

# Ciclo Rankine e centrali a vapore

Alberto Berizzi,  
Dipartimento di Elettrotecnica  
Politecnico di Milano

1

# Trasformazioni e diagrammi

- Isoterme
- Isocore
- Isobariche
- Adiabatiche:  $pV^k=RT$   
con  $k=c_p/c_v$
- $p, V$
- $T, S$  (entropici)
- $h, S$  (di Mollier)

2

## Trasformazione dell'acqua in vapore

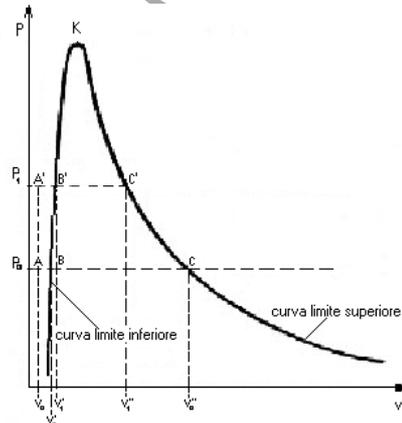
Punti B: acqua

Punti entro la curva: vapore saturo umido

Punti C: vapore saturo secco

Punti a destra della curva limite superiore: vapore surriscaldato

K: punto critico  
(374°C, 0.0031 m<sup>3</sup>/kg, 2207 N/cm<sup>2</sup>)



3

## Diagrammi p, V per l'acqua

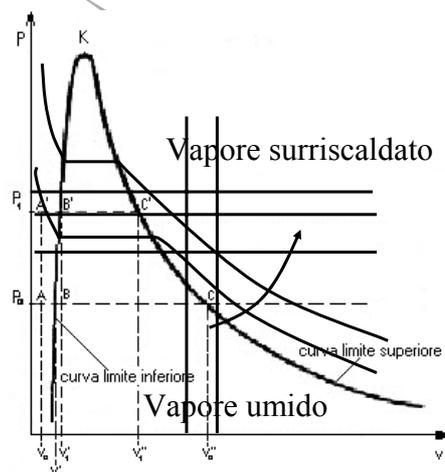
Isobare: rette orizzontali

Isocore: rette verticali

Isoterme: per un gas  $pV=RT$ , quindi un'iperbole  
per il vapore umido,  $p$  costante

Adiabatiche: rappresentate dall'equazione caratteristica (più ripide delle isoterme)

Lavoro compiuto: è rappresentato dall'area sottesa alla trasformazione; è positivo se il volume aumenta



4

## Unità di misura delle pressioni

- L'unità di misura del SI è il Pascal (N/m<sup>2</sup>)
- Tuttavia si utilizzano ancora le seguenti:
  - 1 ata = 1 kg<sub>p</sub>/cm<sup>2</sup> = 9.81 N/cm<sup>2</sup> 10000 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> = 98 000 Pa
  - 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa
  - 1 atm = 101 325 Pa
  - 1 mmHg = 133,32 Pa

5

## Diagrammi T,S

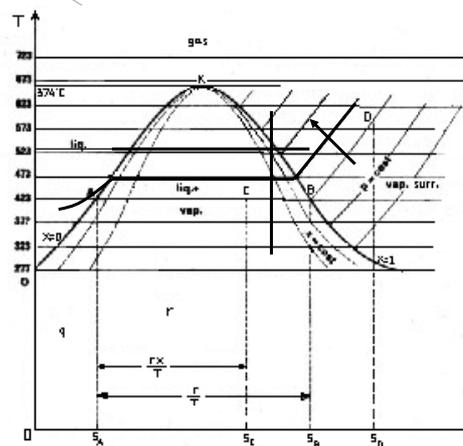
Isoterme: rette orizzontali

Adiabatiche: rette verticali

Isobare: per il vapore umido, coincidono con le isoterme, poi salgono

Isocore: salgono più rapidamente delle isobare

Calore fornito o sottratto: è rappresentato dall'area sottesa alla trasformazione; è positivo se la trasformazione avviene nel senso delle entropie crescenti



Titolo di vapore: peso del vapore in 1 kg di miscela acqua-vapore

6

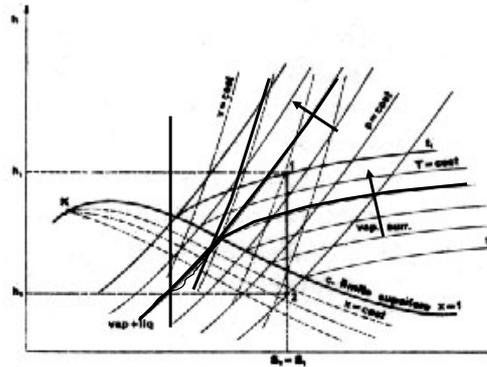
# Diagramma di Mollier

Isoterme

Adiabatiche: rette verticali

Isobare (per il vapore umido coincide con l'isoterma, retta);  
oltre la curva limite non c'è discontinuità

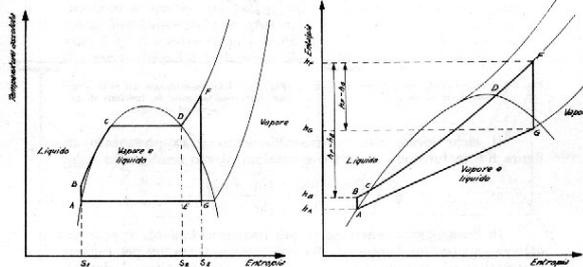
Isocore: salgono più rapidamente delle isobare



Il diagramma permette di determinare la diminuzione di entalpia in una espansione adiabatica (lavoro ottenuto per unità di peso in una turbina a vapore)

7

# Ciclo Rankine



AB: compressione adiabatica

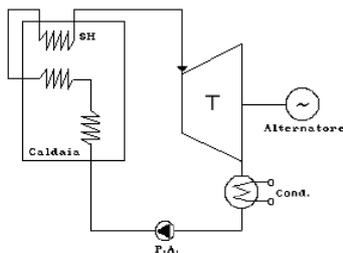
BC: riscaldamento in caldaia (isobara) fino alla T di ebollizione

CD: cambiamento di stato (vaporizzazione)

DE: surriscaldamento del vapore fino alla  $T_{max}$  del ciclo

EG: espansione adiabatica in turbina

GA: condensazione (isobara-isoterma)



8

## Rendimento del ciclo Rankine

- Il rendimento è dato dal rapporto tra il lavoro compiuto e il calore entrante
- $\eta < \eta_{\text{Carnot}}$  perché non tutta la somministrazione di calore avviene a  $T_{\text{max}}$
- Il ciclo aperto dovrebbe scaricare a 1 atm, cioè a  $100^\circ\text{C}$  e abbasserebbe il rendimento

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

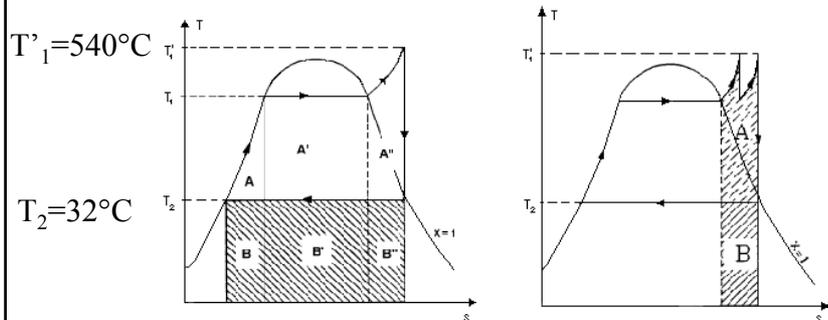
9

## Provvedimenti per migliorare $\eta$

- Aumento di  $T_V$ : bisogna però aumentare la pressione (circa 170 ata), la massima del ciclo, con aumento del consumo delle pompe alimento, e degli spessori
- Diminuzione di  $T_C$ : si mantiene il condensatore sotto vuoto ( $p=0.01-0.045$  ata); la  $T_C$  è imposta dal fluido refrigerante
- Aumento di  $T_{\text{max}}$ :  $T_{\text{max}}$  ha limiti dovuti all'ossidazione a caldo e al *creep*
- Ciclo rigenerativo

