

GENERATORI DI VAPORE

TIP DI GENERATORE

Caldaie a grande corpo (Cornuaggia)* $\rightarrow 12-15 \text{ bar} / 40-50 \text{ m}^2 / 1.5 \text{ t/h}$

Caldaie a tubi di fumo $\rightarrow \eta \approx 65-75\%$

A fiamma diretta

A ritorno di fiamma** $\rightarrow 300 \text{ m}^2, 20 \text{ t/h}$

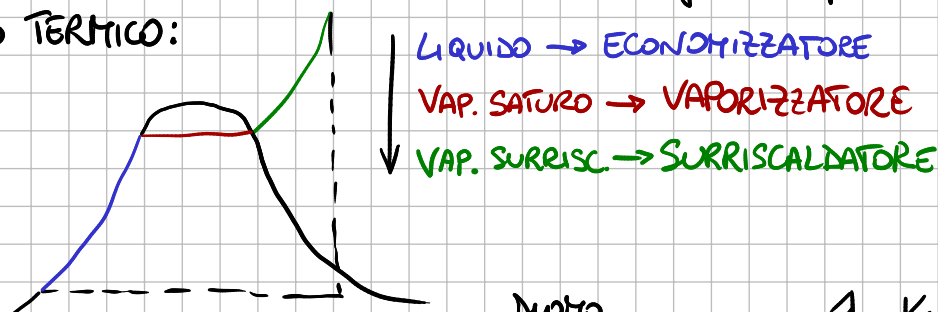
Caldaie a tubi d'acqua $\rightarrow \eta \approx 85-95\%$

- \rightarrow Circolazione naturale $\left\{ \begin{array}{l} \text{Sub-orizzontali} \rightarrow 30-70 \text{ bar} / 100 \text{ t/h} \\ \text{Sub-verticali} \rightarrow 30-130 \text{ bar} / 1000 \text{ t/h} \end{array} \right.$
- \rightarrow " forata $\rightarrow 150-200 \text{ bar} / 1000 \text{ t/h}$
- \rightarrow Attraversamento forzato $\rightarrow p > 200, \dot{m} > 1000 \text{ t/h}$

* PERIODO: 1810-1814

** PERIODO: metà '800 (Entrambe generali. fuori uso)

FASI DELLO SCAMBIO TERMICO:

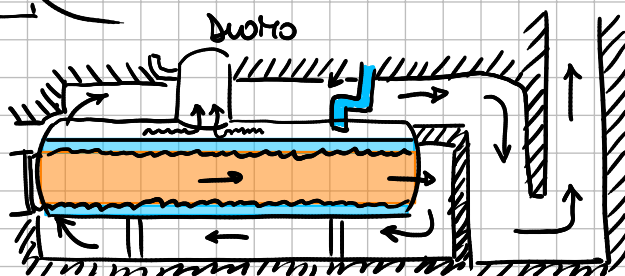


GENERATORI A GRANDE CORPO

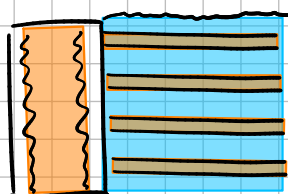
Pressione massima: 12-15 bar

Superficie di scambio: 40-50 m²

Potenzialità $\approx 1.5 \text{ t/h}$



GENERATORI A TUBI DI FUMO



Dividendo un'unica portata di fumo in più tubi:

- \triangleright Aumentare la superficie di scambio
- \triangleright Aumentare la potenzialità

Il corpo contenente l'acqua ha comunque un grosso diametro
Grosso diametro \rightarrow Limite di pressione!

GENERATORI A FIAMMA DIRETTA

Permettono di ridurre il diametro esterno \rightarrow Maggiori pressioni max
Impiegate nelle Trazione ferroviaria.

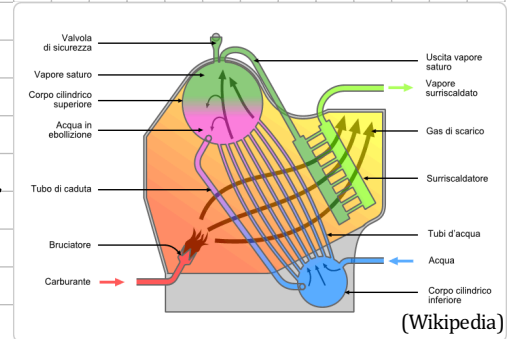
PER GEN. A TUBI DI FUMO: $\eta \approx 65-75\% \rightarrow$ Elevata emissione di carbonio
 \rightarrow Elevata temperatura a camino (perdite)

GENERATORI A TUBI D'ACQUA

Si è poi capito che era meglio far scorrere L'ACQUA dentro tubi di piccolo diametro, siccome era il fluido che doveva essere portato a pressione elevata.

