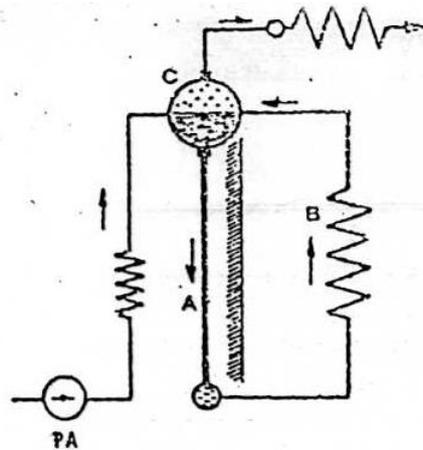
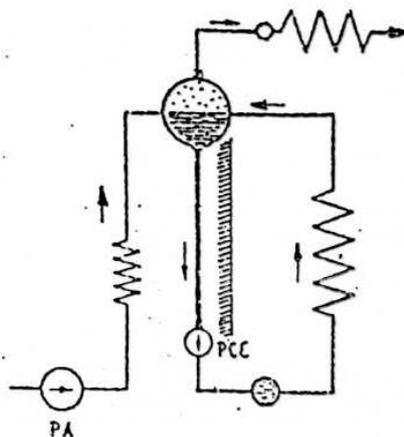


Generatore B&W tipo UP da 1050 t/h.

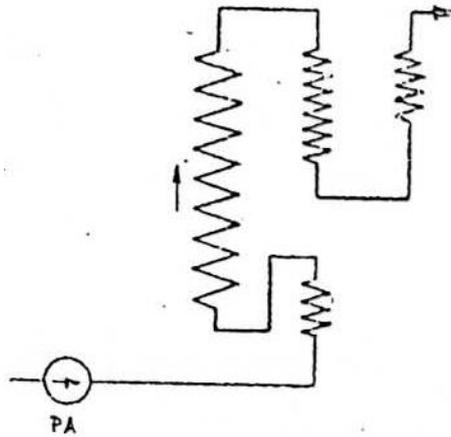
Nei generatori a circolazione naturale, il liquido proveniente dall'economizzatore entra in un separatore di fase, detto per la sua forma corpo cilindrico. La fase liquida scende attraverso tubi di diametro relativamente elevato, e schermati rispetto alla fiamma, a un collettore inferiore dal quale si diramano in direzione verticale o pseudo-verticale le centinaia di tubi di piccolo diametro, in vista della fiamma e/o lambiti dai fumi, che costituiscono l'evaporatore e dove l'acqua, salendo, aumenta il proprio titolo. Il fluido bifase è quindi reimmesso nel corpo cilindrico, dove avviene nuovamente la separazione: la fase liquida ritorna in circolo, mentre quella vapore è inviata al surriscaldatore. Si parla di circolazione naturale perché il fluido si muove all'interno dei tubi del circuito dell'evaporatore solo per differenza di densità tra fase liquida e fase vapore.



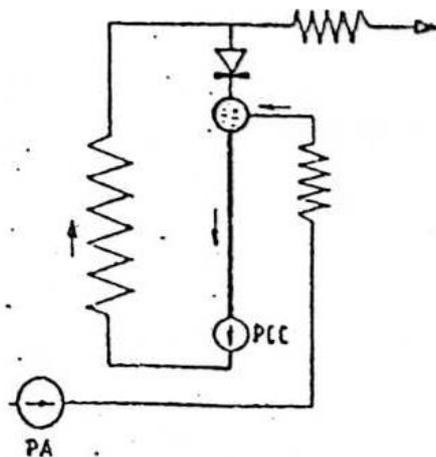
Il vantaggio è la semplicità e affidabilità del sistema, ma il limite è l'impossibilità di operare con i valori più elevati della pressione di evaporazione: avvicinandosi al punto critico la differenza di densità tra le fasi tende ad annullarsi, per cui è difficile superare nei generatori di questo tipo pressioni di evaporazione di circa 100 bar.



Il limite è superato nei generatori a circolazione controllata: nelle tubazioni di caduta della fase liquida, in prossimità del collettore inferiore per evitare la cavitazione, sono poste le pompe di circolazione del condensato (PCC). Si possono così raggiungere pressioni nell'ordine dei 200 bar, cioè vicine alla pressione critica. Le pompe di circolazione del condensato sono tipicamente centrifughe, con motore immerso in acqua, data l'impossibilità di realizzare la tenuta sull'albero con il livello di affidabilità richiesto, e con un circuito ausiliario di raffreddamento.



Nei generatori supercritici è necessario passare alla circolazione forzata. Sparisce il corpo cilindrico, non essendoci più fasi da separare, e lo schema d'impianto si semplifica: la pompa di alimentazione manda il fluido attraverso centinaia-migliaia di tubi paralleli di piccolo diametro, che costituiscono in sequenza l'economizzatore e gli altri scambiatori, fino al surriscaldatore finale. Il rapporto di circolazione è evidentemente unitario. Questo tipo di impianto è concettualmente molto semplice, ma presenta anche importanti vincoli operativi: il principale è che non può funzionare al di sotto di una certa frazione, il 30% circa, della portata nominale. Infatti, anche se il circuito è costruito in modo che le perdite di carico siano quanto più possibile uniformi nelle schiere di tubi paralleli, al diminuire della portata si arriva inevitabilmente al punto in cui ci sarà almeno un tubo con la perdita di carico più alta degli altri, nel quale non circolerà più acqua, portando al surriscaldamento e al limite alla fusione della parete metallica, con conseguente blocco dell'impianto. Chiaramente, nelle fasi di avviamento e spegnimento si dovrà operare a pressioni subcritiche utilizzando un circuito ausiliario con separazione di fase e rapporto di circolazione non nullo.



