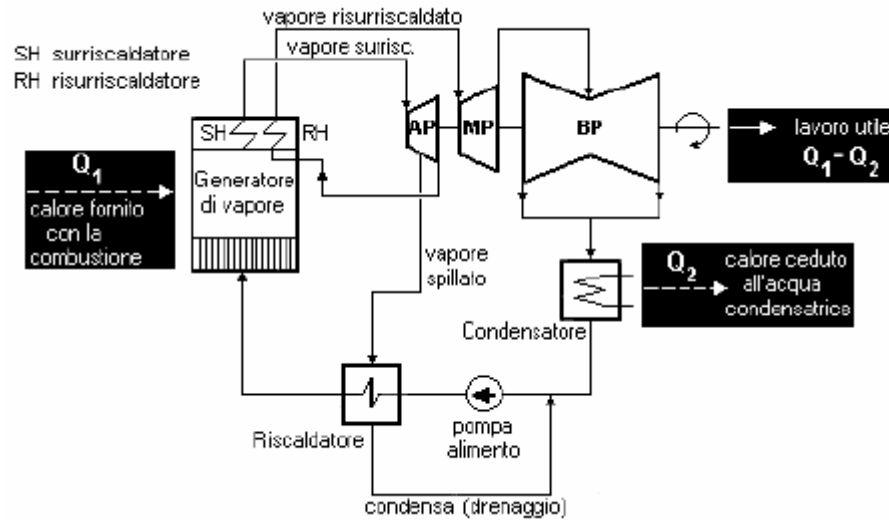
$$\eta = \frac{(1500 + 273) - (600 + 273)}{1500 + 273} = \frac{900}{1773} \cong 51\%$$

I rendimenti reali sono notevolmente minori, sia per lo scostamento dei cicli effettivi da quello di Carnot, sia per le numerose cause di perdita di energia che si hanno nei vari elementi degli impianti.

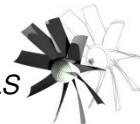
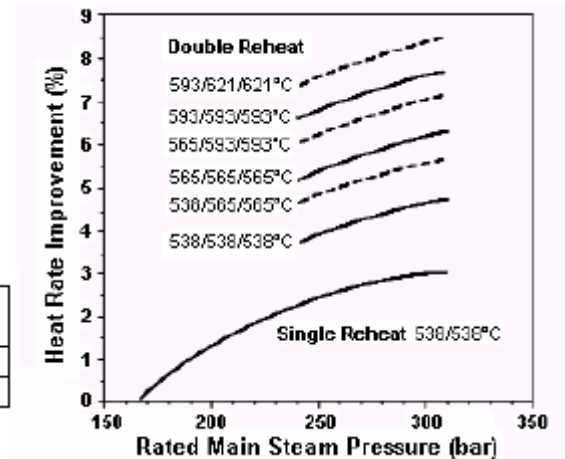


Cicli termodinamici e tecniche di miglioramento del rendimento (i)