10

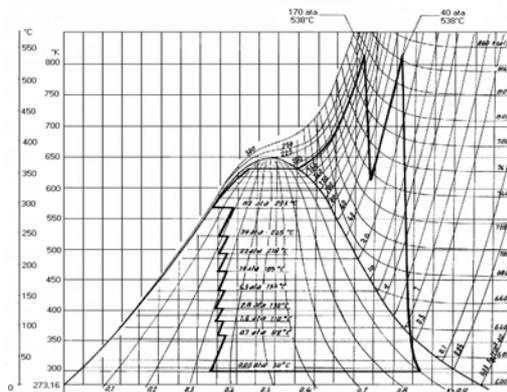
## Surriscaldamento e risurriscaldamento



- Surriscaldamento necessario per avere  $x > 0.9$
- Il rendimento del ciclo surriscaldato è superiore
- Una volta fissata  $T$  e  $p$  di condensazione, per aumentare il rendimento si deve ricorrere al risurriscaldamento
- Questo pure aumenta il rendimento, perché si aggiunge un ciclo a rendimento superiore

11

## Spillamenti e ciclo rigenerativo

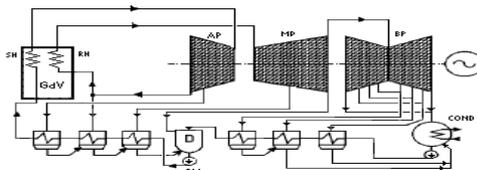


Gli spillamenti evitano il riscaldamento a bassa temperatura: la combustione riscalda acqua già riscaldata all'interno del ciclo, rinunciando a una parte di produzione di lavoro

Il rendimento aumenta del 5-10%

Si riduce la differenza con il ciclo di Carnot: le calorie del vapore spillato non sono perse alla condensazione

Di solito, 7 o 8 spillamenti



12

## Caratteristiche del ciclo rigenerativo non risurriscaldato

- Maggiore portata alla turbina AP: maggiore produzione di vapore (ma meno combustibile, perché si riscalda acqua già riscaldata) e maggiore rendimento della turbina AP (meno parzializzazione)
- Minore portata alla turbina BP (vantaggio per le palette che devono ruotare a 3000 giri/minuto), minori dimensioni
- Nel diagramma di Mollier,  $h_{ai}' < h_s$  perché nel tratto GA ( $h_{ai}'$  è l'entalpia del condensato dello spillamento  $i$ -esimo)
- Si possono adottare cicli supercritici o più risurriscaldamenti, ma ciò complica l'impianto

$$L = (h_v - h_s) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_s)$$

$$Q = (h_v - h_a) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_{ai}')$$

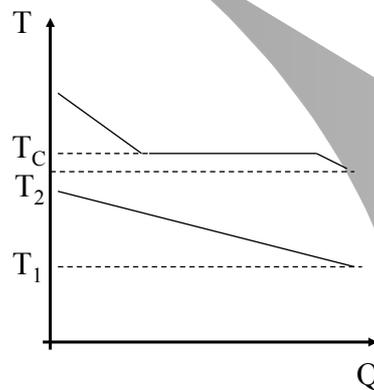
$$\eta = \frac{L}{Q} = \frac{(h_v - h_s) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_s)}{(h_v - h_a) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_{ai}')}$$

$$h_s > h_{ai}'$$

13

## Grado di rigenerazione

- R è l'aumento di T che l'acqua di alimento riceve dagli spillamenti
- La maggior parte del calore ceduto dipende dalla condensazione
- Quindi, R dipende dal primo spillamento, a maggior pressione (quello che porta l'acqua alla massima T)



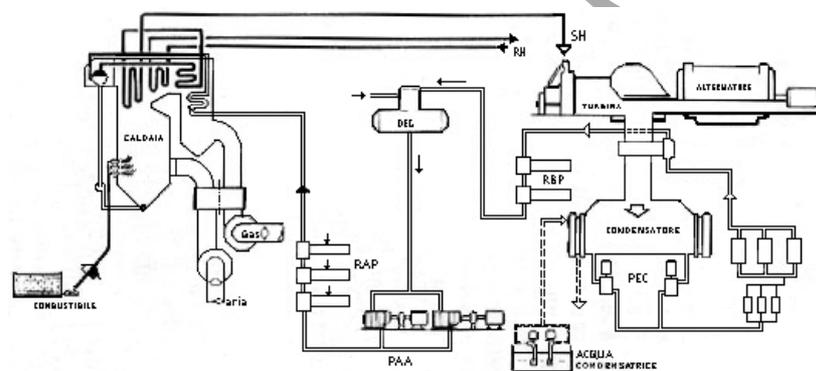
14

## Circuiti principali

- Acqua alimento
- Aria-gas
- Acqua condensatrice

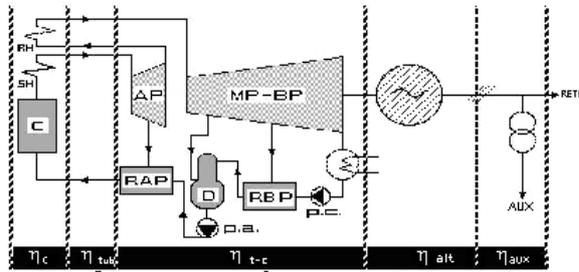
15

## Circuito acqua alimento



16

## Rendimento globale dell'impianto



Rendimento %	CALDAIA	TURBINA-CICLO	ALTERN.	AUX	Potenza netta in rete
parziale	94	45	98	95	
progressivo	94	42,3	41,45	39,38	
MW	770	724	326	320	304

$$P_{\text{nafta}} = 320 / 0.41 = 780 \text{ MW}$$

$$p.c.i. = 9800 \text{ kcal/kg}$$

Ogni ora servono 68.5 t di carburante

Perdite caldaia 39 MW,

Perdite turbina 6 MW

Il bilancio del condensatore è:

$$780 - 320 - 39 - 6 = 415 \text{ MW}$$

Portata di acqua al condensatore:  $Q = q c_p \Delta T$

$$415 \text{ MW} \cdot 860 \text{ kcal/kWh} = q \cdot 1 \text{ kcal/}^\circ\text{C} \cdot 12^\circ\text{C} \text{ da cui } q = 29700 \text{ t/h}$$

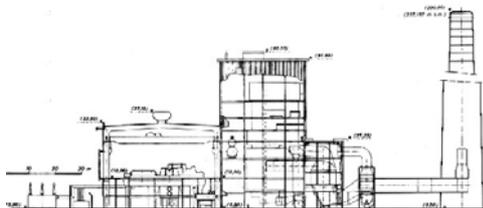
17

## Rendimento di impianto

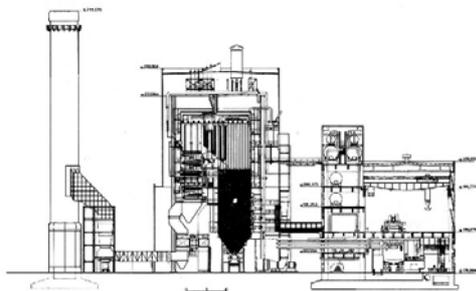
- Le pompe acqua condensatrice devono vincere solo perdite di carico, ma hanno grandi portate:
- $q = 29700 \text{ t/h} = 8.3 \text{ m}^3/\text{s}$  con pressione da vincere  $1 \text{ kg/cm}^2$
- $P = \gamma H q = 8.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot 10000 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \cdot 9.8 \text{ N/kg} = 810 \text{ kW}$
- Portata di vapore allo scarico della turbina:
  - 415 MW da dividere per il calore di condensazione  $r$  a 0.045 ata ( $r = 611 \text{ kcal/kg}$ ) con titolo 0.93:  $r' = 567 \text{ kcal/kg}$
  - $(415/567) \cdot 860 = 630 \text{ t/h}$
  - a causa degli spillamenti, in ingresso allo stadio AP della turbina ci saranno circa 1000 t/h

18

## Schema monoblocco trasversale e longitudinale



Simmetria  
Minore percorso delle  
tubazioni



Larghezza sala macchine  
limitata  
Alleggerimento della  
copertura del fabbricato  
Aumentata lunghezza