Si arriva in questo modo ai generatori a circolazione combinata, nei quali il rapporto di circolazione vale normalmente uno, ma assume valori superiori nelle fasi di basso carico e nei transitori. Gli elementi caratteristici del circuito sono un piccolo separatore di fase di forma sferica, la pompa di circolazione del condensato nel ramo di caduta e una valvola monodirezionale. Questa è normalmente chiusa e forza il fluido a seguire il percorso imposto dalla circolazione forzata. Quando la portata si riduce, la valvola si apre e consente a parte del fluido di ricircolare. Il rapporto di ricircolazione dipende dal grado di apertura della valvola.

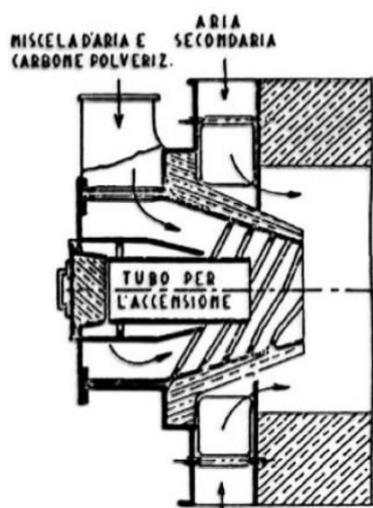
GdV a tubi d'acqua: il circuito dell'aria e dei prodotti della combustione.

Il circuito dell'aria e dei prodotti della combustione è composto dai seguenti elementi:

- i ventilatori aria, macchine centrifughe normalmente dotate di pale direttrici orientabili all'aspirazione, e/o i ventilatori fumi;
- il preriscaldatore aria, necessario per realizzare una buona combustione e per recuperare nel modo più completo possibile l'energia termica dei fumi;
- i bruciatori e la camera di combustione, dove il combustibile si miscela con l'aria preriscaldata e si ossida generando i prodotti della combustione, o fumi;
- gli scambiatori di calore del circuito acqua-vapore, le cui superfici esterne sono lambite dai fumi, in un lungo percorso guidato;
- di nuovo il preriscaldatore aria, dove i fumi arrivano a temperatura ancora elevata, ma ormai troppo bassa per poter scambiare calore con l'acqua o col vapore;
- i dispositivi di trattamento dei fumi;
- il camino.

I ventilatori, oltre a realizzare la portata d'aria voluta, hanno anche il compito di regolare la pressione del circuito dell'aria e dei prodotti della combustione. Questa potrà essere leggermente inferiore o superiore a quella atmosferica. Una lieve depressione comporta il rischio di infiltrazione di aria dall'ambiente esterno, che influenza la combustione e la temperatura dei fumi. Una lieve sovrappressione comporta il rischio di diffusione in atmosfera di prodotti della combustione non trattati. Con i soli ventilatori aria il circuito sarà in pressione, mentre con i soli ventilatori fumi, posti alla base del camino, sarà in depressione. La soluzione migliore prevede l'installazione di entrambi: si parla in questo caso di generatori di vapore a pressione bilanciata, nei quali si può controllare a piacimento la pressione in camera di combustione.

I preriscaldatori aria sono solitamente rigenerativi del tipo Ljungstrom, costituiti da un tamburo rotante con settori in lamiera che vengono riscaldati dai fumi e raffreddati dall'aria, in successione, nel corso della rotazione. La temperatura di preriscaldamento arriva a 200-300 °C.

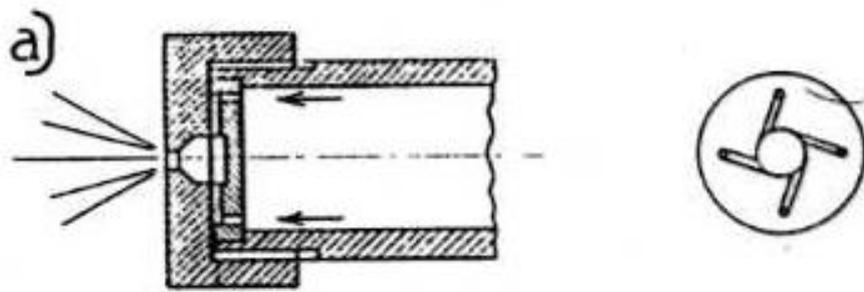


Il tipo di bruciatore dipende dalla natura del combustibile. Nel caso del polverino di carbone, la miscela di questo con l'aria preriscaldata, proveniente dai molini, arriva ai bruciatori con un sistema di trasporto pneumatico. La portata d'aria è calcolata sulla base delle esigenze fisiche del trasporto

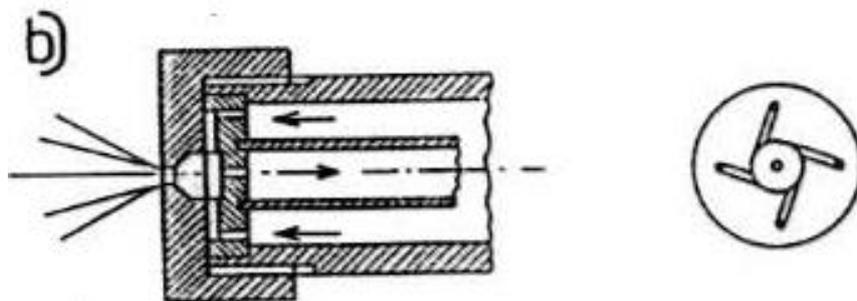
pneumatico e non su quelle chimiche della combustione, per cui sarà tipicamente inferiore alla quantità stechiometrica. Il valore corretto di eccesso d'aria si realizza poi con un flusso d'aria secondaria. Il bruciatore è disegnato in modo da imporre ai flussi un moto fortemente turbolento con componenti di velocità tangenziali, per favorire l'intima miscelazione tra combustibile e comburente.