Surriscaldamenti ripetuti

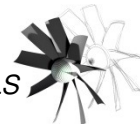
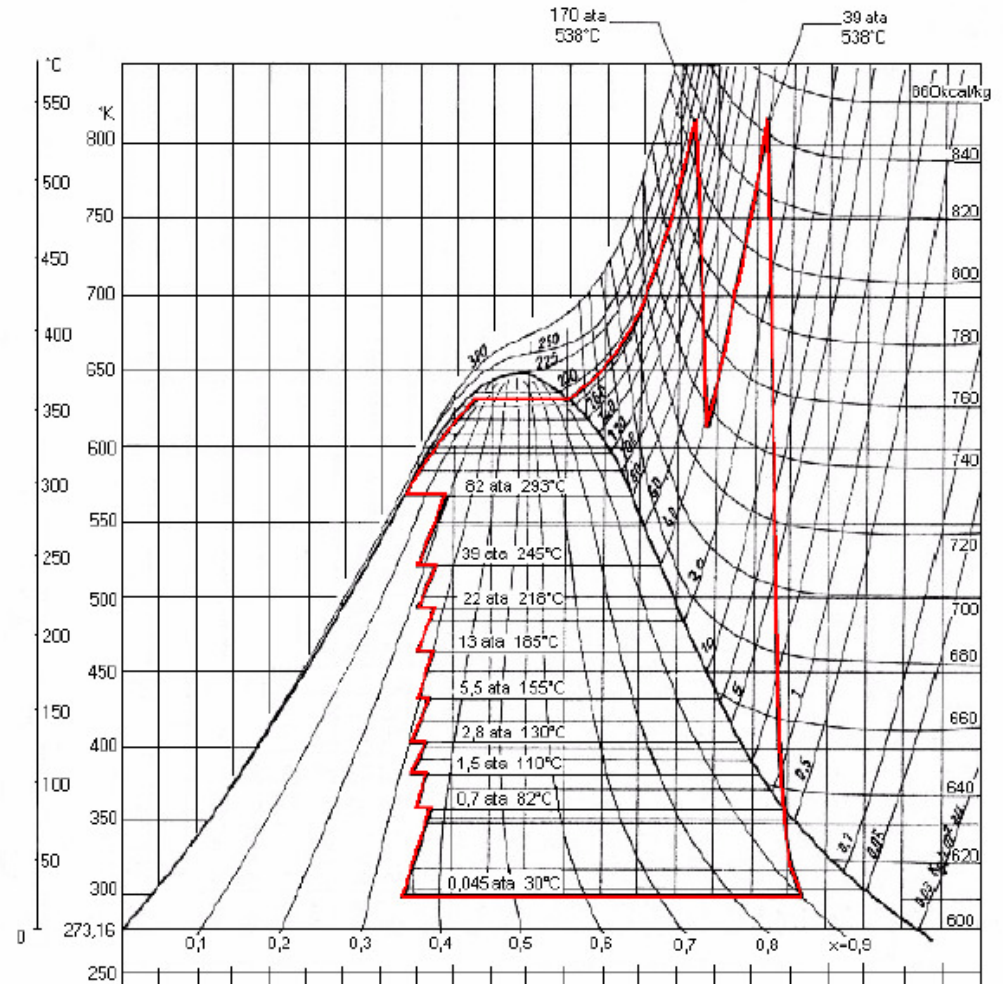
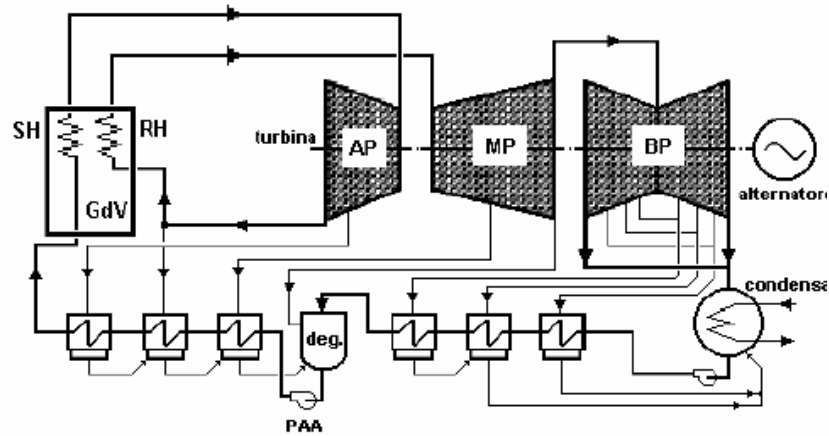


Potenza	Pressione vapore SH uscita caldaia	Temperatura vapore SH	Temperatura vapore RH
320 MW	178 bar	538°C	538°C
660 MW	258 bar	538°C	538°C



Cicli termodinamici e tecniche di miglioramento del rendimento

Rigenerazione termica



Cicli termodinamici e tecniche di miglioramento del rendimento

Rigenerazione termica

In un ciclo senza risurriscaldamento il lavoro utile ottenuto da 1 kg di vapore entrante in turbina e che subisce spillamenti di quantità relativa g_i è pari a:

$$L = (h_v - h_s) - \sum_1^n g_i (h_i - h_s)$$

mentre il calore fornito sarà:

$$Q = (h_v - h_a) - \sum_1^n g_i (h_i - h_a')$$

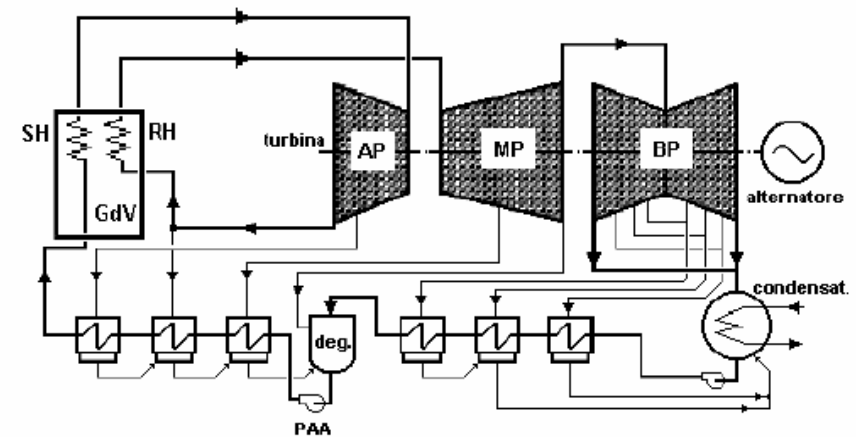
essendo:

- h_v entalpia del vapore all'uscita della caldaia e all'ingresso in turbina
- h_s entalpia del vapore allo scarico nel condensatore
- h_i entalpia dello spillamento i-esimo
- h_a entalpia del condensato all'uscita del condensatore
- h_a' entalpia del condensato dello spillamento i-esimo
- n numero degli spillamenti

Il rendimento del ciclo vale dunque:

$$\eta = \frac{L}{Q} = \frac{(h_v - h_s) - \sum_1^n g_i (h_i - h_s)}{(h_v - h_a) - \sum_1^n g_i (h_i - h_a')} > \frac{h_v - h_s}{h_v - h_a}$$

ed è maggiore di quello dell'analogo ciclo non rigenerativo perché $h_s > h_a'$.



Centrali termoelettriche a vapore

Rendimento effettivo totale di impianto

$$\eta = 1 - \Delta p = 1 - (\Delta p_c + \Delta p_e + \Delta p_i + \Delta p_t + \Delta p_a + \Delta p_u)$$

$$\eta = 1 - \Delta p = \eta_c \cdot \eta_e \cdot \eta_i \cdot \eta_t \cdot \eta_a \cdot \eta_u$$

Δp_c = perdite in caldaia

Δp_e = perdite nelle tubazioni

Δp_i = perdite al condensatore

Δp_t = perdite nella turbina

Δp_a = perdite nell'alternatore

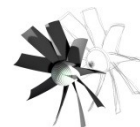
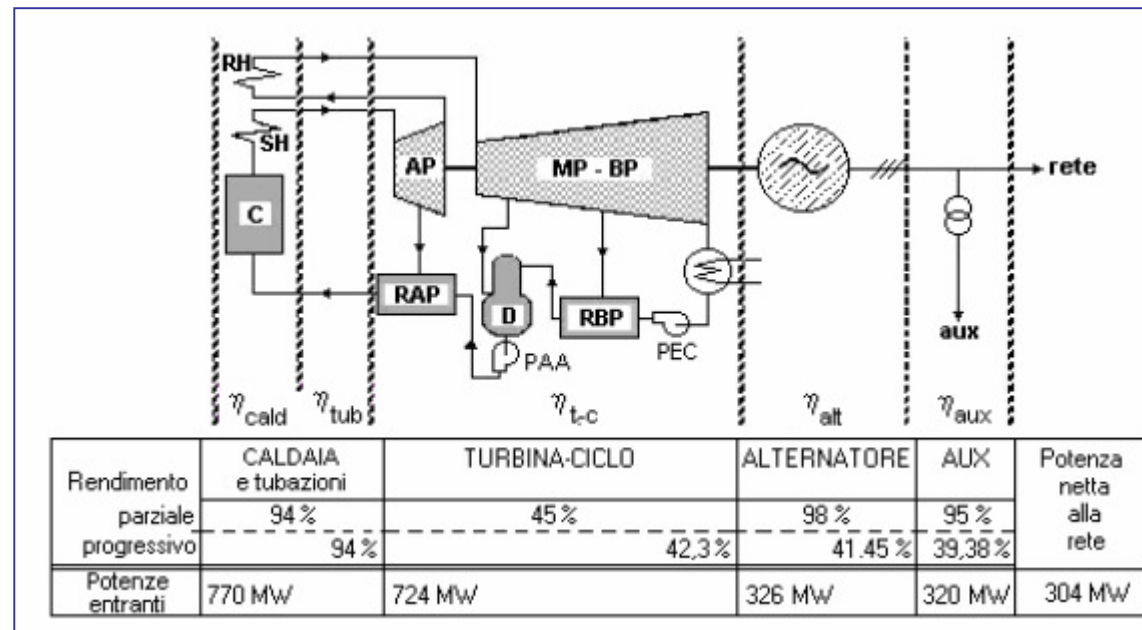
Δp_u = energia assorbita dai servizi ausiliari

