

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

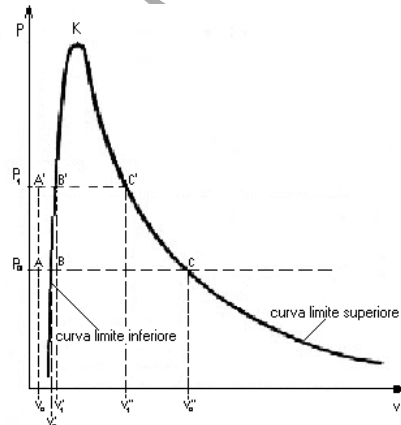
Punti B: acqua

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 m³/kg, 2207 N/cm²)



3

Diagrammi p, V per l'acqua

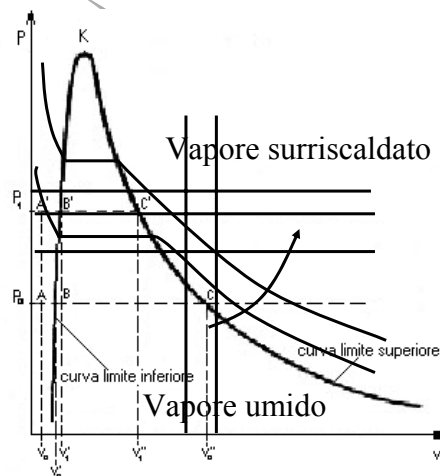
Isobare: rette orizzontali

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/m²)
- Tuttavia si utilizzano ancora le seguenti:
 - 1 ata = 1 kg_p/cm² = 9.81 N/cm² 10000 cm²/m² = 98 000 Pa
 - 1 bar = 10⁵ Pa
 - 1 atm = 101 325 Pa
 - 1 mmHg = 133,32 Pa

5

Diagrammi T,S

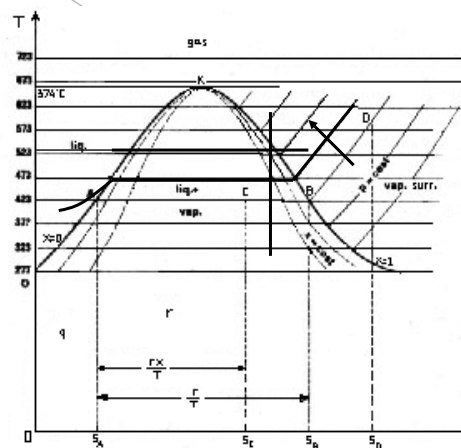
Isoterme: rette orizzontali

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

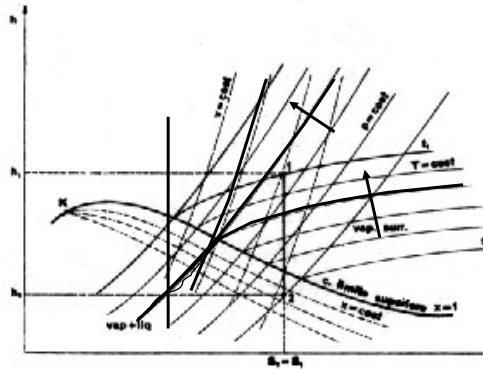
Diagramma di Mollier

Isoterme

Adiabatiche: rette verticali

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

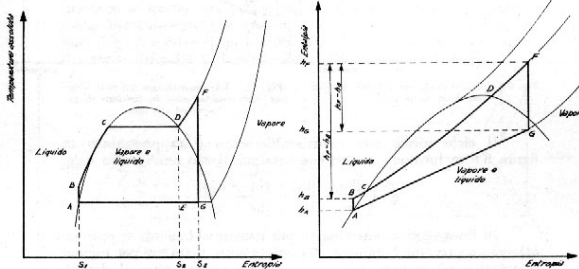
Isocore: salgono più rapidamente delle isobare



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

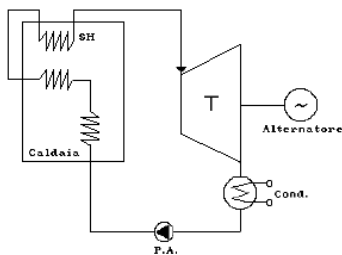
BC: riscaldamento in caldaia (isobara) fino alla T di ebollizione

CD: cambiamento di stato (vaporizzazione)