Nei bruciatori a combustibile liquido l'elemento più importante è il polverizzatore, dispositivo che ha il compito di produrre un getto di gocce finissime di combustibile. Le gocce devono avere diametro di pochi micrometri e un'energia cinetica elevata per poter penetrare nella massa d'aria e poi diffondere.

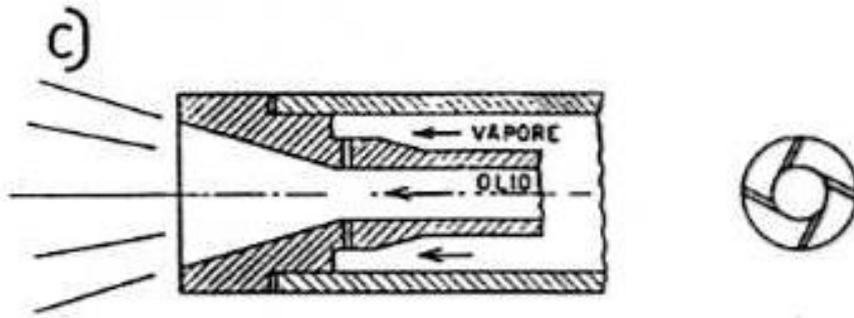
La polverizzazione più semplice è quella del tipo meccanico diretto: il combustibile arriva al polverizzatore ad alta pressione e imbocca dei canali tangenziali ad una camera centrale, dotata di un foro assiale calibrato attraverso il quale si realizza il getto di combustibile. La portata del getto dipende dalla pressione del combustibile: alle basse portate la pressione diventa insufficiente per ottenere una buona polverizzazione. Nel caso di più polverizzatori, il problema può essere risolto regolando per parzializzazione, cioè riducendo il numero di bruciatori attivi.



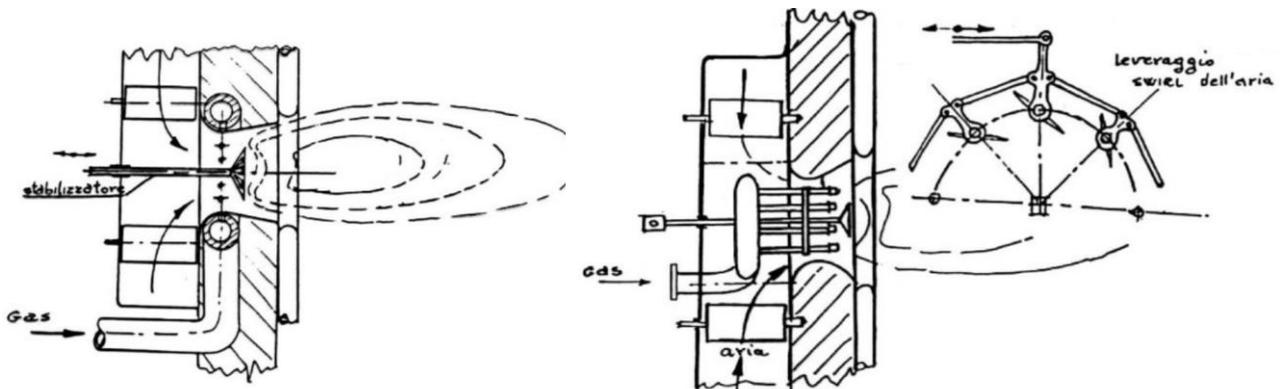
Il campo di regolazione del singolo bruciatore può essere esteso adottando la polverizzazione meccanica con ritorno. In questo caso la cavità centrale presenta un altro foro assiale, opposto al primo, che comunica con una tubazione di ritorno al serbatoio, coassiale a quella di mandata. Sulla tubazione di ritorno è presente una valvola che normalmente è chiusa. Quando si vuole ridurre la portata, anziché ridurre la pressione del combustibile si apre parzialmente la valvola di ritorno, ottenendo una buona polverizzazione anche a carichi ridotti.



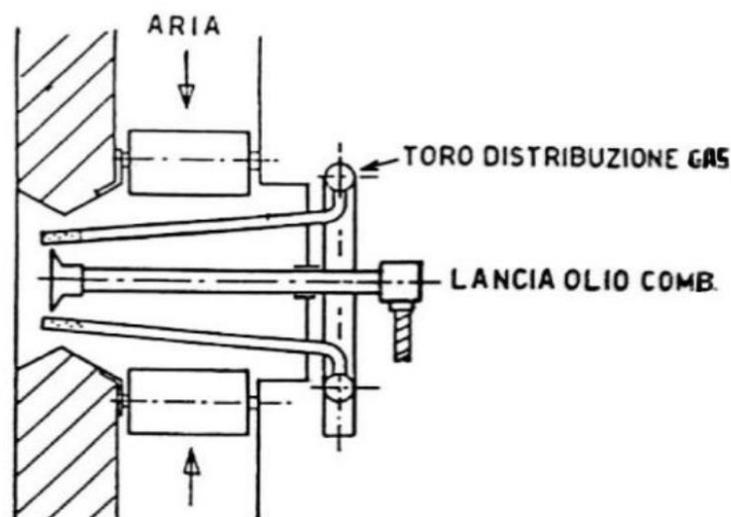
Per avere una regolazione continua dalla portata da zero a quella massima bisogna ricorrere ai polverizzatori a fluido ausiliario. In questo caso è il fluido ausiliario che fornisce l'energia necessaria alla polverizzazione, indipendentemente dalla pressione di alimentazione e dalla portata del combustibile. Sono presenti due tubazioni: la più interna contiene il combustibile, quella esterna contiene il fluido ausiliario che, nelle macchine che stiamo trattando, sarà vapore. Le due tubazioni comunicano mediante una corona di ugelli tangenziali al diametro di quella del combustibile, dove si formano dei piccoli getti di fluido ausiliario che realizzano la polverizzazione del combustibile.