Di comune impiego il *consumo specifico*, definito come le calorie spese per convertire 1 kWh di energia ai morsetti del generatore

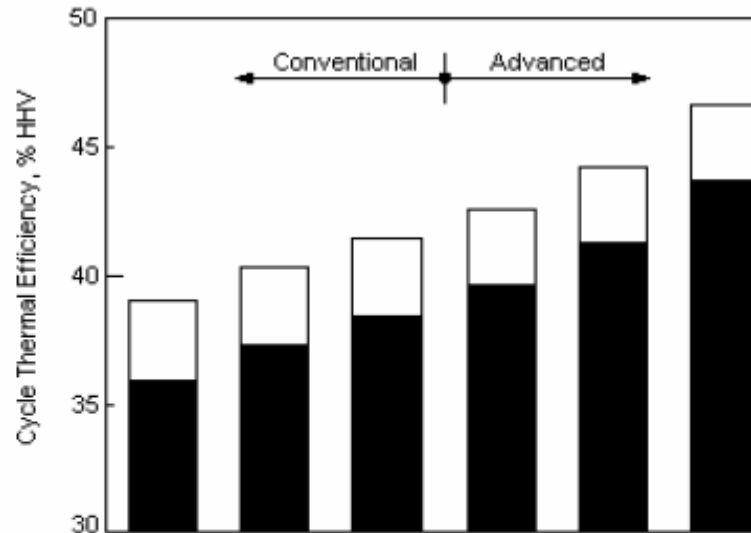
$$c.s. = \frac{860 \text{ kcal}}{\eta \text{ kWh}}$$

Consumo specifico lordo è il quoziente tra il consumo di calore e l'energia elettrica prodotta durante l'intervallo di tempo considerato, misurata ai morsetti dell'alternatore.

Consumo specifico netto è il quoziente tra il consumo di calore e l'energia elettrica prodotta durante l'intervallo di tempo considerato, misurata al punto di uscita verso la rete, escludendo quindi l'energia elettrica assorbita dai servizi ausiliari di centrale e le perdite nei trasformatori di centrale.



Centrali termoelettriche a vapore, linee evolutive



Pressure, psi	2400	3500	3500	4500	4500	6000
SH Temp. °F	1000	1000	1000	1000	1100	1200
RH Temp. °F	1000	1000	1025	1025	1050	1100
2RH Temp. °F	—	—	1050	1050	1050	1100
Pressure, bar	166	241	241	310	310	414
SH Temp. °C	538	538	538	538	593	649
RH Temp. °C	538	538	552	552	566	593
2RH Temp. °C	—	—	566	566	566	593

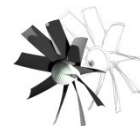
I cicli a 166 bar/538°C/538°C (pressione subcritica con semplice risurriscaldamento) e a 241 bar/538°C/538°C (pressione supercritica con semplice risurriscaldamento) sono attualmente molto diffusi e sono caratterizzati da ampia disponibilità ed affidabilità.

Il progetto del ciclo ipercritico a doppio risurriscaldamento 310 bar/538°C/552°C/566°C è oggi considerato realizzabile se il maggior impegno economico viene compensato dall'aumento dell'efficienza.

I cicli operanti a pressioni superiori a 4000 psi (276 bar) e a temperature maggiori di 1025°F (552°C) sono detti *ultrasupercritici*.

Le unità ultrasupercritiche in genere sono dotate di caldaie ad attraversamento forzato e doppio risurriscaldamento.