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

FG: 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_{max}
- Il ciclo aperto dovrebbe scaricare a 1 atm, cioè a 100°C e abbasserebbe il rendimento

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

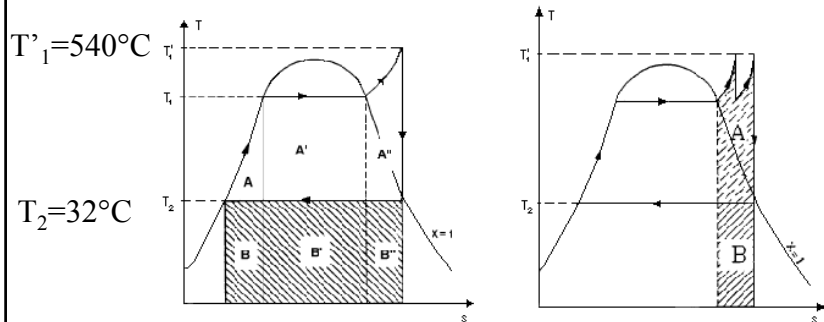
9

Provvedimenti per migliorare η

- 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_{max} : T_{max} ha limiti dovuti all'ossidazione a caldo e al *creep*
- Ciclo rigenerativo

10

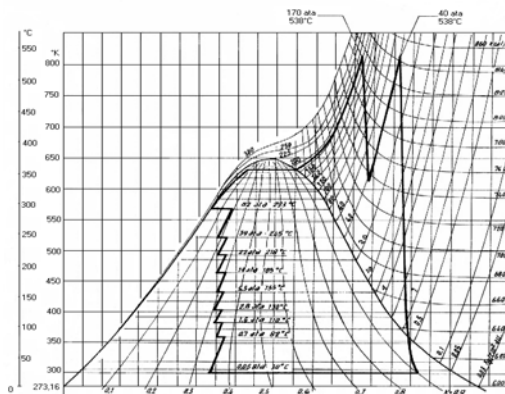
Surriscaldamento e risurriscaldamento



- 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

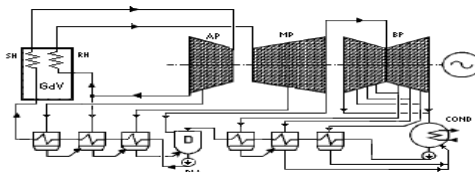


Gli spillamenti evitano il riscaldamento a bassa temperatura: la combustione riscalda acqua già riscaldata all'interno del ciclo, rinunciando a una parte di produzione di lavoro

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

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

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

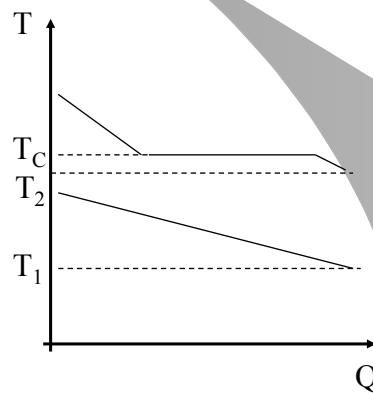
$$\eta = \frac{L}{Q} = \frac{(h_v - h_s) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_s)}{(h_v - h_a) - \sum_{i=1}^n g_i (h_i - h_{ai}')}$$

$$h_s > h_{ai}'$$

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)