Nei bruciatori a gas il combustibile è aspirato da una sezione toroidale con ugelli calibrati, posti nella sezione di gola di un tubo di Venturi. L'aria comburente è introdotta, al solito, con un moto fortemente rotatorio. Uno stabilizzatore provvede a mantenere la fiamma nella posizione voluta. Se la portata del combustibile è troppo elevata per questa architettura, si adotta una struttura toroidale esterna al venturimetro, cui sono collegate le lance del combustibile.

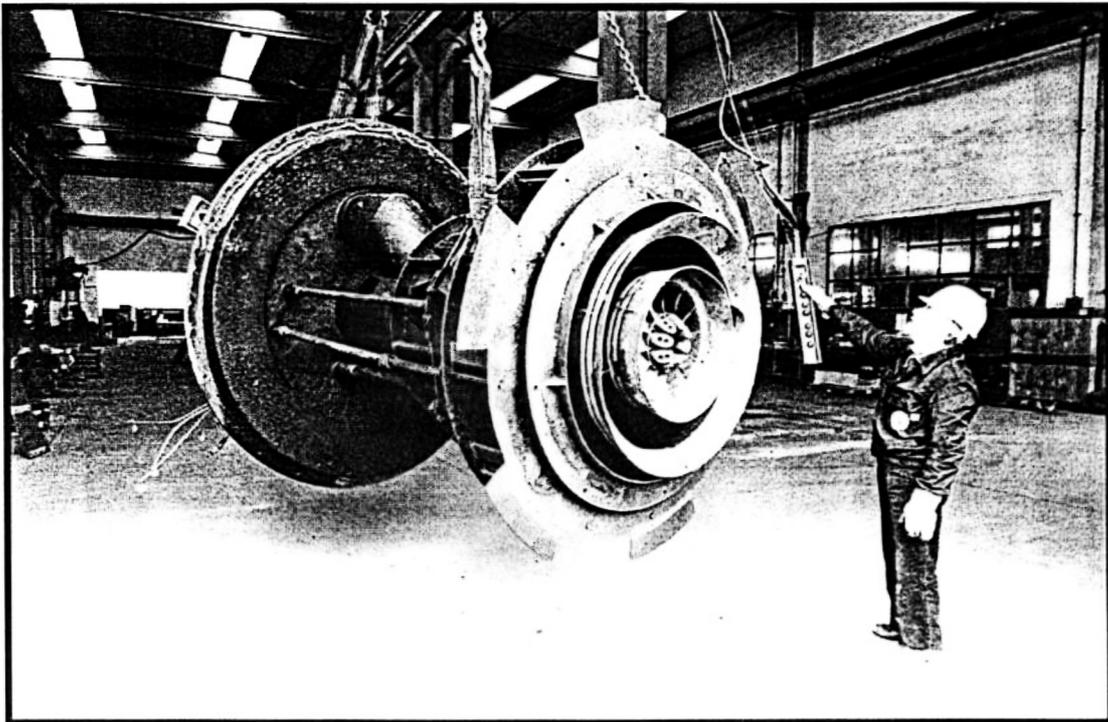
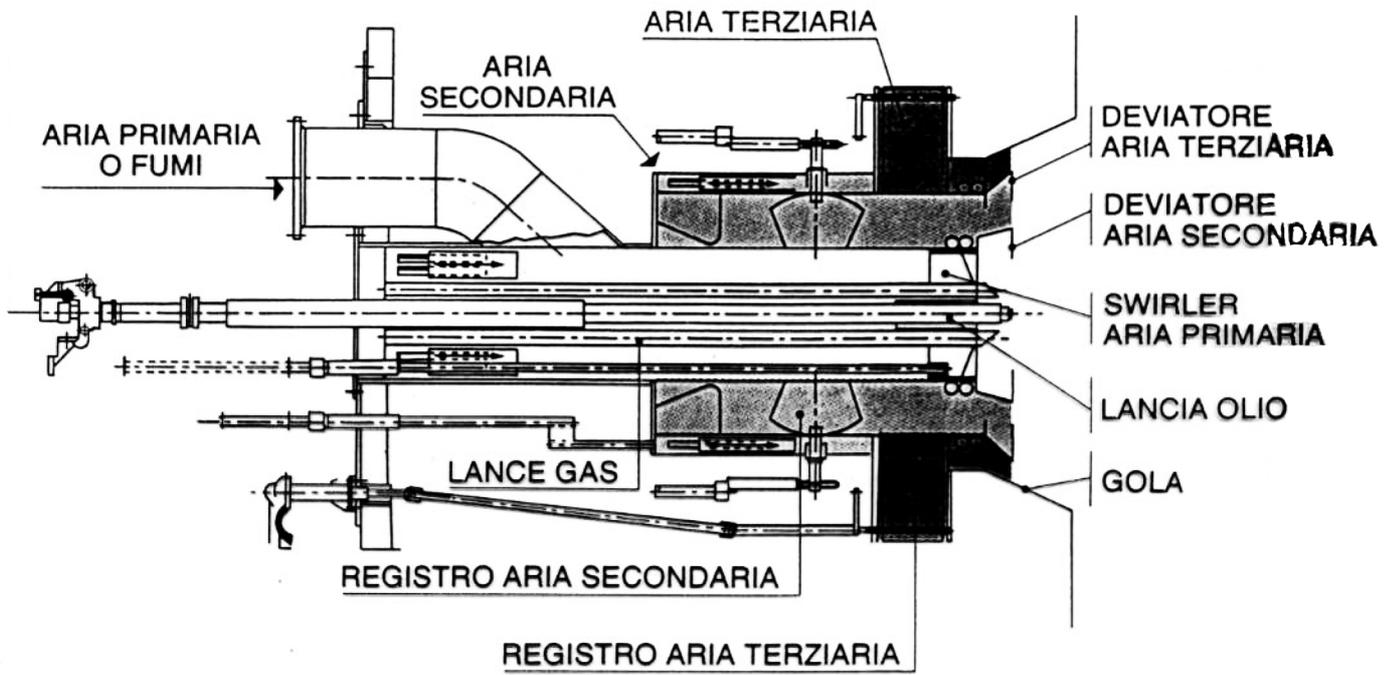