Dunque, nei gen. a tubi d'acqua:

- ▷ L'acqua circola in un fascio tubiero (sub-orizzontale o sub-verticale), lambito esternamente dai prodotti della combustione.
- ▷ L'acqua permane più a lungo nella camera di combustione.

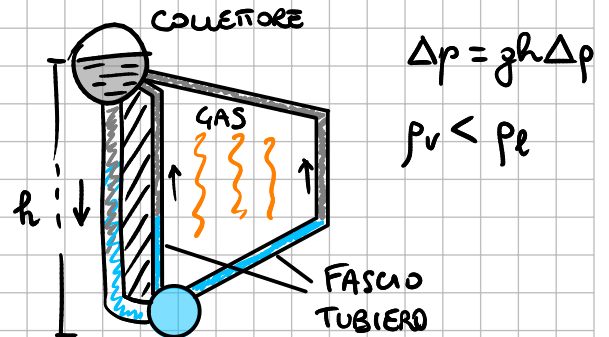


NOTA: l'economizzatore si mette vicino all'uscita, dove la richiesta energetica è minore (perché la temperatura dell'acqua è bassa).

Inoltre il vapore surriscaldato è raccolto in un collettore, da cui una parte è fatta ricircolare all'interno della camera di combustione (aumentando il tempo di permanenza, la superficie di scambio e, dunque, lo scambio termico stesso).

CIRCOLAZIONE DEL FLUIDO

Il fluido viene dunque fatto circolare nel generatore, subendo più volte il processo di adduzione di calore. Questa circolazione può avvenire naturalmente, cioè senza la necessità di mettere in moto forzatamente il fluido, grazie alle enormi* differenze di densità tra liquido e vapore surriscaldato.



È necessario assicurare un'efficace circolazione per evitare surriscaldamenti e conseguenti rotture dei tubi, dovuti al mancato drenaggio del calore causato dalla formazione di bolle di vapore (film-boiling).

* Queste differenze di densità (e quindi di volume specifico) vanno via via assottigliandosi con l'aumento della pressione.

Per $p > 130$ bar (fasci sub-verticali), $\Delta\rho$ non è più sufficiente: occorre passare alla CIRCOLAZIONE FORZATA, utilizzando pompe di circolazione.

↳ Poiché lavoriamo con il vapore, bisogna fare attenzione alla cavitazione

ATTRAVERSAMENTO FORZATO

Per $p > 200$ bar, $p > p_{ca}$ si elimina il collettore cilindrico e si impiegano generatori MONOTUBOLARI dalle dimensioni colossali.

A lezione è stato proposto uno schema di impianto da 1860 t/h,

$p_{max} = 260$ bar (ipercritico)
 $T_{max} = 540$ °C

Il serpentino può arrivare a kilometro di lunghezza!

RENDIMENTO DI UN GENERATORE DI VAPORE

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} = \frac{\dot{m}_v(h_i - h_u)}{\dot{m}_c H_i} \quad \text{Metodo diretto: } \rightarrow \begin{cases} \text{Si misura } \dot{m}_c \\ H_i \text{ è noto} \\ h_i, h_u \text{ e } \dot{m}_v \text{ dati da progetto} \end{cases}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_c - \dot{Q}_p}{\dot{Q}_c} = 1 - \frac{\dot{Q}_p}{\dot{Q}_c} \quad \text{Metodo indiretto:}$$

si assumono le perdite pari
all'energia termica residua dei fumi

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_f + \dot{Q}_{co} \text{ (incombusti)} \approx \dot{Q}_f \quad \text{perché } \dot{Q}_{co} \approx 1-3\% \text{ di } \dot{Q}_p \approx 0$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_{fumi} c_p (T_f - T_i) = \dot{m}_c (1 + \alpha) c_p (T_f - T_i)$$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{(1 + \alpha) c_p (T_f - T_i)}{H_i}$$

Non serve conoscere il consumo di carburante!

COMBUSTIONE INCOMPLETA



$$\frac{m_{co}}{m_{fuel}} = \frac{[CO]\%}{[CO]\% + [CO_2]\%} \frac{m_{co} M_{co}}{m_{fuel}} = \frac{[CO]\%}{[CO]\% + [CO_2]\%} \frac{m_c M_{co}}{M_c m_{fuel}} *$$

$$\text{DOVE } \frac{M_{co}}{M_c} \approx \frac{28}{12} = \frac{7}{3} (\approx 2,33) [/]$$

[CO]% è misurabile tramite
analizzatori di gas

$$\frac{\dot{Q}_{co}}{m_{fuel}} = \frac{m_{co}}{m_{fuel}} h_{co} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \rightarrow \frac{\dot{Q}_{co}}{\dot{Q}_{fuel}} = \frac{\dot{m}_{co}}{\dot{m}_{fuel} H_i} h_{co} \quad \left(* 'c' \text{ qui indica il carbonio,} \right. \\ \left. \text{NON il carburante} \right)$$

RENDIMENTO DI UN IMPIANTO A VAPORE

$$\text{Ciclo Hirn base: } \eta_{glob} = \eta_{GV} \eta_e \eta_t \eta_m = \frac{P_u}{\dot{m}_c H_i}$$

DOVE: η_e può essere calcolato
dai dati termodin del ciclo

Ciclo Hirn con risurrise.: cambia η_e

$$\eta_t = \eta_{ad}^{(E)}$$

RISURR. + 2 ESP. CON RENDIMENTI $\eta_H \neq \eta_{2t}$:

$$\eta_l \eta_t = \frac{\Delta h_{is,1t} \eta_{1t} + \Delta h_{is,2t} \eta_{2t}}{q_{GV}}$$

Rigenerazione con 1 spillamento:

$$\eta_l \eta_t = \frac{\dot{m} \Delta h_{is,3A} \cdot \eta_{t(3A)} + \Delta h_{is,A4} \cdot \eta_{t(A4)}}{\dot{Q}_{GV}}$$

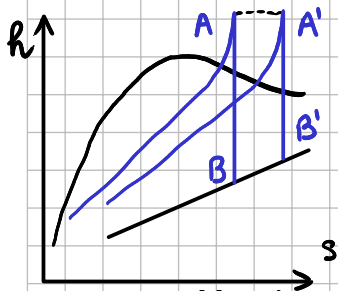
REGOLAZIONE DEGLI IMPIANTI A VAPORE

$$P = \dot{m}_v \Delta h_{AB}$$

PARZIALIZZAZIONE: Si riduce la portata di vapore in ingresso amministrando le valvole di ammissione nei settori del primo stadio.

Può attuarsi per stadi ad azione, ma la regolazione non è continua.

LAMINAZIONE: Il flusso di vapore è laminato mediante la chiusura parziale delle valvole di ammissione. Si riduce la pressione totale del vapore in ingresso alla turbina AP, lasciando invariato il livello dell'entalpia. Si mantiene costante la temperatura di ingresso al primo stadio evitando sollecitazioni termiche, anche per transitori rapidi. La laminazione porta ad una riduzione della portata e della velocità del vapore, con modifica dei triangoli di velocità, e comporta una riduzione del rendimento.



$$h_A = h_{A'} \rightarrow \Delta h_{AB} > \Delta h_{A'B'} \rightarrow L_{AB} > L_{A'B'}$$

STRATEGIE

CALDAIA SEQUE TURBINA

Si adotta quando la potenza della turbina deve soddisfare completamente il carico esterno. Il controllo della potenza è ottenuto parzializzando le valvole.

La caldaia è controllata in funzione della portata di vapore, agendo sulle portate di combustibile e comburente, per ridurre la perturbazione del ciclo nelle fasi di transitorio.

TURBINA SEQUE CALDAIA

Utile nelle fasi di avviamento (circa 10 ore) per fare accumulare al generatore di vapore l'energia termica necessaria alla regimazione. L'apertura delle valvole aumenta con la crescita della pressione nel generatore.

REGOLAZIONE COORDINATA E INTEGRATA

Combinazione delle precedenti.

La richiesta di carico viene inviata simultaneamente alle apparecchiature di controllo dei singoli componenti. I sottosistemi di controllo agiscono sul relativo componente al fine di raggiungere un adeguato compromesso fra funzionamento ottimale del sistema e soddisfacimento del carico esterno.