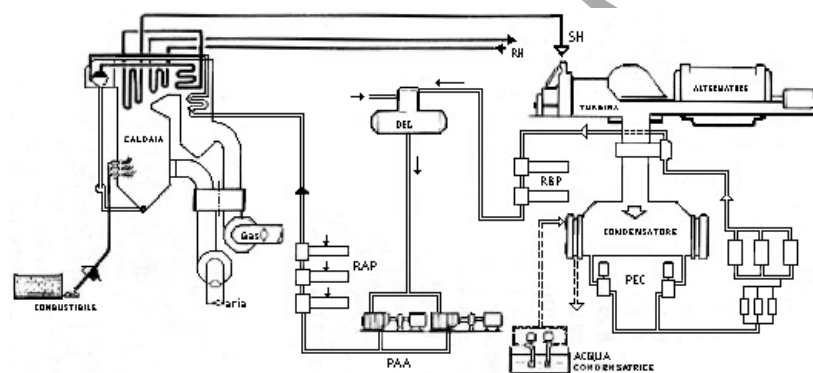
14

Circuiti principali

- Acqua alimento
- Aria-gas
- Acqua condensatrice

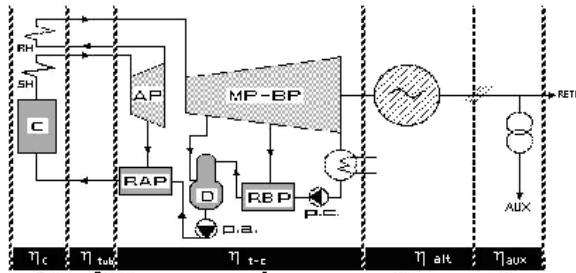
15

Circuito acqua alimento



16

Rendimento globale dell'impianto



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

p.c.i. = 9800 kcal/kg

Ogni ora servono 68.5 t di carburante

Perdite caldaia 39 MW,

Perdite turbina 6 MW

Il bilancio del condensatore è:

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

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

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

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

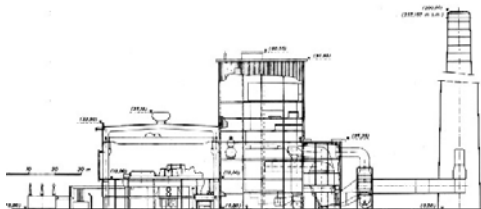
17

Rendimento di impianto

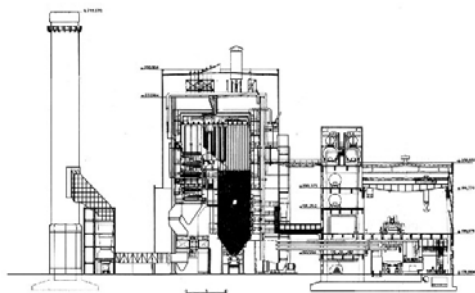
- Le pompe acqua condensatrice devono vincere solo perdite di carico, ma hanno grandi portate:
- $q = 29700 \text{ t/h} = 8.3 \text{ m}^3/\text{s}$ con pressione da vincere 1 kg/cm^2
- $P = \gamma H q = 8.3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1 \text{ kg/cm}^2 \cdot 10000 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \cdot 9.8 \text{ N/kg} = 810 \text{ kW}$
- 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 H₂ nel combustibile, moltiplicata per 9 perché occorrono 9 molecole di H₂ per ottenere lo stesso peso di una molecola di H₂O) 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 SO₂ 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 O₂
 - sono prodotti $(12+32)/12=3.66 \text{ kg}$ di CO₂

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 H₂ e 3% di S, 2% O e azoto)**
- **Aria teorica (in volume):**

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

22

Eccesso d'aria

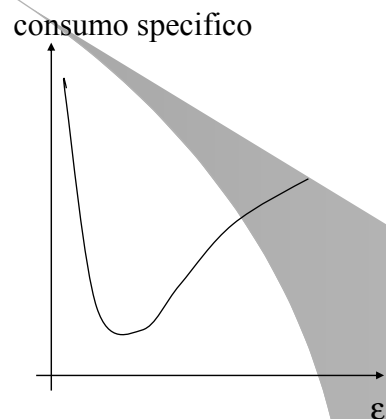
- In condizioni di mancanza d'aria, la combustione può essere incompleta:
 - $C + 1/2 O_2 = CO + 2500 \text{ kcal/kg}$
 - si produce poco calore e ossido di carbonio
- Si rende necessario un eccesso di aria rispetto alla quantità stechiometrica (non troppo perché sono tutte perdite ai fumi e perché si formano SO_2 e NO_x), circa 14 kg aria/kg combust.
- $\epsilon = (A_R - A_T) / A_T$,
- per valutare ϵ , 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

- ϵ troppo elevato:
 - diminuisce η 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 ϵ ; poi lo si fa diminuire finché si forma CO (questo accade a circa il 5%)
- Una diminuzione ulteriore fa impennare la produzione di CO



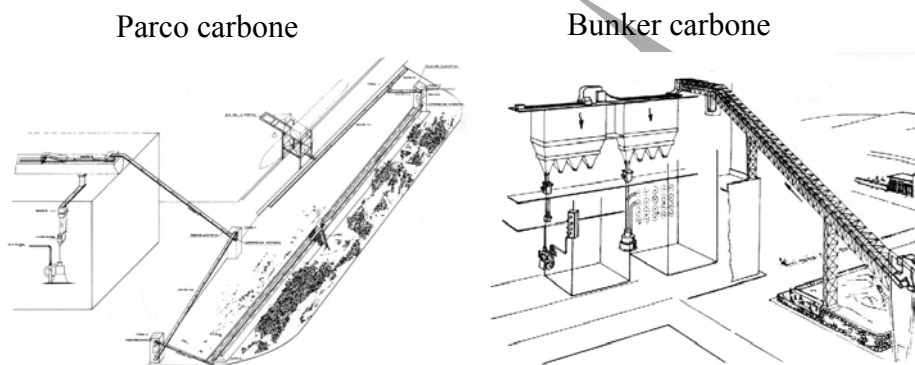
24

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

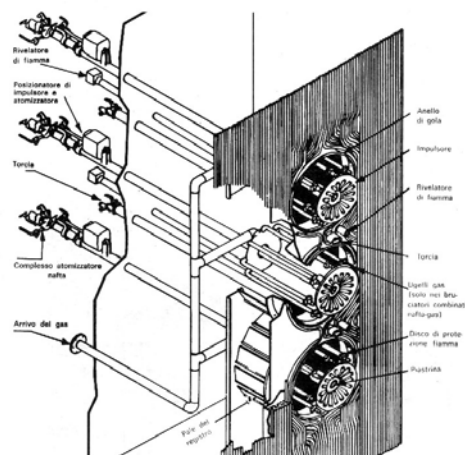
Approvvigionamento e serbatoi

- Approvvigionamento: navi, autobotti, treno, oleodotti
- Serbatoi: con capacità tra 50 e 100 mila m³
 - tetto fisso (fino a 20 mila m³) 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

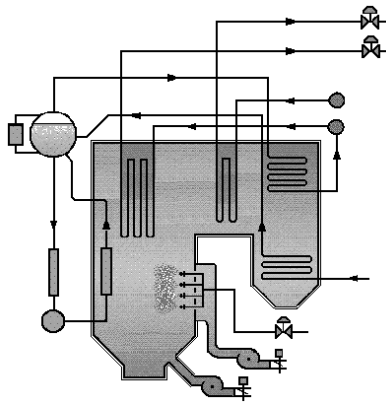
33

Combustibili gassosi

- Si utilizzano i gas naturali, miscela di idrocarburi (metano, etano e altri), azoto, CO₂
- Composizione media:
 - metano 96.4%
 - etano 3%
 - azoto 0.6%
- P.c.i.: 8072 kcal/Nm³
- 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:

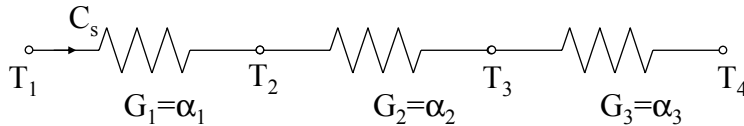
q_A : aria teorica + eccesso d'aria
 q_N : portata di nafta (combustibile)
 $q_F = q_A + q_N$
 q_v : portata del vapore

- 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

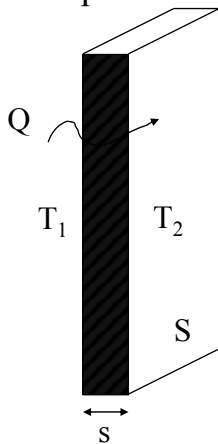
- La trasmissione del calore avviene per:
 - conduzione
 - convezione
 - irraggiamento
- E' importante il carico termico specifico C_s per unità di superficie: è una potenza trasferita
- Nelle caldaie è importante soprattutto l'irraggiamento
- Analogia elettrica (solo caso lineare, praticamente solo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



39

Conduzione

- Conduzione attraverso una superficie piana S di spessore s :



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

- λ (conducibilità termica) [kcal/mh°C] dipende dalla T : nei metalli diminuisce con T ; negli isolanti aumenta.
- Se λ 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