È pratica comune, infine, installare bruciatori policombustibile, dotati di una lancia centrale per combustibile liquido e di una corona di lance periferiche per combustibili gassosi.



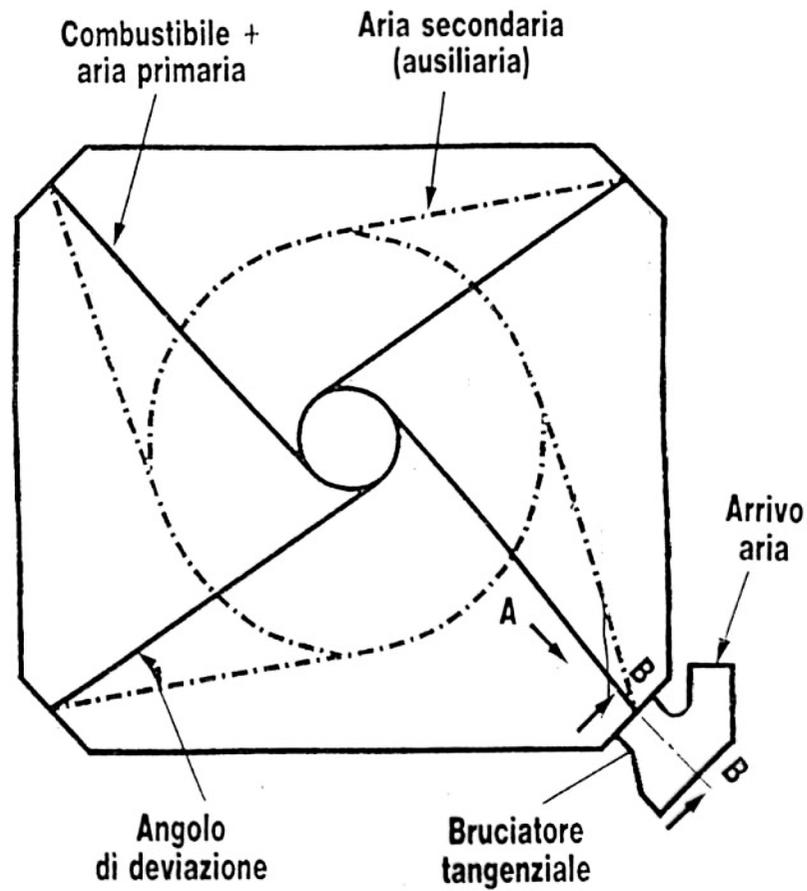
Per quanto riguarda la formazione di sostanze inquinanti, si era già osservato che nei grandi impianti di combustione stazionari e monitorati, come quelli qui considerati:

- le emissioni di monossido di carbonio e di idrocarburi incombusti sono quasi nulle;

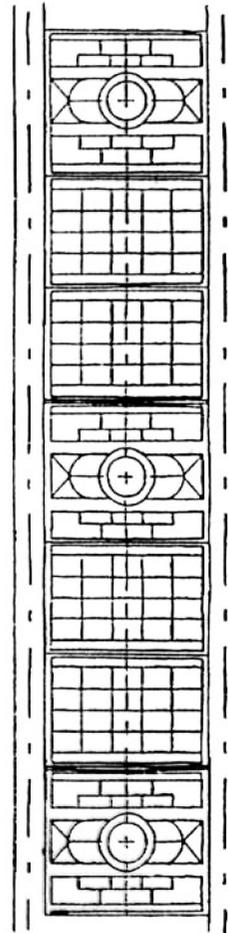


Bruciatore TEA.

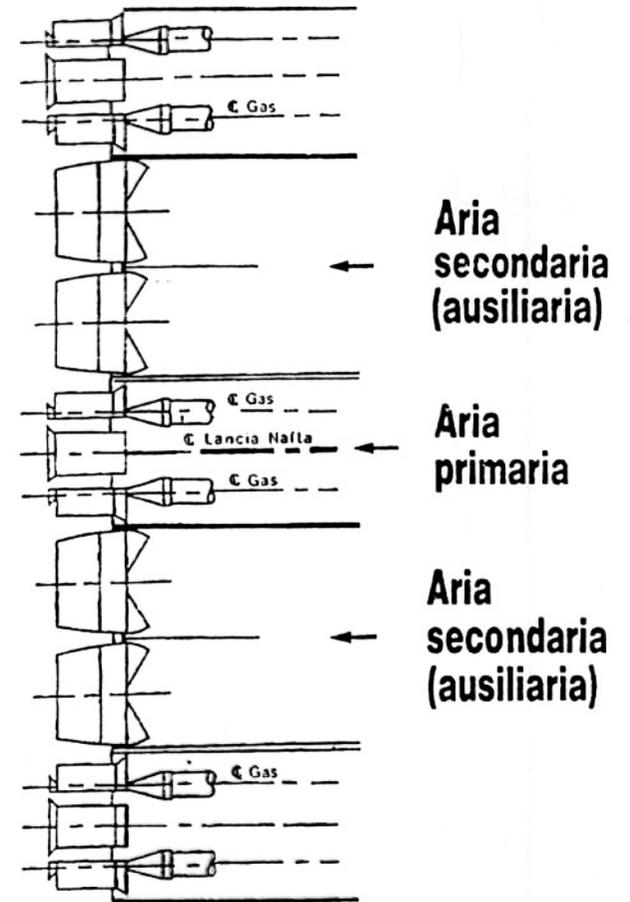
SISTEMA BRUCIATORI C.F.S.