19

## Combustibili

- Solidi: carbone
  - Liquidi: oli combustibili (nafta, gasolio – durante l'avviamento)
  - Gassosi: idrocarburi della serie del metano
  - Problematiche:
    - trasporto e stoccaggio del combustibile (oleodotti, metanodotti, navi, autobotti, ferrovia)
    - ubicazione della centrale (vie di comunicazione per le macchine, per i combustibili e presenza di acqua)
    - emissioni e costo per limitarle, gas serra
    - riscaldamento dell'acqua condensatrice
  - Sono caratterizzati dal pci: ottenuto dal pcs diminuendolo del calore di evaporazione dei prodotti della combustione  
$$pci = pcs - (9h+u) 563kcal/kg$$
- I prodotti sono:
- Idrogeno, derivato dalla combustione (h è la percentuale in peso di H<sub>2</sub> nel combustibile, moltiplicata per 9 perché occorrono 9 molecole di H<sub>2</sub> per ottenere lo stesso peso di una molecola di H<sub>2</sub>O) e
  - Acqua già presente nel combustibile (u)

20

# Combustione

- **Principali agenti della combustione: carbonio, idrogeno, zolfo**
  - S dà problemi di corrosione e problemi ambientali (limite di SO<sub>2</sub> emessa)
  - C e H costituiscono gli idrocarburi, a catena aperta o a catena chiusa (aromatici)
    - a catena aperta: sono i migliori, perché la catena è facile da spezzare e non contengono elementi indesiderati
    - aromatici: difficili da bruciare; contengono S, Va e Na, che formano eutettici che fondono a basse temperature
- **Reazioni di combustione:**
  - $C + O_2 = CO_2 + 8.800 \text{ kcal/kg}$
  - $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + 28.000 \text{ kcal/kg}$
  - $S + O_2 = SO_2 + 2.700 \text{ kcal/kg}$
- **Esempio: per bruciare 1 kg di C (12), tenendo conto dei pesi molecolari:**
  - servono  $32/12=2.66 \text{ kg}$  di O<sub>2</sub>
  - sono prodotti  $(12+32)/12=3.66 \text{ kg}$  di CO<sub>2</sub>

21

# Combustione

- **Ossigeno necessario [kg peso] per la combustione di 1 kg di combustibile:**

$$\frac{O_2 [kg]}{32} = \frac{1}{12} \cdot \frac{c}{100} + \frac{1}{4} \cdot \frac{h_2}{100} + \frac{1}{32} \cdot \frac{s}{100}$$

- **Aria teorica (in peso): 1 kg di aria contiene 0.232 kg di ossigeno**

$$A_t = \frac{O_2}{0,232}$$

- **Vale circa 13 kg di aria/kg di combustibile (combustibile con 85% di C, 10% di H<sub>2</sub> e 3% di S, 2% O e azoto)**
- **Aria teorica (in volume):**

$$A_{t-vol} = \frac{A_t}{1,293}$$

22

## Eccesso d'aria

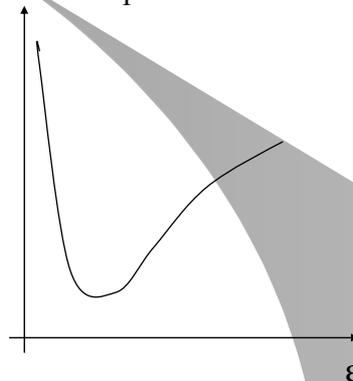
- In condizioni di mancanza d'aria, la combustione può essere incompleta:
  - $C + 1/2 O_2 = CO + 2500 \text{ kcal/kg}$
  - si produce poco calore e ossido di carbonio
- Si rende necessario un eccesso di aria rispetto alla quantità stechiometrica (non troppo perché sono tutte perdite ai fumi e perché si formano  $SO_2$  e  $NO_x$ ), circa 14 kg aria/kg combust.
- $\epsilon = (A_R - A_T) / A_T$
- per valutare  $\epsilon$ , si misura la % in peso dell'ossigeno nei fumi:  
$$\epsilon_O = (O_R - O_T) / \text{Fumi} = 0.232(A_R - A_T) / (A_R + \text{Nafta})$$
da cui:  $\epsilon = \epsilon_O (A_T + N) / A_T (0.232 - \epsilon_O) \approx \epsilon_O / 0.232$
- Tipicamente  $\epsilon_O \approx 1\%$  e  $\epsilon \approx 5\%$

23

## Controllo della combustione

- $\epsilon$  troppo elevato:
  - diminuisce  $\eta$  della caldaia
  - i ventilatori consumano maggiormente
  - si può formare  $SO_3$  invece che  $SO_2$ , che può dar luogo a  $H_2SO_4$ : si deve scaricare i fumi a  $130-140^\circ C$ , perché il punto di rugiada è  $80-100^\circ C$
  - si formano  $NO_x$ , responsabili delle piogge acide
  - aumenta la formazione di  $V_2O_5$
- All'avviamento si tiene alto  $\epsilon$ ; poi lo si fa diminuire finché si forma CO (questo accade a circa il 5%)
- Una diminuzione ulteriore fa impennare la produzione di CO

consumo specifico



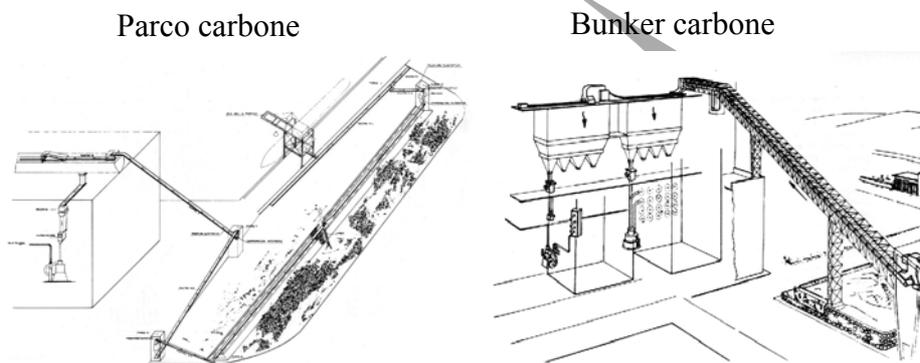
24

## Combustibili solidi

- Appartengono alla categoria dei litantrace
- Caratteristiche:
  - pci (7000-8000 kcal/kg)
  - pezzatura
  - tenore di umidità (4-5%) e di ceneri (2-25%)
  - natura delle ceneri (punto di fusione  $>1200^{\circ}\text{C}$ , si inietta magnesio)
  - tenore di sostanze volatili (10-50%)
- Stoccaggio:
  - parco all'aria aperta (pericolo di autocombustione)
    - segnalatori di temperatura
    - altezza limitata
    - strati successivi

25

## Stoccaggio del carbone



Percorso del carbone: parco carbone, bunker, mulini

Il carbone arriva ai mulini mediante un sistema di nastri; la portata varia in funzione della velocità dei nastri

26



## Combustibili liquidi

- Derivano dalla distillazione del petrolio greggio e contengono, mediamente:
  - 84% carbonio
  - 12% idrogeno
  - 2% ossigeno
- L'olio combustibile è classificato in:
  - ATZ: alto tenore di zolfo (>2.3%)
  - MTZ: medio tenore di zolfo (1.3-2.3%)
  - BTZ: basso tenore di zolfo (0.5-1.3%)
  - STZ: senza tenore di zolfo (<0.5%)
- pci: 9600-9800 kcal/kg

29

## Caratteristiche degli oli combustibili

- Densità: deve essere <1, minore dell'acqua
- Viscosità: caratteristica importante per ottenere una buona atomizzazione della nafta. Si misura in °E, valutando il tempo che la nafta a 50°C impiega a uscire da un orifizio, in rapporto al tempo impiegato dall'acqua. Deve essere a circa 50 °E in condizioni normali, a 2°E ai bruciatori: bisogna che sia preriscaldata a 140°C.
- potere calorifico
- infiammabilità: temperatura a cui con l'aria si formano miscele incendiarie: problemi di sicurezza
- punto di scorrimento: temperatura minima a cui il combustibile può scorrere per effetto del proprio peso