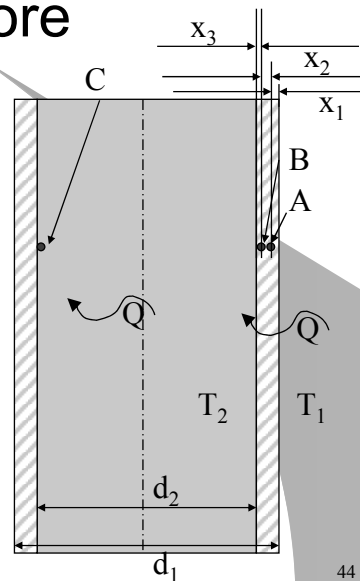
Scambio fumi-acqua

- $Q = \alpha_t S \Delta T$, dove α_t dipende (come più conduttanze, non costanti, in serie) da:
 - α_1 scambio fumi-tubo (irraggiamento, non lineare)
 - α_2 conduzione nello spessore del tubo (conduzione, lineare)
 - α_3 scambio tubo acqua (vapore) (convezione, non lineare)
- α_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
- α_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°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 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 λ e α_3 .

45

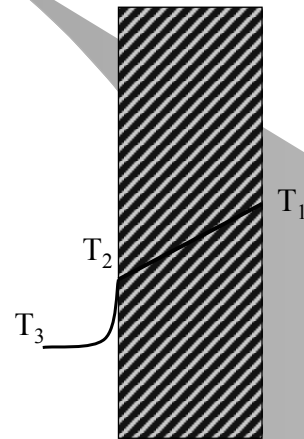
Effetti delle incrostazioni

- 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 Fe_3O_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

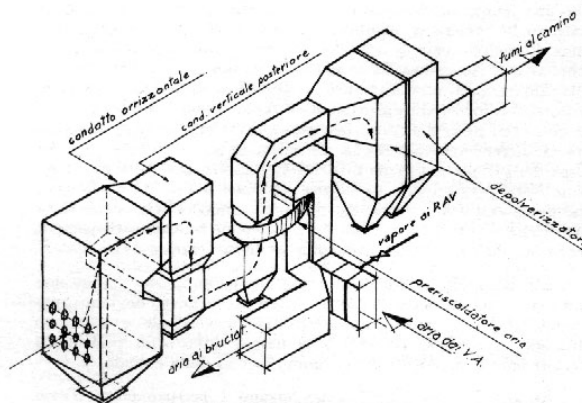
Isolamento della caldaia

- 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/hm²
 - 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