VISTA DA "A"



SEZIONE B-B



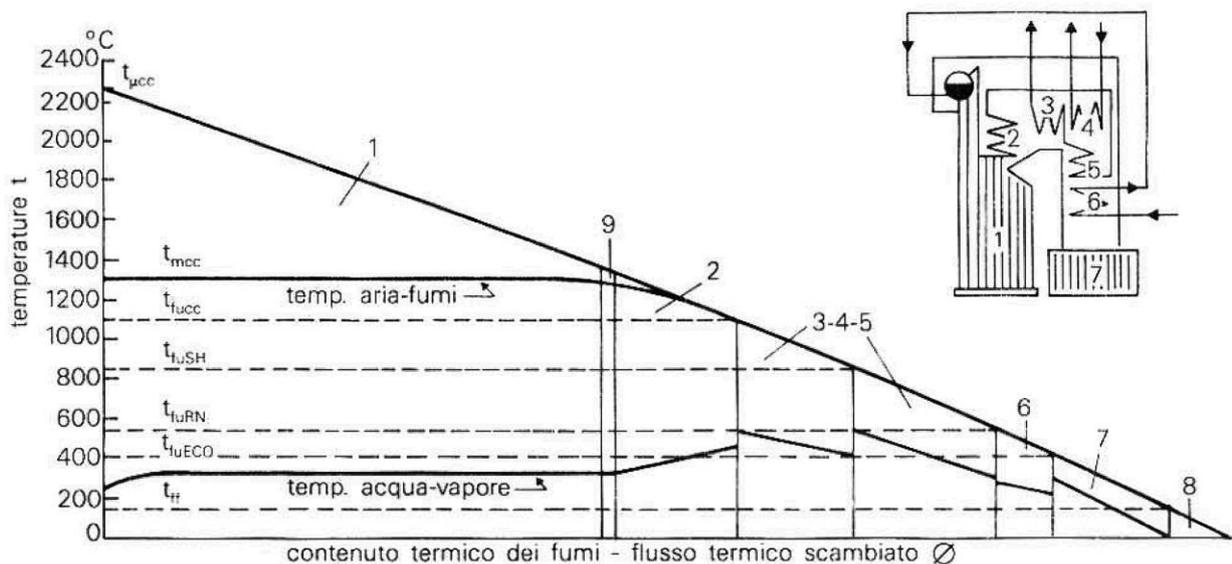
- le emissioni di ossidi di zolfo dipendono dalla natura del combustibile, e possono essere eventualmente ridotte mediante lavaggio dei fumi;
- le emissioni di particolato dipendono anch'esse dalla natura del combustibile e sono controllabili con l'adozione di filtri.

Rimane il problema delle emissioni di ossidi di azoto, la cui formazione deve essere controllata in fase di combustione per evitare l'uso degli SCR o almeno per contenerne le dimensioni e il consumo di reagenti. Si applica allora il principio della combustione a stadi, intervenendo sia sulla struttura dei bruciatori (bruciatori a basso NO_x) sia sulla loro disposizione all'interno della camera di combustione, oltre che sulla architettura della camera stessa, come illustrato nelle figure e negli schemi allegati.

Per il dimensionamento di massima della camera di combustione si fa riferimento a due parametri caratteristici:

- il carico termico volumetrico, cioè la potenza termica che è possibile sviluppare con la combustione per unità di volume della camera;
- il carico termico superficiale, cioè la potenza termica che è possibile sviluppare con la combustione per unità di superficie della sezione trasversale della camera.

Il primo si assesta attorno ai $(100 \div 300) \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^3\text{h}$, dove il limite superiore spetta ai combustibili gassosi, con i quali è possibile la miscelazione praticamente perfetta con l'aria, mentre quello inferiore è invece tipico dei combustibili solidi. Il secondo parametro ha valori tipici dell'ordine dei $(2 \div 3) \cdot 10^6 \text{ kcal/m}^2\text{h}$.



zona di scambio termico:

- 1 evaporatore
- 2 surriscaldatore irraggiato
- 3-5 surriscaldatore a convezione
- 4 risurriscaldatore a convezione
- 6 economizzatore
- 7 preriscaldatore d'aria
- 8 perdite al camino
- 9 perdite verso l'ambiente

temperature dei fumi:

- t_{ucc} temp. teorica dei fumi
 t_{mcc} temp. media fumi in c. di c.
 t_{fucc} temp. fumi all'uscita c. di c.
 t_{fuSH} temp. fumi all'uscita del surriscaldatore
 t_{fuRN} temp. fumi all'uscita del risurriscaldatore
 t_{fuECO} temp. fumi all'uscita dell'economizzatore
 t_H temp. fumi all'uscita del preriscaldatore d'aria

I prodotti della combustione scambiano quindi calore col circuito dell'acqua e del vapore lambendo una serie di scambiatori di calore, come illustrato a titolo di esempio nel diagramma di scambio termico riportato in figura.