30

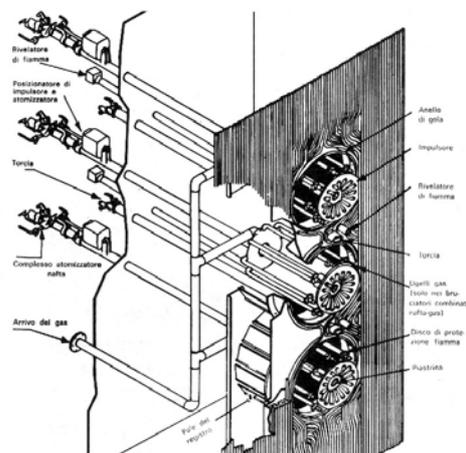
## Approvvigionamento e serbatoi

- Approvvigionamento: navi, autobotti, treno, oleodotti
- Serbatoi: con capacità tra 50 e 100 mila m<sup>3</sup>
  - tetto fisso (fino a 20 mila m<sup>3</sup>) o galleggiante
  - riscaldamento del fondo (per mantenere circa 40°C)
  - riscaldamento della zona di prelievo (+20°C)
  - impianto antincendio a acqua o a schiuma
- Percorso nafta:
  - filtri a freddo per le impurità più grosse
  - pompe
  - riscaldatori nafta (120-140°C)
  - filtri a caldo
  - montante nafta: atomizzazione, miscelazione con l'aria comburente e alimentazione dei bruciatori

31

## Bruciatori frontali per olio e gas

I bruciatori possono essere frontali o tangenziali  
Il fluido ausiliario di solito è aria in pressione a vapore saturo secco o leggermente surriscaldato



32

## Gasolio

- Richiede apparecchiature più semplici rispetto alla nafta
- Ridotta viscosità (1.16°E) e bassa temperatura di infiammabilità (50°C): adatto all'accensione della caldaia
- Non c'è bisogno di preriscaldamento e atomizzazione
- Assicura una combustione più completa e produce meno anidride solforosa
- Costa di più della nafta

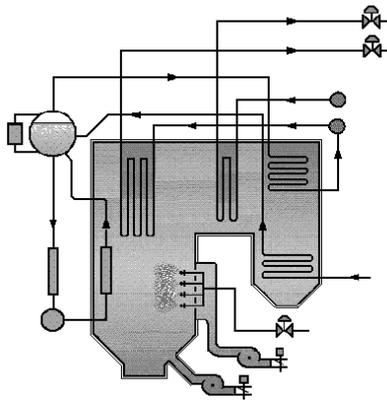
33

## Combustibili gassosi

- Si utilizzano i gas naturali, miscela di idrocarburi (metano, etano e altri), azoto, CO<sub>2</sub>
- Composizione media:
  - metano 96.4%
  - etano 3%
  - azoto 0.6%
- P.c.i.: 8072 kcal/Nm<sup>3</sup>
- La fornitura avviene mediante gasdotto; il gas arriva in pressione e deve essere decompresso
- Non si può accumulare il gas: i programmi di produzione devono essere molto precisi
- L'iniezione avviene mediante anelli con fori, immerso nel flusso di aria comburente

34

## Generatori di vapore (caldaia)



- Sostenuta dall'alto per le dilatazioni termiche
- Per quanto riguarda il circuito dell'aria comburente, possono essere:
  - a tiraggio naturale
  - meccanico pressurizzato
  - bilanciato
  - aspirato
- Possono essere inoltre:
  - a tubi di fumo
  - a tubi di acqua

35

## Caratteristiche di una caldaia

- Potenzialità: portata di vapore prodotta [t/h]
- Pressione di esercizio: pressione nominale di funzionamento
- Pressione del vapore prodotto:
  - caldaie subcritiche
  - caldaie ipercritiche
- Temperatura di esercizio: temperatura del vapore in uscita dalla caldaia
- Rendimento di caldaia

36

## Rendimento di caldaia (a surriscaldamento e risurriscaldamento)

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$Q_1 = G_c \cdot p_c$$

$$Q_2 = G_{SH} (h_{SH} - h_a) + G_{RH} (h_{RHc} - h_{RHf})$$

$G_{SH}$  = portata vapore surriscaldato = portata acqua alimento  
 $G_{RH}$  = portata vapore risurriscaldato  
 $h_{SH}$  = entalpia vapore surriscaldato  
 $h_a$  = entalpia acqua alimento ingresso economizzatore  
 $h_{RHc}$  = entalpia vapore risurriscaldato caldo (uscita risurriscaldatore)  
 $h_{RHf}$  = entalpia vapore risurriscaldato freddo (entrata risurriscaldatore)

Misura del rendimento: a causa della difficoltà di misura delle portate, si utilizza il metodo indiretto:

$$\eta = 100\% - \Sigma \text{perdite}(\%)$$

- perdita di calore nei fumi secchi,
- perdita di calore per acqua nel combustibile,
- perdita di calore per umidità nell'aria comburente,
- perdita di calore per vapore d'acqua prodotto dalla combustione dell'idrogeno contenuto nel combustibile,
- perdita di calore per incombusti nei fumi,
- perdita di calore per irraggiamento verso l'esterno.

Tipicamente,  $\eta=95\%$

37

## Determinazione delle perdite

- Calcolo della potenza termica  $W$  che non viene trasferita al vapore (bilancio termico per aria-fumi):

$$q_A T_A c_{pA} + q_N T_N c_{pN} + q_N p c_i = q_v (h_v - h_i) + q_F T_F c_{pF}$$

$$W = q_N p c_i - q_v (h_v - h_i) = q_F T_F c_{pF} - [q_A T_A c_{pA} + q_N T_N c_{pN}]$$

dove:

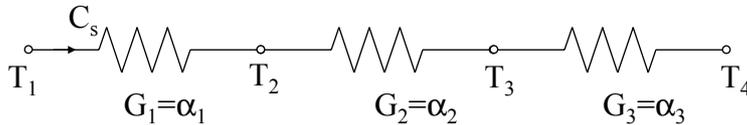
$q_A$ : aria teorica + eccesso d'aria  
 $q_N$ : portata di nafta (combustibile)  
 $q_F = q_A + q_N$   
 $q_v$ : portata del vapore

- Attenzione:  $q_F$  e  $q_A$  devono tener conto anche dei trafiletti di aria nei preriscaldatori di aria
- I calori specifici variano con la temperatura

38

## Trasmissione del calore

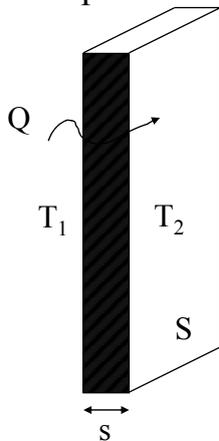
- La trasmissione del calore avviene per:
  - conduzione
  - convezione
  - irraggiamento
- E' importante il carico termico specifico  $C_s$  per unità di superficie: è una potenza trasferita
- Nelle caldaie è importante soprattutto l'irraggiamento
- Analogia elettrica (solo caso lineare, praticamente solo conduzione)



39

## Conduzione

- Conduzione attraverso una superficie piana  $S$  di spessore  $s$ :



$$C_s = \frac{Q}{S} = \alpha \Delta T = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]$$

- $\lambda$  (conducibilità termica) [kcal/mh°C] dipende dalla  $T$ : nei metalli diminuisce con  $T$ ; negli isolanti aumenta.
- Se  $\lambda$  è costante, l'andamento di  $C_s$  in funzione della  $T$  è lineare
- $S$  è la superficie di scambio
- Per tubi con diametro interno  $d_i$  e diametro esterno  $d_e$ :

$$C_s = \alpha \Delta T = \frac{2\lambda}{d_e \log d_e / d_i} (T_e - T_i) \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]$$

# Convezione

- Trasferimento di calore tra un solido e un fluido mediante il movimento di un fluido
  - naturale: il movimento è dovuto alla differenza di densità causato dalle differenze di T
  - forzata: mediante pompe, ventilatori, ecc.

$$C_s = \alpha \Delta T = h(T_1 - T_2) \left[ \frac{kcal}{m^2 h} \right]$$

- Convezione naturale:  $h=c(\Delta T)^{1/3}$  con  $c=1.1$  per parete piana (l'andamento rispetto a T non è più lineare)
- Convezione forzata: h dipende dal tipo di moto con coefficienti funzione della portata massica, temperature dei fluidi, calori specifici, ecc.; il moto può essere:
  - laminare ( $Re < 2000$ )
  - turbolento ( $Re > 12000$ )

41

# Irraggiamento

- La potenza termica trasmessa per irraggiamento è data da:

$$C_s = c(T_1^4 - T_2^4) \left[ \frac{kcal}{m^2 h} \right]$$

- Il coefficiente c è di difficile determinazione
- A 1000°C la trasmissione dipende praticamente solo dalla convezione; a 1100°C invece dipende solo dall'irraggiamento
- Nelle caldaie, il corpo caldo è costituito dai gas in combustione: le scorie nere non danno fastidio, quelle bianche invece ostacolano

42

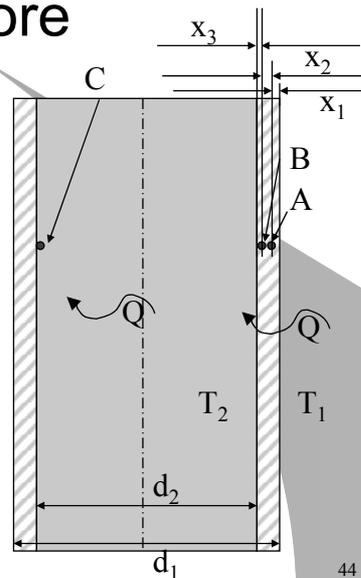
## Scambio fumi-acqua

- $Q = \alpha_t S \Delta T$ , dove  $\alpha_t$  dipende (come più conduttanze, non costanti, in serie) da:
  - $\alpha_1$  scambio fumi-tubo (irraggiamento, non lineare)
  - $\alpha_2$  conduzione nello spessore del tubo (conduzione, lineare)
  - $\alpha_3$  scambio tubo acqua (vapore) (convezione, non lineare)
- $\alpha_1$ : questa legge è valida solo in assenza di irraggiamento (linearità con T); nella realtà la trasmissione del calore dipende dall'irraggiamento
- $\alpha_2 = \lambda/s$ : conducibilità termica e spessore
- $\alpha_3$  è molto elevato se in presenza di passaggio di stato ( $10000 \text{ kcal}/^\circ\text{Chm}^2$ ), altrimenti è più basso e dipende dalla velocità del fluido

43

## Tubo bollitore

- Tre termocoppie A, B, C, a distanza  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$
- $d_1 = 23.8 \text{ mm}$      $d_2 = 12.7 \text{ mm}$
- $x_1 = 1.5 \text{ mm}$ ,  $x_2 = 2.68 \text{ mm}$ ,  
 $x_3 = 1.37 \text{ mm}$
- $T_A = 396.1^\circ\text{C}$ ,  $T_B = 379^\circ\text{C}$ ,  
 $T_C = 358.1^\circ\text{C}$
- $\lambda = 35 \text{ [kcal/hm}^\circ\text{C]}$  a  $380^\circ\text{C}$
- Si calcoli  $C_s$  e il coefficiente di scambio fra acqua e tubo



44

## Esempio numerico

- $d_A = d_2 + 2x_2 + 2x_3 = 20.8 \text{ mm}$
- $d_B = d_2 + 2x_3 = 15.44 \text{ mm}$
- $d_M = (d_1 + d_2) / 2 = 18.25 \text{ mm}$
- $C_{sAB} = 2\lambda (T_A - T_B) / (d_A \log(d_A / d_B))$  (da A verso B)
- $C_{sA1} = 2\lambda (T_A - T_1) / (d_A \log(d_A / d_1))$  (ad A da 1)
- dal rapporto si ricava  $(T_A - T_1) / (T_A - T_B)$ , da cui  $T_1 = 403.8^\circ\text{C}$
- Analogamente, operando su  $T_2$ , si ricava  $T_2 = 367.8^\circ\text{C}$ ;  
 $T_m = 388.6^\circ\text{C}$
- $C_s = 316173 \text{ kcal/hm}^2$  attraverso la superficie interna
- $h = C_s / (T_2 - T_C) = 32575 \text{ kcal/}^\circ\text{Chm}^2$
- $C_s$  può arrivare a  $500000 \text{ kcal/hm}^2$ ,  $h$  è spinto, tant'è che le superfici sono alettate, per migliorare lo scambio termico
- $T_m$  aumenta all'aumentare dello spessore, del carico specifico e al diminuire di  $\lambda$  e  $\alpha_3$ .

45

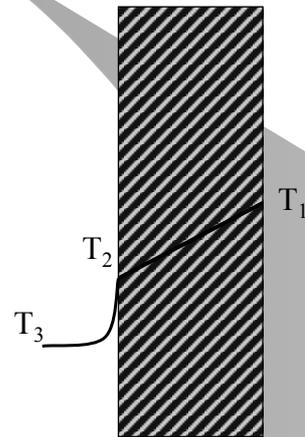
## Effetti delle incrostazioni

- I limiti fisici sono dovuti a
  - ossidazione a caldo
    - c'è una temperatura limite ( $560-600^\circ\text{C}$ ) oltre la quale si formano ossidi che corrodono (perdita di materiale del tubo); è critico il valore di  $T_1$  perché all'aumentare del carico,  $T_C$  non cambia,  $T_1$  aumenta
  - *Creep* (caratteristica sforzi-deformazioni): dipende da  $T_m$ .
  - crisi dell'ebollizione: essa passa da nucleata a filmata,  $h$  aumenta, il tubo va in crisi. Dipende unicamente da  $C_s$
- Le incrostazioni più frequenti sono date dal  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (magnetite) all'interno dei tubi: una parte di queste è utile, perché impedisce la corrosione; se lo spessore è eccessivo, o non omogeneo, impedisce la trasmissione del calore, e causa l'aumento di  $T_1$
- Si usa una miscela di acidi per pulire i tubi (ogni tre anni)

46

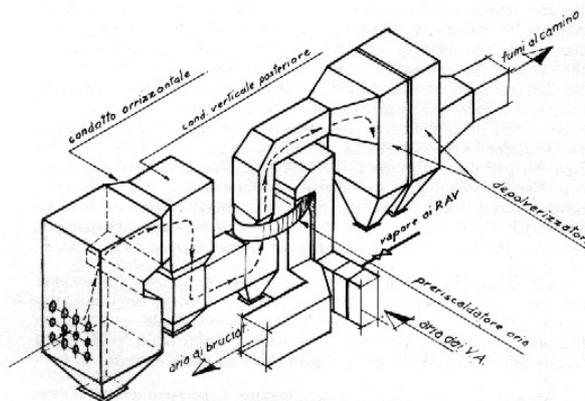
## Isolamento della caldaia

- Caldaia da isolare in lana di roccia ( $\lambda=0.1$  kcal/hm°C)
- $T_1=300^\circ\text{C}$
- $T_3=30^\circ\text{C}$  (aria esterna)
- Calcolare
  - lo spessore per limitare  $C_s=100$  kcal/hm<sup>2</sup>
  - $T_2$
- $C_{s \text{ conduz.}} = \lambda/s(T_1-T_2)$
- $C_{s \text{ convez.}} = h(T_2-T_3) = c(T_2-T_3)^{1/3} (T_2-T_3) = 1.1 (T_2-T_3)^{4/3}$
- $100 = 1.1 (T_2-T_3)^{4/3} \rightarrow T_2 = 59^\circ\text{C}$
- $100 = 0.1(300-59)/s \rightarrow s = 24 \text{ cm}$



47

## Circuito aria-gas



48

## Circuito aria-gas

- Ventilatori aria (VA): inviano in caldaia l'aria comburente. Sono regolati variando l'inclinazione delle palette oppure variando la velocità di rotazione
- Preriscaldatori aria-vapore: riscaldano l'aria comburente utilizzando il vapore
- Preriscaldatori aria-fumi Ljungström: riscaldano l'aria comburente utilizzando i fumi in uscita dalla caldaia
- Casse aria dei bruciatori: possono dividere l'aria in aria primaria (immessa intorno alla fiamma) e secondaria (tra un piano e l'altro di bruciatori)
- Camera di combustione
- Depolverizzatori e precipitatori elettrostatici
- Camino