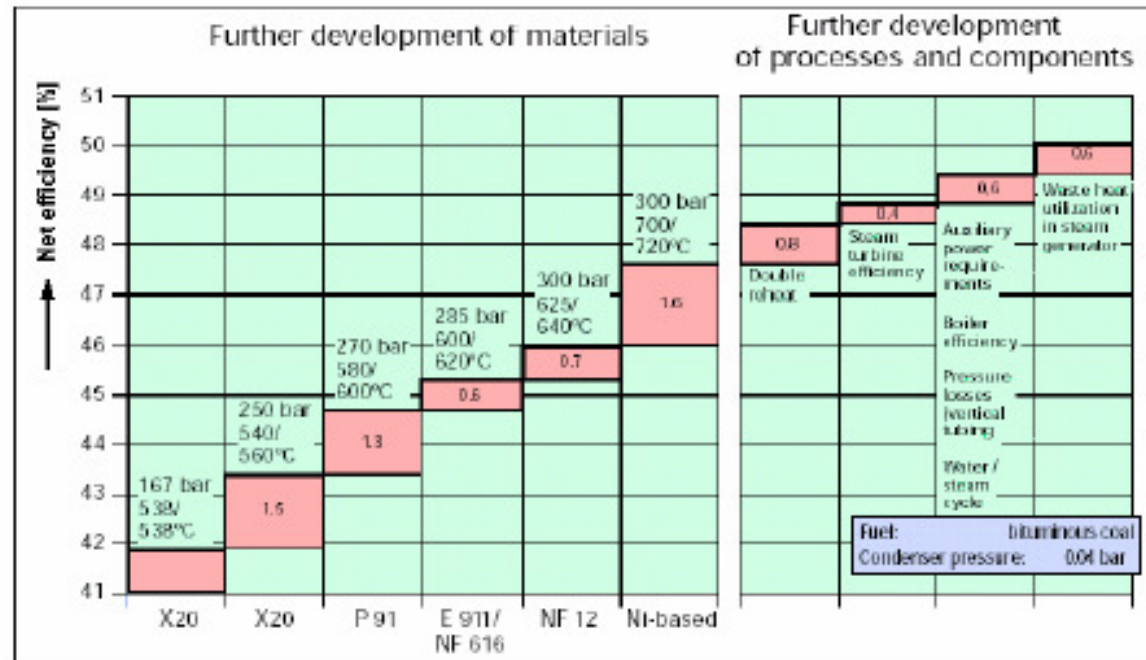
La tecnologia per la produzione di energia elettrica mediante cicli a vapore è rimasta praticamente bloccata per molti anni al limite tradizionale dei 1000°F (538°C) di temperatura del vapore surriscaldato e risurriscaldato, principalmente per i limiti imposti dall'utilizzo di acciai ferritici basso-legati.



Centrali termoelettriche a vapore, linee evolutive

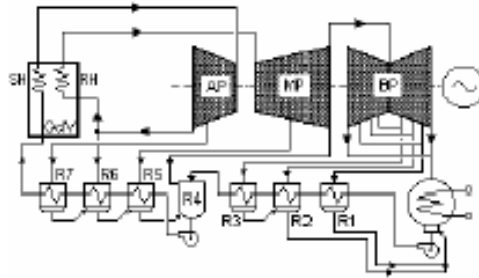
Gli sviluppi in corso riguardano essenzialmente tre classi di acciai:

- gli acciai ferritici, in grado di operare fino a 620-630°C,
- gli acciai austenitici, per componenti eserciti tra 650 e 670°C,
- le leghe di nichel, per impieghi oltre 700°C.



Centrali termoelettriche a vapore, bilancio

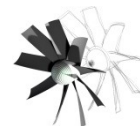
Bilancio termico di una unità termoelettrica tradizionale da 320 MW
Centrale di Tavazzano-Montanaso (Lodi)



	Pressione [ata]	Temperatura [°C]	Entalpia [kcal/kg]	Portata [kg/h]
Vapore SH ammissione turbina	170	538	811,8	1.023.300
Vapore 1° spillamento ingresso R7	75,9		768	106.965
Vapore scarico turbina AP (RH freddo)	37,7			
Vapore 2° spillamento ingresso R6	36,6		725,6	80.905
Vapore ingresso turbina MP (RH caldo)	34	538	844,5	788.785
Vapore 3° spillamento ingresso R5	16,4		794,4	48.660
Vapore scarico turbina MP	7,2			
Vapore 4° spillamento ingresso degassatore	7,0		740,4	48.670
Vapore alla turbina BP			741,6	736.495
Vapore 5° spillamento ingresso R3	2,5		690,7	45.255
Vapore 6° spillamento ingresso R2	0,73		639,5	28.490
Vapore 7° spillamento ingresso R1	0,29		607,5	44.165
Vapore scaricato al condensatore	0,05	32,5	566,1	619.355
Condensato ingresso R1 (BP)		33,1	33,1	
Condensato uscita R1 - ingresso R2 (BP)		65,4	65,4	
Condensato uscita R2 - ingresso R3 (BP)		88,8	88,8	
Condensato uscita R3 - ingresso R4 (degassatore)		125,1	125,4	738.100
Alimento ingresso R5 (AP)		166,5	170,7	
Alimento uscita R5 - ingresso R6 (AP)		201,5	207,1	
Alimento uscita R6 - ingresso R7 (AP)		244	252,8	
Alimento uscita R7 - ingresso economizzatore		290	306,1	
Drenaggio R7		249	258,1	106.965
Drenaggio R6		206,5	210,5	187.870
Drenaggio R5		171,5	173,2	236.530
Drenaggio R3		93,8	93,8	45.255
Drenaggio R2		70,4	70,4	73.745
Drenaggio R1		64,7	64,7	44.165

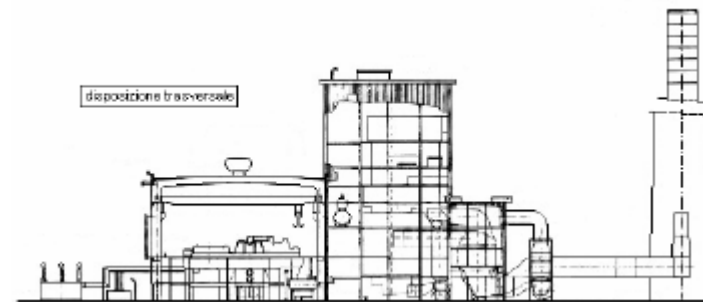
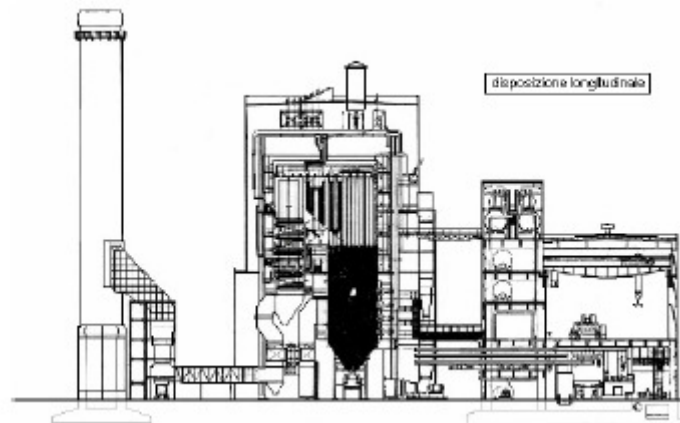
Il consumo specifico di turbina e ciclo, utilizzando i dati riportati in tabella, risulta:

$$c.s. = \frac{1.023.300 \cdot (811,8 - 306,1) + 788.785 \cdot (844,5 - 725,6)}{321.095} = 1.903,70 \frac{\text{kcal}}{\text{kWh}}$$



Centrali termoelettriche a vapore, lay-out di centrale

- generatore di vapore,
- macchinario termico ed elettrico,
- condensatore e relative opere idrauliche,
- parco combustibili,
- impianto di demineralizzazione,
- impianto di trattamento delle acque reflue,
- impianto di abbattimento delle emissioni inquinanti,
- stazione elettrica,
- quadri di comando, controllo, regolazione,
- servizi generali (uffici, officine, magazzini,...).

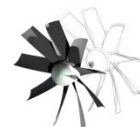


Lo schema monoblocco (ogni gruppo turbina-alternatore è associato ad una sola caldaia e i relativi ausiliari elettrici sono alimentati da un trasformatore derivato dal montante dell'alternatore) prevede una maggiore semplicità d'impianto, una riduzione del costo della centrale e nessuna interferenza tra i vari gruppi.

La sistemazione dei gruppi può essere longitudinale o trasversale.

Nella sistemazione longitudinale viene limitata la larghezza della sala macchine, con conseguente alleggerimento delle strutture di copertura del fabbricato; per contro viene aumentata notevolmente la lunghezza della sala stessa.

La disposizione trasversale risponde meglio alla simmetria generale dell'unità e dei suoi ausiliari e richiede un percorso minore delle tubazioni di collegamento tra la caldaia e la turbina.



Riferimenti

C. Caputo, *Gli impianti convertitori di energia, Vol. I*, Ed. Masson

O. Acton, C. Caputo, *Impianti motori, Tomo I* Ed. UTET, 1992

G. Cornetti *Macchine Termiche* Ed. il Capitello

G. Cornetti *Macchine Idrauliche* Ed. il Capitello

G. Lozza *Turbine a gas e cicli combinati* Ed. Esculapio

American Society of Mechanical Engineers, ASME:
International Gas Turbine Institute at <http://www.asme.org/igti/>

Power and energy resources at <http://www.asme.org/power/>

The Institution of Mechanical Engineers, IMechE (UK):
Power division at <http://www.imeche.org.uk/power/>