Si osserva in particolare che:

- la sequenza degli scambi termici è organizzata in modo da ridurre il più possibile la differenza di temperatura media tra fluido caldo e freddo, in modo da contenere il degrado termodinamico dell'energia termica trasmessa (concetto ben esprimibile con la definizione di rendimento exergetico degli scambiatori di calore);
- i meccanismi di scambio termico prevalenti sono l'irraggiamento, in camera di combustione, e la convezione, per tutti quelli scambiatori che non “vedono” direttamente la fiamma;
- surriscaldatore, risurriscaldatore e, molto spesso, anche l'evaporatore sono suddivisi per motivi di regolazione in una sezione a convezione e una ad irraggiamento. Ai carichi ridotti, la proporzione tra quantità di calore trasmessa per irraggiamento e quella trasmessa per convezione cambia rispetto al funzionamento a pieni carico. Infatti, mentre la temperatura di combustione, dalla quale dipende l'intensità dell'irraggiamento, è mantenuta solitamente costante mediante il controllo dell'eccesso d'aria, le portate e quindi le velocità dei fumi si riducono modificando il coefficiente di scambio termico convettivo. La suddivisione degli scambiatori in diverse sezioni, associata talvolta alla possibilità di orientare diversamente i bruciatori rispetto alle superfici di scambio in funzione del carico, aumenta la flessibilità degli interventi di regolazione.

L'ultimo scambiatore lambito dai fumi è sempre, come già osservato, il preriscaldatore aria. Seguono i più volte citati dispositivi di trattamento dei prodotti della combustione (filtri antiparticolato e, laddove necessario, sistemi deSO_x e deNO_x).

Infine, l'ultimo componente del circuito dell'aria e dei prodotti della combustione è il camino, che ha due funzioni:

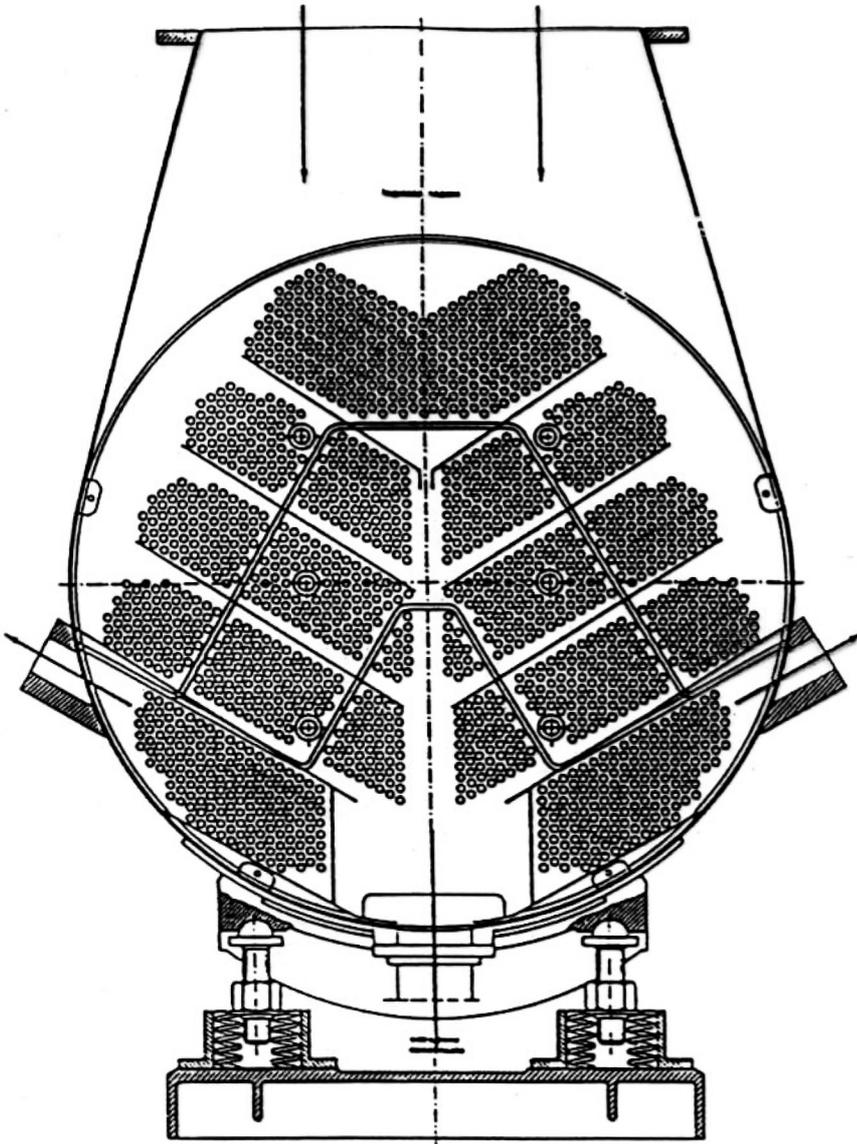
- realizzare la dispersione in atmosfera dei prodotti della combustione, in accordo con le prescrizioni della normativa;
- contribuire col tiraggio alla circolazione dei prodotti della combustione, integrando l'azione, in ogni caso prevalente, dei ventilatori dell'aria e dei fumi.

Si ricorda che la temperatura dei fumi al camino dovrà essere sensibilmente superiore a quella di rugiada. Le perdite più significative del generatore sono proprio quelle per calore sensibile al camino a causa della differenza di temperatura rispetto all'ambiente. Complessivamente il rendimento di un buon generatore di vapore si aggira attorno al 90-95%.