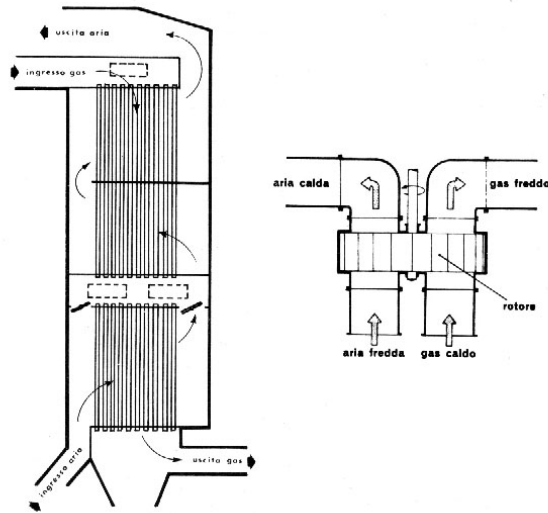
49

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

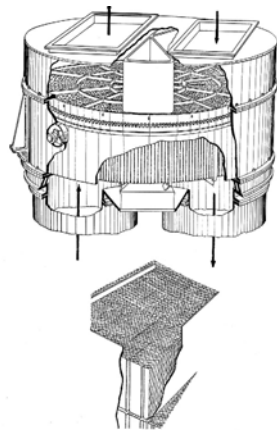
50

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

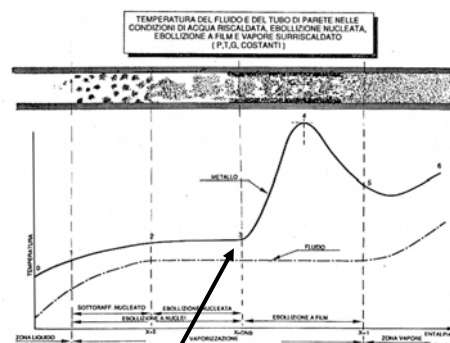
Camera di combustione

- 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

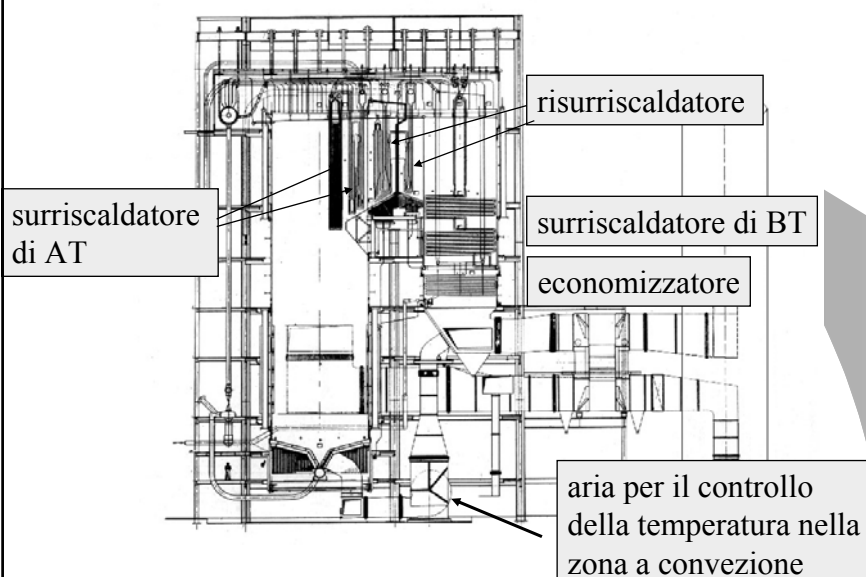
56

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 meschia 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 η

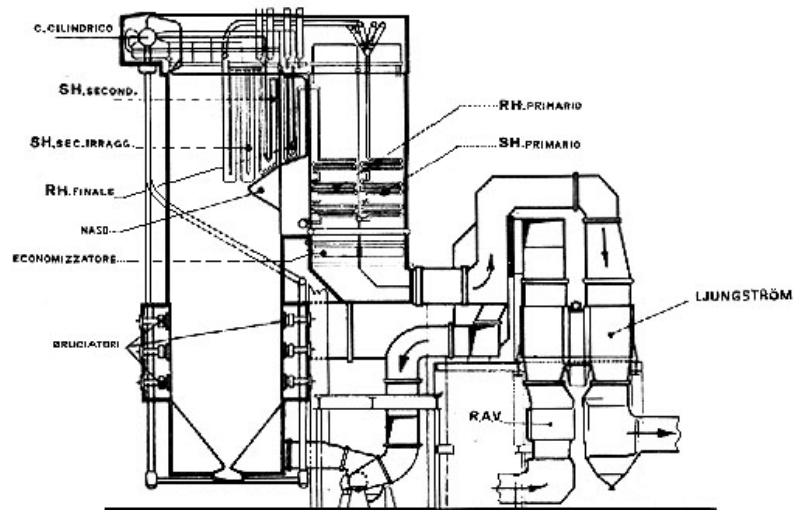
61

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°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

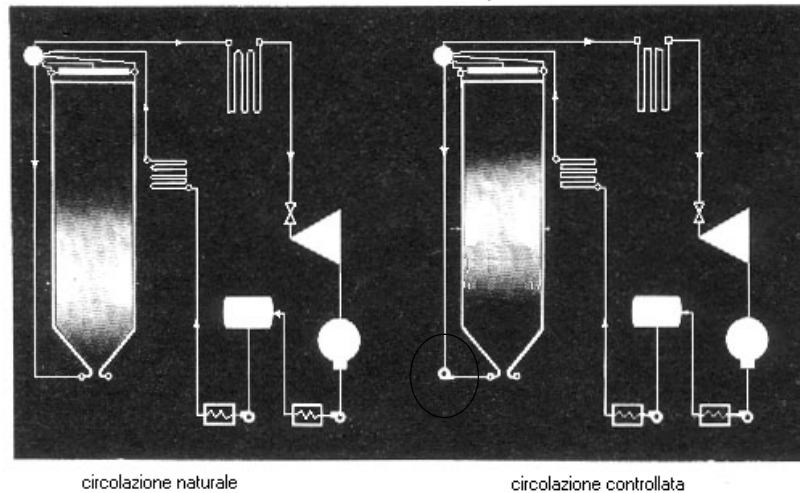
67

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

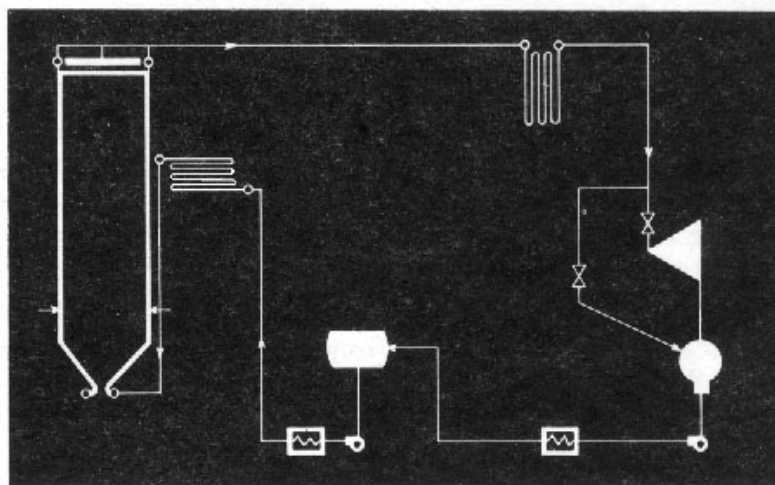
70

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

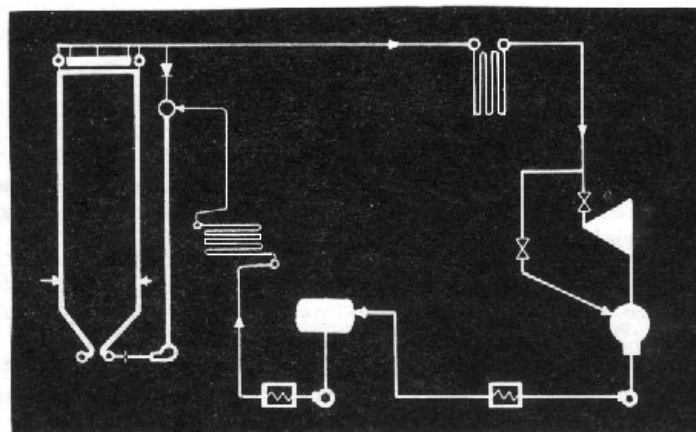
72

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

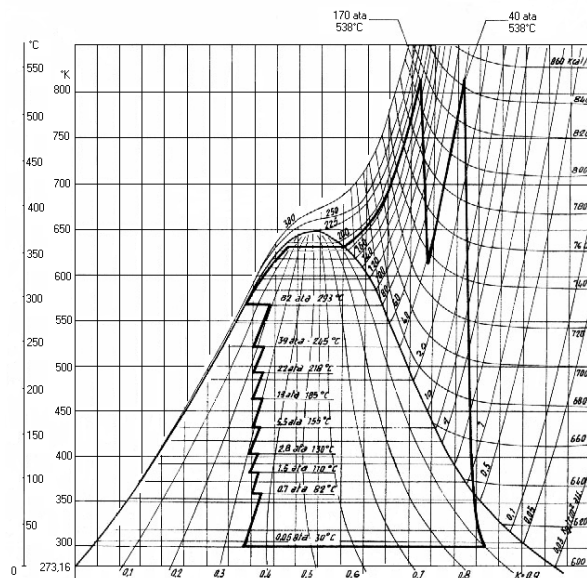
Generatore di vapore: portata

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

- P è la potenza resa dal turboalternatore,
- P_a è la potenza assorbita dagli ausiliari,
- η_m è il rendimento meccanico della turbina,
- η_a è il rendimento dell'alternatore,
- h_{SH} è l'entalpia del vapore surriscaldato all'ingresso in turbina,
- h_i è l'entalpia dello spillamento i-esimo,
- h_{RHc} è l'entalpia del vapore risurriscaldato caldo,
- h_{RHf} è l'entalpia del vapore risurriscaldato freddo,
- h_s è l'entalpia del vapore allo scarico di turbina (ingresso al condensatore),
- g_i è la portata di vapore, in valore relativo rispetto a G_v, 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/ m².

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

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 α_t è il coefficiente di trasmissione del calore fumi-tubo-fluido (circa 60 kcal/m²h°C) e Δt_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/m²h°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