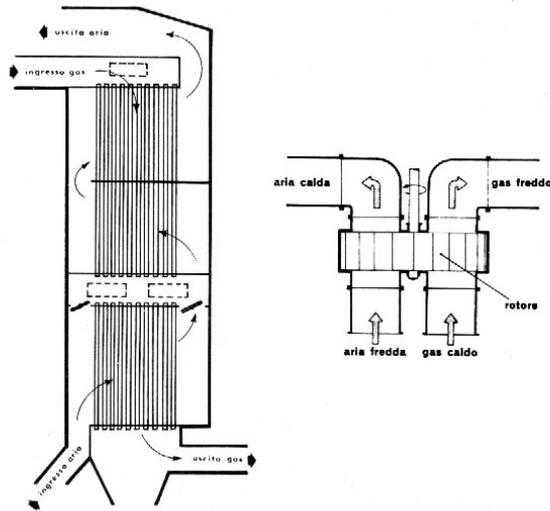
49

## Preriscaldatori d'aria (PAF)

- Il preriscaldamento dell'aria a spese del contenuto energetico dei fumi
  - migliora la combustione
  - diminuisce gli incombusti
  - aumenta il carico termico specifico della caldaia
  - rende possibile l'utilizzo di combustibili meno pregiati
- Ci sono due tipologie:
  - recuperativi: scambio con piastre o tubi
  - rigenerativi: scambio mediante un rotore

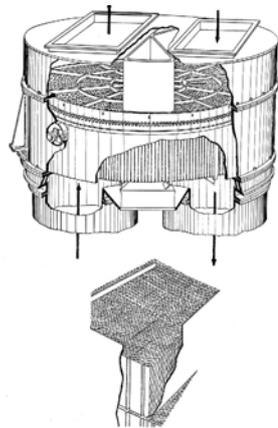
50

## Preriscaldatori d'aria ricuperativi                      rigenerativi



51

## Riscaldatore d'aria Ljungström



- Esso è formato da un tamburo che ruota lentamente (2-3 giri/min), costituito da lamierini ondulati che attraversano ora i gas, ora l'aria
- Problemi: nella parte di entrata aria e uscita fumi dei PAF si può formare condensa acida.
- Allora si utilizza un riscaldatore aria-vapore (RAV) in fasi particolari, come l'avviamento

52

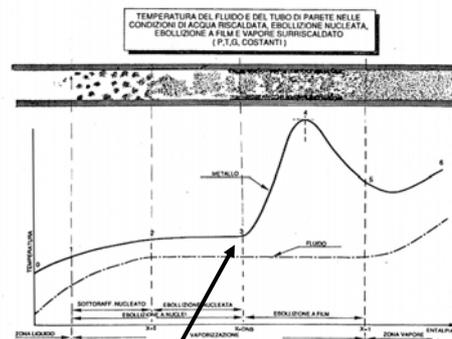
## Camera di combustione

- E' la parte di caldaia dove si miscela l'aria comburente con il combustibile, e dove avviene la combustione
- Avviene lo scambio di calore con i tubi bollitori (verticali) mediante irraggiamento:
- Si individuano tre zone, nei tubi bollitori:
  - fase liquida
  - fase liquida e vapore, dove avviene la vaporizzazione
  - fase vapore

53

## Vaporizzazione nella zona bifase

- Ebollizione nucleata: le bolle si muovono in modo turbolento verso l'interno, dove cedono il calore latente e condensano: la T del tubo è di poco superiore a quella del fluido
- Ebollizione filmata: le bolle si uniscono e formano un film all'interno del tubo, diminuendo il coefficiente di scambio termico: la T del tubo può assumere valori pericolosi
- In seguito, aumenta il titolo di vapore e anche la velocità del fluido e la situazione migliora



Departure from Nucleate Boiling (DNB)

54

## Controllo del DNB

- Aumentando il flusso termico, il DNB viene raggiunto a titoli di vapore inferiori
- Nella zona critica, si adottano materiali più resistenti e tubazioni elicoidali



55

## Percorso dei fumi

- Percorrono tutta la camera a combustione, dove lo scambio avviene per irraggiamento
- Sperano il “naso”, al di là del quale lo scambio avviene solo per convezione
  - surriscaldatore AT a convezione
  - risurriscaldatore
  - surriscaldatore BT
  - economizzatore
  - preriscaldatori di aria
- Depolverizzatori e/o precipitatori elettrostatici
- Ciminiera

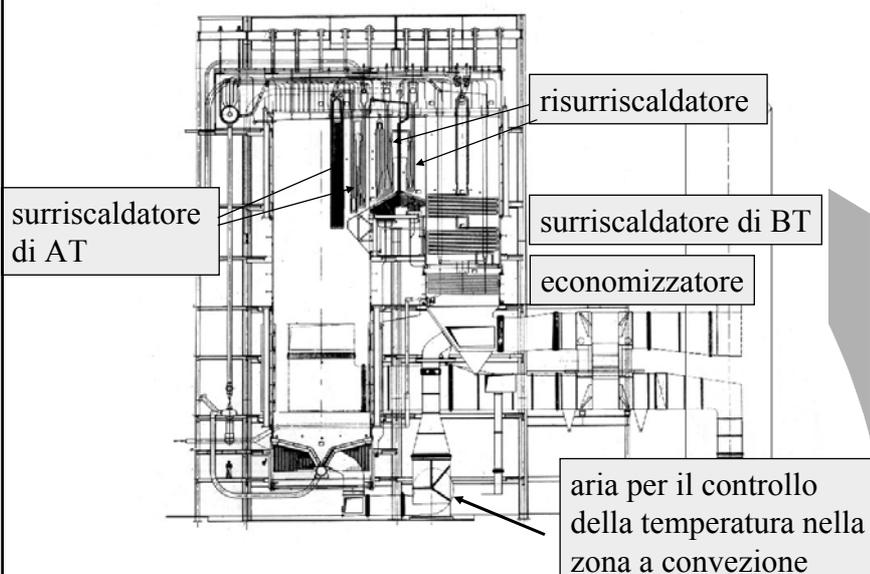
56

## Ricircolazione dei gas

- Per controllare le temperature, il gas viene prelevato a valle dell'economizzatore e reintrodotta:
  - nella parte inferiore:
    - diminuisce la T dei gas e diminuisce lo scambio termico gas - tubi per irraggiamento dei tubi di parete;
    - aumenta lo scambio della zona a convezione – surriscaldatori e risurriscaldatori, ECO
  - nella parte superiore (gas tempering)
    - per controllare, in particolare diminuire, le temperatura dei surriscaldatori

57

### Caldaia C. E. a circolazione controllata da 1050 t/h



58

## Problematiche di corrosione in caldaia

- Corrosione a alta temperatura in caldaia:
  - le ceneri di Va e Na fondono a circa 500°C depositandosi sui serpentini
  - il punto di fusione viene aumentato iniettando MgO, che si mischia a sali di Na e Va, dando luogo a scorie facilmente asportabili
  - questa operazione consente di diminuire l'indisponibilità

59

## Tipologie di caldaia

- Caldaie in depressione o a tiraggio bilanciato: l'azione di due aspiratori gas posti a valle dei preriscaldatori d'aria prevale su quella dei due ventilatori aria
- Caldaie pressurizzate: i due ventilatori aria mantengono una leggera sovrappressione (0.5 ata), fino alla ciminiera
  - costa meno (due ventilatori invece di quattro)
  - i ventilatori prementi consumano meno perché il fluido freddo ha densità maggiore (aumento di rendimento dell'1%); inoltre, nelle caldaie in depressione, i ventilatori aspiranti avrebbero problemi di corrosione perché nella zona più fredda dei gas
  - soppressione delle rientrate d'aria in caldaia
  - semplice regolazione dell'aria comburente
  - la caldaia deve essere stagna e così i condotti gas
  - servono altri ventilatori per la tenuta del cielo di caldaia, e per l'aria di raffreddamento e tenuta dei rilevatori di fiamma
  - tutte le aperture devono essere provviste di iniezioni di aria compressa per garantire contro la fuoriuscita di gas a alta temperatura

60

## Ciminiera

- Assicura la dispersione dei fumi a una distanza funzione dell'altezza
- Sono alte anche più di 200 m
- Sono costituite da camini con canna esterna portante in calcestruzzo armato e canne multiple interne in acciaio o in mattoni refrattari antiacidi
- La temperatura dei fumi non può scendere troppo:
  - non si disperderebbero
  - si potrebbe produrre condensa acida:
    - Una parte di S dà luogo alla reazione  $2S+3O_2 \rightarrow 2SO_3$ , fino al 2% favorita dal Na e Va che fungono da catalizzatori e dall'eccesso d'aria
    - In ambiente ricco d'acqua, come i fumi (10%), si forma acido solforico, che è corrosivo solo in fase liquida: non deve condensare sui serpentini o sui preriscaldatori
    - T di condensazione è circa 130°C: i fumi dovrebbero uscire a 170-180°C, ma iniettando MgO si riduce la T a 150°C, migliorando  $\eta$

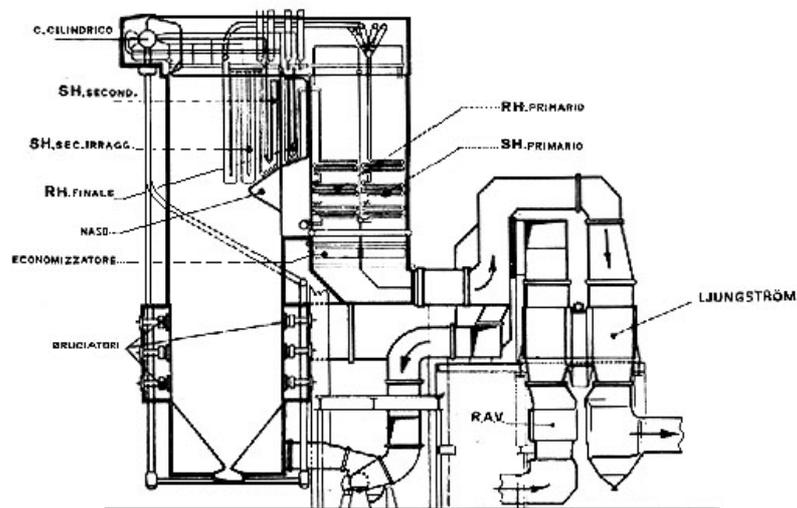
61

## Circuito acqua-vapore

- Pompe alimento
- Economizzatore (all'ingresso circa 290°C)
- Vaporizzatore, in camera di combustione
- Corpo cilindrico
- Surriscaldatore, primario (AT) e secondario (BT)
- Parziale espansione in turbina
- Risurriscaldatore
- Espansione in turbina

62

## Circuito acqua-vapore



63

## Economizzatore

- All'ingresso dell'ECO, l'acqua ha  $T=290^{\circ}\text{C}$
- Tubi a serpentino in banchi orizzontali al termine del percorso fumi
- I fumi sono a circa  $400^{\circ}\text{C}$ , e circa tale è la T dell'acqua in uscita
- La sua importanza aumenta quanto più elevate sono le pressioni di vaporizzazione:
  - aumenta la T di vaporizzazione e quindi bisogna cedere più calore alla fase liquida
  - il calore richiesto per la fase di vaporizzazione diminuisce (al limite, non c'è passaggio nel regime bifase, nelle ipercritiche)
  - i fumi scaricati sono a T maggiore

64

## Tubi vaporizzatori

- E' in camera di combustione, dove le T sono massime e così lo scambio termico
- I tubi, in genere verticali, sono a T più prossime a quelle dell'acqua che a quelle dei fumi
- Nel circuito di vaporizzazione si assorbe il 50% del calore sviluppato in camera di combustione, e da esso dipende la T dei fumi
- E' costituito anche da collettori e corpi cilindrici (superiori e inferiori) che servono per separare la fase liquida dal vapore

65

## Surriscaldatore

- Serve per aumentare il salto entalpico a disposizione della turbina
- Il surriscaldatore primario (BT) è posto sopra l'economizzatore: serpentini orizzontali, con riscaldamento controcorrente per avere il massimo scambio termico
- Segue il desurriscaldatore: si può iniettare nel vapore acqua di alimento per raffreddarlo e controllare la temperatura: è una perdita di rendimento
- Il surriscaldatore secondario (AT) è posto sopra il naso; è costituito da una parte a irraggiamento e una parte a convezione: serpentini verticali sospesi, con riscaldamento equicorrente, per salvaguardare i tubi da T troppo elevate

66

## Risurriscaldatore

- Costituito da banchi di serpentine nel condotto verticale discendente dei gas o nel tratto orizzontale
- La regolazione della temperatura di risurriscaldamento viene effettuata variando l'inclinazione dei bruciatori: abbassandoli, si aumenta l'importanza dell'irraggiamento e viceversa si aumenta la T di surriscaldamento

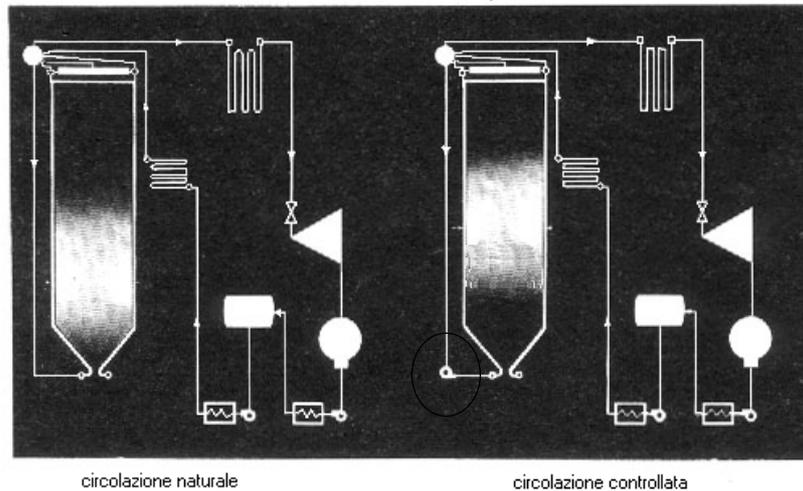
67

## Circolazione acqua in caldaia

- E' importante che l'acqua-vapore circoli bene nei tubi, per garantire un elevato coefficiente di scambio termico e il regime di temperature accettabili per i tubi
  - a circolazione naturale
  - a circolazione controllata o assistita
  - a circolazione forzata
  - a circolazione combinata

68

## Caldaie a circolazione naturale e controllata



69

## Caldaia a circolazione naturale

- Il riscaldamento dell'acqua fa diminuire il peso specifico e la fa salire verso il corpo cilindrico
  - da qui il vapore viene prelevato e l'acqua scende nuovamente verso i tubi bollitori
- Rapporto di circolazione  $R$ : portata in peso dell'acqua che circola/portata in peso del vapore
  - indica il numero di giri nei tubi bollitori che la particella d'acqua deve compiere per essere vaporizzata
  - è il reciproco del titolo di vapore all'uscita dei tubi bollitori
  - i costruttori danno delle soglie inferiori, ad esempio a 100 ata,  $R=8$
- Nel corpo cilindrico, il vapore viene reso saturo secco mediante separazione centrifuga delle goccioline di acqua ancora presenti

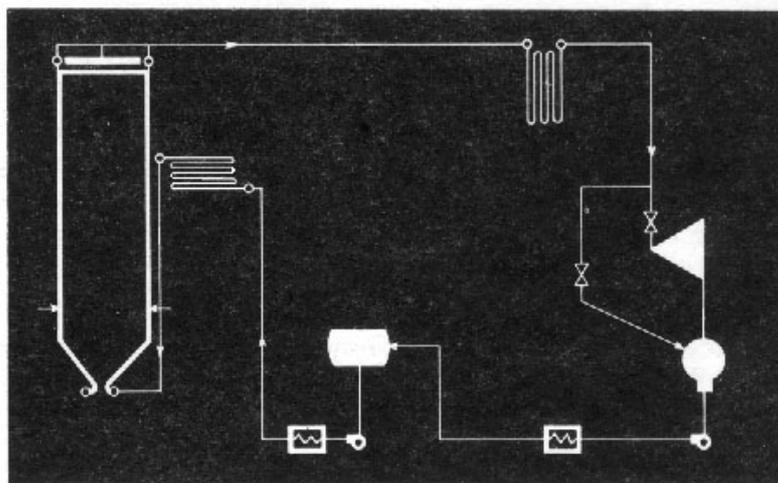
70

## Caldaie a circolazione controllata

- Le caldaie funzionanti a pressioni alte, per garantire basse perdite di carico dovrebbero avere tubi bollitori con sezioni elevate
- Si mantengono le sezioni inferiori e si accettano le perdite di carico che sono compensate aiutando la circolazione con Pompe Circolazione Caldaia (PCC) sui tubi di caduta dal corpo cilindrico
- La prevalenza di progetto è quella necessaria a integrare la circolazione naturale
- Con la circolazione assistita si può adottare  $R=4$
- Vantaggi:
  - si può ammettere una caduta di pressione nel circuito, vinta dalla pompa, quindi si può risparmiare nel dimensionamento dei tubi, che possono avere minori spessori
  - la circolazione è indipendente dalla combustione, e quindi è buona anche durante l'avviamento

71

## Caldaia a circolazione forzata



circolazione forzata

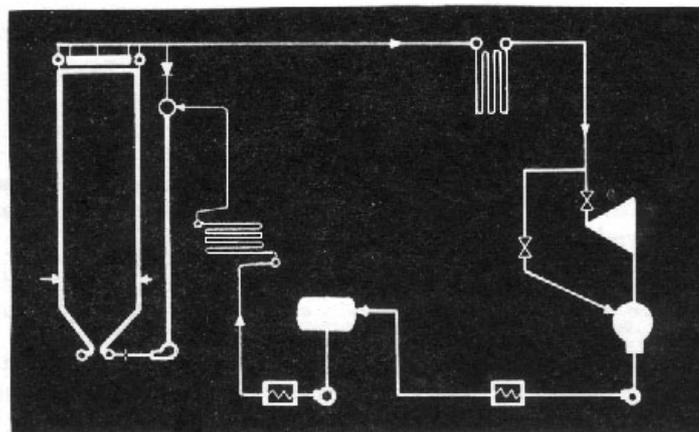
72

## Caldaia a circolazione forzata

- Non c'è il corpo cilindrico: il fluido percorre una sola volta il circuito vaporizzatore
- La circolazione è assicurata dalle pompe alimento, opportunamente dimensionate
- Il punto in cui avviene la vaporizzazione cambia al variare del carico termico e della portata del fluido ed è tanto prima quanto più basso è il carico
- Perciò non è possibile garantire una efficace circolazione alle basse portate (limite del 33%)
- Sotto tale limite, interviene un circuito di avviamento, che fa circolare più vapore del necessario e sfiora la portata di vapore eccedente il bisogno
- Il circuito di avviamento serve anche per far circolare preliminarmente acqua durante l'accensione caldaia
- E' vantaggiosa per elevate temperature e pressioni, sempre perché consente di mantenere tubi di piccola sezione e di ammettere perdite di carico significative

73

## Caldaia a circolazione combinata



circolazione combinata

74

## Caldaia a circolazione combinata

- Garantire i vantaggi della circolazione forzata per alte pressioni e temperature senza il vincolo della portata minima: è l'incrocio della caldaia forzata con quella controllata
- C'è una PCC, tra l'economizzatore e il vaporizzatore, che aspira da una sfera di miscelazione di piccola capacità posta al termine dei tubi vaporizzatori e a essi collegata mediante una valvola di non ritorno
- La valvola consente il passaggio soltanto alle basse portate (circolazione controllata); quando la portata supera il 60-70%, essa si chiude e praticamente il sistema diventa a circolazione forzata
- E' ancora richiesto un circuito di avviamento, ma di dimensioni decisamente inferiori (10%)

75

## Grandezze caratteristiche di un generatore di vapore

- produzione nominale di vapore (t/h)
- pressione e temperatura del vapore nei vari stadi
- temperatura dell'acqua alimento all'ingresso economizzatore
- combustibile
- dimensioni

76

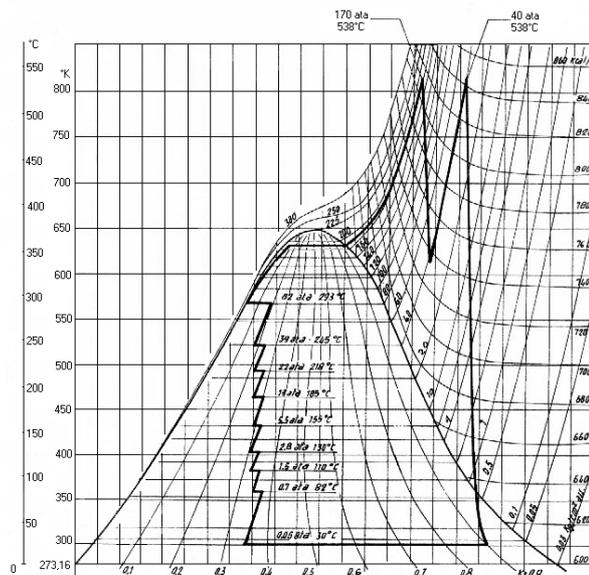
## Generatore di vapore: portata

$$G_v = \frac{860 \cdot (P + P_a)}{\eta_m \eta_a \left[ h_{SH} - h_s + h_{RHc} - h_{RHf} - \sum g_i (h_i - h_s) \right]}$$

- P è la potenza resa dal turboalternatore,
- P<sub>a</sub> è la potenza assorbita dagli ausiliari,
- η<sub>m</sub> è il rendimento meccanico della turbina,
- η<sub>a</sub> è il rendimento dell'alternatore,
- h<sub>SH</sub> è l'entalpia del vapore surriscaldato all'ingresso in turbina,
- h<sub>i</sub> è l'entalpia dello spillamento i-esimo,
- h<sub>RHc</sub> è l'entalpia del vapore risurriscaldato caldo,
- h<sub>RHf</sub> è l'entalpia del vapore risurriscaldato freddo,
- h<sub>s</sub> è l'entalpia del vapore allo scarico di turbina (ingresso al condensatore),
- g<sub>i</sub> è la portata di vapore, in valore relativo rispetto a G<sub>v</sub>, dello spillamento i-esimo.

77

## Bilancio termico



78

## Superficie di un generatore di vapore

- La **superficie S del vaporizzatore**, interamente irraggiato, si ricava dalla formula:

$$Q = (h_v - h_e)G_v = kS \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 \right]$$

- dove
  - $h_v$  è l'entalpia del vapore saturo,
  - $h_e$  è quella dell'acqua all'uscita dell'economizzatore,
  - $T_f$  è la temperatura assoluta dei fumi e
  - $T_p$  è la temperatura assoluta media di parete.
- Con gli usuali valori,  $Q/S$ , *carico termico specifico*, vale circa 200000 kcal/ m<sup>2</sup>.

$$S = \frac{(h_v - h_e)G_v}{200.000}$$

79

## Surriscaldatore e economizzatore

Ipotizzando che il calore totale di surriscaldamento  $G_v(h_{SHAT}-h_v)$  si ripartisca in parti uguali tra AT e BT, la superficie del surriscaldatore di AT si ricava, come per l'evaporatore, dalla:

$$S' = \frac{1}{2} G_v \frac{(h_{SHAT} - h_v)}{200.000} = \frac{(h_{SHAT} - h_{SHBT})G_v}{200.000}$$

La superficie del surriscaldatore di BT si ricava dalla formula:

$$S'' = \frac{(h_{SHBT} - h_v)G_v}{\alpha_t \Delta t_m}$$

dove  $\alpha_t$  è il coefficiente di trasmissione del calore fumi-tubo-fluido (circa 60 kcal/m<sup>2</sup>h°C) e  $\Delta t_m$  è la differenza media di temperatura tra fumi e fluido

La superficie dell'economizzatore si ricava in modo analogo ( $\alpha_{ECO} \cong 30$  kcal/m<sup>2</sup>h°C):

$$S''' = \frac{(h_e - h_a)G_v}{\alpha_{ECO} \Delta t_m}$$

Con lo stesso metodo si calcola la superficie del risurriscaldatore

80

## Isolamento termico di un generatore di vapore

- **lana di roccia**
  - composta di fibre di roccia silicea, alluminosa, vulcanica,
  - resistente agli acidi non concentrati,
  - impiegata fino a 700°C.
- **lana di vetro**
  - composta di fibre ricavate da masse vetrose, ottenute mediante fusione e fibraggio,
  - resistente agli acidi non concentrati,
  - impiegata fino a 500°C.
- **cemento isolante plastico AT**
  - composto da una miscela di fiocchi di lana minerale granulata con diatomite,
  - impiegato fino a 650°C.
- **cemento isolante plastico BT**
  - composto da una miscela di carbonato di magnesio e fibre isolanti,
  - impiegato fino a 350°C.
- **vetro cellulare**
  - ottenuto per espansione di vetro fuso e raffreddato in particolari condizioni,
  - resistente agli acidi,
  - impiegato fino a 430°C