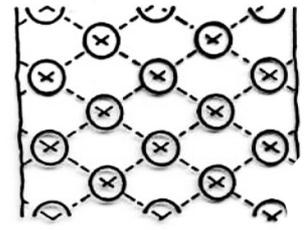
Le apparecchiature ausiliarie.

Le principali apparecchiature ausiliarie dei generatori di vapore sono:

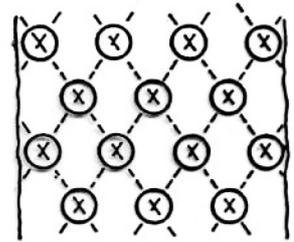
- quelle relative all'alimentazione del combustibile;
- le pompe di estrazione del condensato e quelle di alimentazione, che sono elementi cruciali per quanto riguarda l'affidabilità del sistema. Per questo motivo non ci sarà mai una sola pompa con un solo sistema di alimentazione, ma saranno presenti due o tre pompe per ogni funzione (principio di affidabilità per ridondanza);



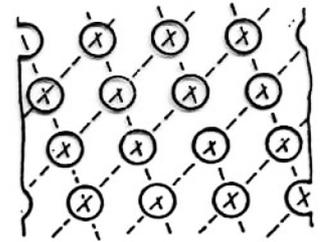
Sezione trasversale di un condensatore a superficie



a)

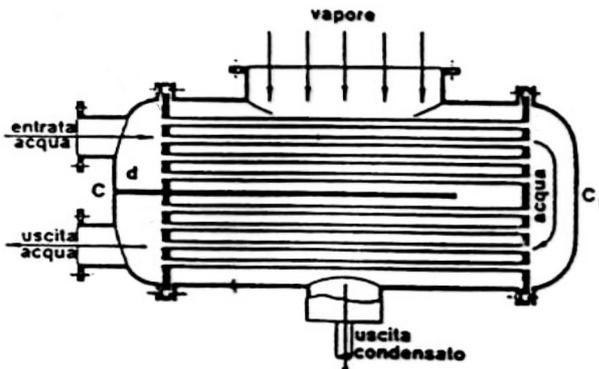


b)

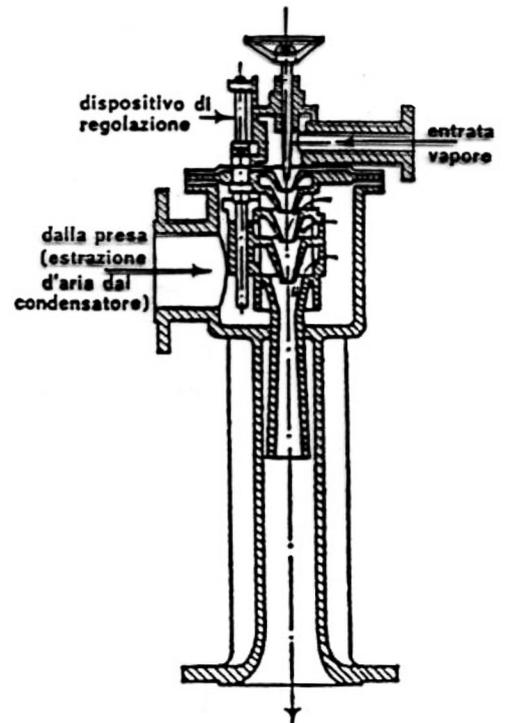


c)

Disposizione dei tubi



Condensatore a superficie (schema)



- i sistemi per la depurazione dell'acqua di reintegro del circuito (demineralizzazione, degassazione). La demineralizzazione si realizza mediante colonne con resine scambiatrici di ioni, anioniche e cationiche;
- apparecchiature di regolazione, per mantenere costanti la pressione e la temperatura del vapore al variare della portata richiesta. La regolazione è semplificata nei generatori di vapore a circolazione naturale o controllata, perché le due grandezze vengono controllate separatamente: la pressione è regolata nell'evaporatore, la temperatura nel surriscaldatore. Se invece il generatore è a circolazione forzata, ogni regolazione sulla temperatura porta a variazioni di pressione e viceversa;
- apparecchiature di controllo.

Il condensatore.

Il condensatore può essere uno scambiatore a superficie che utilizza quale fluido freddo acqua di mare, di lago o di fiume, fatta circolare con pompe ad elica. In alternativa si può utilizzare l'aria ambiente nelle torri evaporative. Anche nel condensatore vengono estratti i gas incondensabili mediante dispositivi detti eiettori a vapore. Per i dettagli si rimanda alle figure allegate.

Le turbine a vapore

Il salto entalpico da elaborare negli impianti a vapore d'acqua è in genere molto elevato, per cui si utilizzano tipicamente turbine assiali pluristadio. Solo in applicazioni di piccola potenza (decine o poche centinaia di kW) può essere sufficiente una turbina monostadio, che sarà in questo caso ad azione (De Laval o Curtis). Per potenze medio piccole (alcune migliaia di kW), il primo stadio ad azione sarà seguito da un numero relativamente ridotto di stadi, sia ad azione che a reazione, raccolti in un unico corpo (si vedano gli schemi).



Per potenze più elevate (decine e centinaia di MW) gli stadi sono organizzati in più corpi, con livelli medi di pressione decrescenti (corpi di alta, media e bassa pressione, indicati con gli acronimi AP, MP e BP).

Al diminuire della pressione la portata volumetrica aumenta drammaticamente (anche di 2000 volte rispetto al valore di ingresso nel primo stadio ad azione), e non può più essere elaborata da una unica serie di stadi, perché per mantenere la velocità del fluido a livelli accettabili sarebbe necessario ricorrere a palettature troppo estese in direzione radiale. Una soluzione possibile può essere la seguente: