

F. Bignucolo – Impianti di produzione dell'energia elettrica

SEZIONE C – IMPIANTI DI PRODUZIONE A FONTE FOSSILE

Capitolo 7

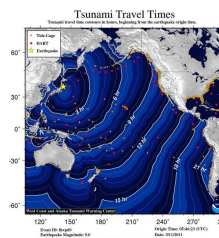
Impianti termoelettrici

1

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Elementi principali di influenza** sulla localizzazione degli impianti sono simili rispetto ad una grande industria manifatturiera a bassa manodopera:
 - Agevole approvvigionamento delle materie prime
 - Facilità di collocamento della produzione nel relativo mercato
 - Possibilità di allocare scarichi reflui e residui della produzione
- **Vincoli secondari di influenza:**
 - Sismicità dell'area di installazione
 - Possibile esposizione ad eventi ambientali significativi (es. alluvioni)
 - Vicinanza di aree protette e/o strategiche (zone militari, centri monumentali e paesaggistici)
 - Caratteristiche proprie del terreno (solidità, permeabilità, ecc.)
- La gestione di vincoli secondari può diventare un vincolo di progettazione



Fukushima 2011

2

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Elementi principali di influenza** sulla localizzazione degli impianti sono simili rispetto ad una grande industria manifatturiera a bassa manodopera:

- **Agevole approvvigionamento delle materie prime**

Tipo di combustibile	Olio combustibile	Carbone	Nucleare
Consumo di combustibile [t/anno]	1.450.000	2.020.000	30
N° carri ferroviari equivalenti necessari per il trasporto	48.000	57.000	1

► Tabella 7.1 Quantità di combustibile richiesta in un anno da una centrale di potenza nominale pari a 1.000 MW.

- Storicamente nei paesi non dotati di giacimenti interni di **carbone** (es. Italia), le centrali che usano questo combustibile sono allocate vicino ad un porto (nave carboniera) → 32,4 TWh nel 2016 in IT (10,3% della produzione elettrica)
- Gli impianti ad **olio combustibile** sono collocati in prossimità di raffinerie collegate tramite brevi oleodotti dedicati → Una parte di 14,7 TWh nel 2016 in IT (4,7% della produzione elettrica)
- La localizzazione degli impianti a **gas naturale** è più flessibile → 123,3 TWh nel 2016 in IT (39,2% della produzione elettrica)

3

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Elementi principali di influenza** sulla localizzazione degli impianti sono simili rispetto ad una grande industria manifatturiera a bassa manodopera:

- **Facilità di collocamento della produzione nel relativo mercato**

- Sarebbe preferibile localizzare le centrali nelle vicinanze del carico
 - Contenimento dei costi di installazione e delle perdite legate al trasporto dell'energia elettrica
- Risultano spesso predominanti i vincoli di tipo funzionale/logistico e di tipo ambientale

4

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Elementi principali di influenza** sulla localizzazione degli impianti sono simili rispetto ad una grande industria manifatturiera a bassa manodopera:
 - **Possibilità di allocare gli scarichi reflui e i residui della produzione**
 - Gli attuali impianti termoelettrici tradizionali presentano rendimenti intorno al 40%
 - Circa il 60% dell'energia ricavata dal combustibile deve necessariamente essere ceduta all'ambiente sotto forma di calore degradato (a bassa temperatura)
 - Il metodo più semplice per effettuare tale "rilascio" consiste nello scambiare calore con fluidi di raffreddamento → Acqua/aria di raffreddamento e calore dei fumi
 - Per limitare l'impatto ambientale, i fluidi di raffreddamento devono comunque essere restituiti con temperature non eccessivamente superiori a quelle d'ingresso
 - Necessità di grandi portate durante tutto il tempo di funzionamento dell'impianto

	Olio combustibile	Carbone	Nucleare
H ₂ O di raffreddamento (m ³ /h)	100.000	100.000	150.000

► Tabella 7.2 Quantità di acqua necessaria per il raffreddamento di una centrale di potenza nominale 1.000 MW, tenendo conto della sovratemperatura ammissibile in immissione rispetto al prelievo.

5

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Elementi principali di influenza** sulla localizzazione degli impianti sono simili rispetto ad una grande industria manifatturiera a bassa manodopera:
 - **Possibilità di allocare gli scarichi reflui e i residui della produzione**
 - Gli attuali termoelettrici richiedono lo smaltimento dei sottoprodotti della combustione (fumi, ceneri, scorie radioattive)

Emissioni (t/anno)	Olio combustibile	Carbone	Nucleare
Ceneri	--	300.000	11 (scorie)
CO ₂	4.400.000	6.000.000	
SO ₂	21.000	31.600	
CO	2.200	2.500	
NO _x	8.000	18.300	

► Tabella 7.3 Quantità tipiche di emissioni di una centrale di potenza nominale 1.000 MW.

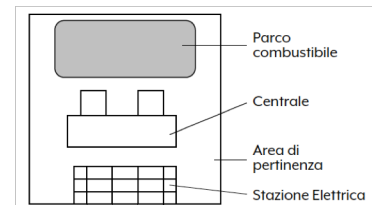
- L'uso del gas minimizza il problema di ceneri e parte degli altri inquinanti gassosi, ma non consente un rilevante contenimento delle emissioni di anidride carbonica

6

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Localizzazione degli impianti termoelettrici

- **Estensione spaziale delle centrali termoelettriche**
 - Necessario stimare in fase preliminare l'ingombro necessario alla realizzazione di una centrale
 - Per un sito produttivo di potenza nominale 1.000-2.000 MVA
 - Edifici civili e macchinari 3÷5 ha
 - Stazione elettrica di interconnessione alla rete AT 2÷3 ha
 - Parco combustibile (se a carbone) 10÷12 ha
 - Aree di pertinenza 10÷15 ha
 - **TOTALE: Circa 25÷35 ha per taglia 1.000-2.000 MVA**
 - 1/50 della superficie richiesta per impianto FV pari potenza
 - Contenimento del parco combustibile in caso di olio e gas
 - Negli impianti nucleari non è richiesto un esteso parco combustibile, ma sono necessarie aree di pertinenza di maggiore estensione per ragioni di sicurezza

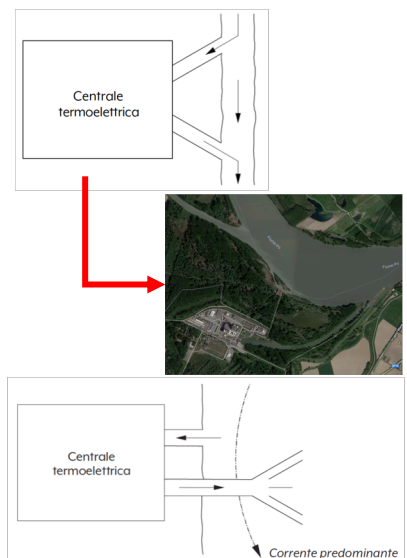


7

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Plant layout

- **Opere di presa e restituzione dell'acqua di raffreddamento**
 - Acqua di fiume
 - L'opera di presa deve essere posta a monte rispetto al flusso del corso d'acqua (non si deve innescare un ricircolo dell'acqua che porterebbe facilmente a superare i limiti di sovrariscaldamento ammissibili)
 - Non si deve causare localmente un innalzamento eccessivo della temperatura dell'acqua (limite di 3°C) → Impatto ambientale ed ittico
 - Acqua di mare
 - Necessario analizzare il verso predominante delle correnti marine per stabilire la reciproca posizione del punto di presa e del punto di restituzione



8

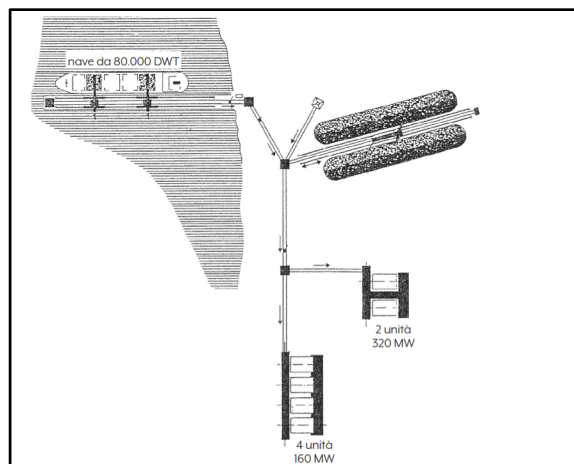
Plant layout

• Parco combustibile

- Deve essere strutturato per facilitare le operazioni di approvvigionamento (scarico dai mezzi di trasporto) e di ripresa (alimentazione della centrale)
- Soprattutto negli impianti a carbone si cerca di minimizzare l'impegno di personale nelle laboriose operazioni di scarico dalle navi carboniere, di stoccaggio all'aperto, di ripresa e alimentazione dei mulini di polverizzazione



► **Figura 7.5** Layout tipico in sezione del parco combustibile per una centrale a carbone, dallo scarico dalle navi carboniere alla ripresa verso i mulini di polverizzazione.



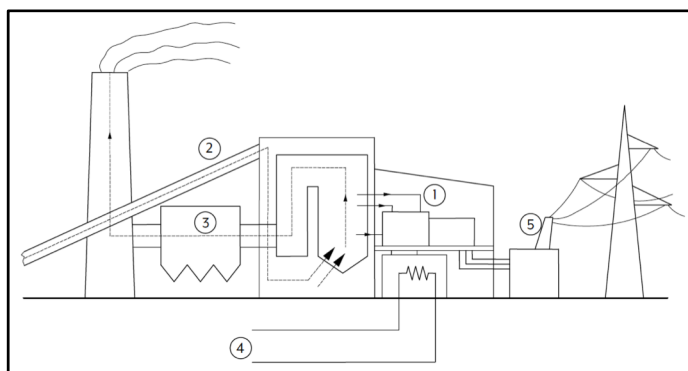
► **Figura 7.4** Esempio di layout in pianta delle opere di ricezione, stoccaggio e alimentazione di unità termoelettriche a carbone (per i trasporti via nave, DWT significa Dead Weight Tonnage, ovvero tonnellaggio di portata lorda, e rappresenta quindi la massa complessiva di carico mobile trasportabile in condizioni di sicurezza, in tonnellate metriche).

9

Plant layout

• Circuiti costitutivi del funzionamento dell'impianto

- Necessaria una particolare attenzione nella progettazione dei vari circuiti necessari al corretto funzionamento della centrale termoelettrica
 1. Circuito acqua-vapore
 2. Alimentazione del combustibile
 3. Circuito aria-fumi
 4. Circuito di raffreddamento
 5. Circuito elettrico
- Necessario considerare le reciproche posizioni vincolate di ingressi e uscite
- Minimizzazione dei percorsi e dei relativi ingombri
- Contenzimento sia dei costi di installazione che di quelli di gestione (correlati con le perdite nell'impianto) e di manutenzione



10

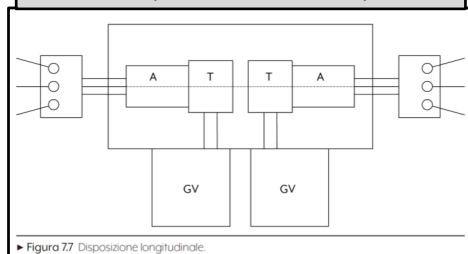
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Plant layout

• **Layout della sala macchine**

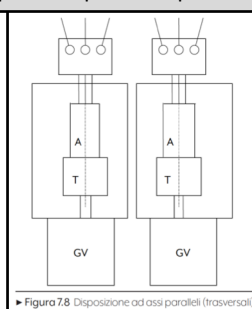
LONGITUDINALE

- Minimizzare la lunghezza dei condotti di adduzione del vapore
- Minimizza la lunghezza delle sbarre in uscita dagli alternatori
- Richiede dimensioni più contenute per la luce del carro-ponte
- Ristrettezza di spazio → Difficolose operazioni di smontaggio dei corpi macchina per manutenzioni e riparazioni



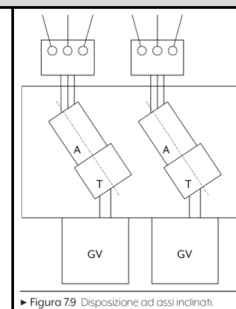
ASSI PARALLELI

- Stessi vantaggi della disposizione longitudinale
- Maggiore spazio di manovra
- **Disposizione più utilizzata nel parco termoelettrico italiano**
- Maggiori dimensioni del carro-ponte (o più carro-ponti indipendenti)



ASSI INCLINATI

- Soluzione intermedia per vantaggi e svantaggi
- Possibile realizzazione in unico piano (condensatori accanto a turbina)
- Molto diffusa in altri contesti (es. Inghilterra)



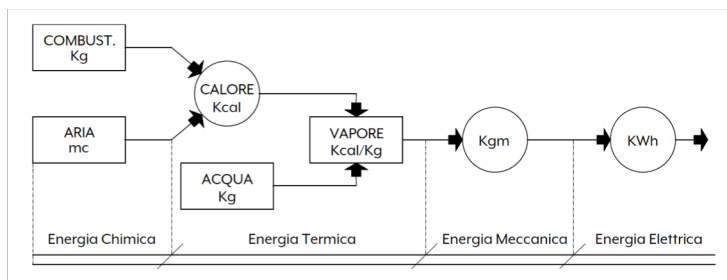
11

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Trasformazioni energetiche

- Molteplici trasformazioni energetiche in serie → Prodotto dei rendimenti equivalenti
 - η_c : rendimento del ciclo termodinamico (circa 40-50%)
 - η_{gv} : rendimento del generatore di vapore (circa 93%)
 - η_T : rendimento della turbina (circa 91%)
 - η_A : rendimento dell'alternatore (circa 98%)
 - CA: consumo dei servizi ausiliari, circa 0,05 [p.u.]
- Rendimento limite degli impianti termoelettrici tradizionali di poco superiore a 40%

$$\eta = \eta_c \eta_{gv} \eta_T \eta_A (1 - CA)$$



► Figura 710 Trasformazioni energetiche tipiche di un impianto termoelettrico.

12

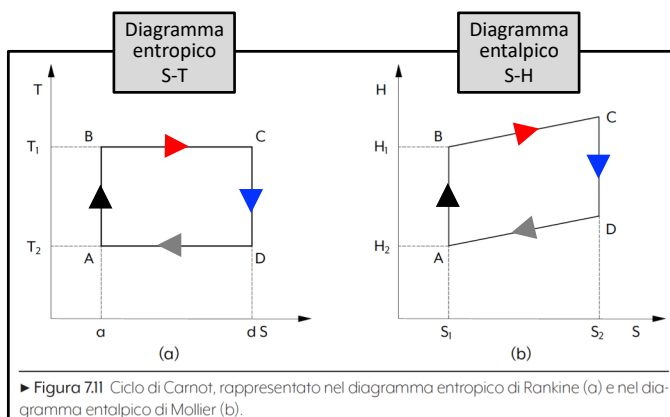
Cicli termici

- Rappresentazione grafica dei cicli termici
 - **Diagramma entropico o di Rankine** (entropia-temperatura, ovvero S-T)
 - Trasformazioni isoterme → Rette orizzontali
 - Trasformazioni adiabatiche (isoentropiche) → Rette verticali
 - **Diagramma entalpico o di Mollier** (entropia-entalpia, ovvero S-H)
 - I tratti verticali rappresentano i salti entalpici corrispondenti alla energia ricevuta, trasformata e ceduta
 - È possibile calcolare direttamente il rendimento termodinamico del ciclo

13

Cicli termici

- **Ciclo di Carnot**
 - Ciclo chiuso più semplice e a massimo rendimento
 - È un ciclo puramente teorico (conseguenza diretta del principio di Carnot)
 - 4 trasformazioni reversibili
 - **Trasformazione adiabatica AB:** compressione e riscaldamento dell'acqua da T_2 a T_1
 - **Trasformazione isoterma BC:** vaporizzazione alla temperatura costante T_1
 - **Trasformazione adiabatica CD:** espansione nella macchina utilizzatrice (e raffreddamento da T_1 a T_2)
 - **Trasformazione isoterma DA:** condensazione alla temperatura costante T_2



14

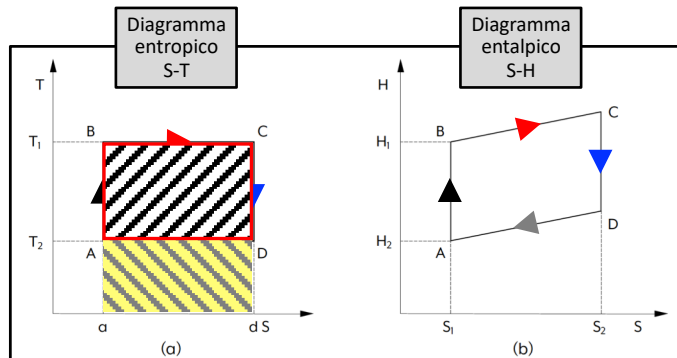
Cicli termici

Ciclo di Carnot

- Calore speso → Area aBCDd
- Calore ceduto al condensatore → Area aADd
- **Calore trasformato in lavoro → Differenza di aree → Area ABCD**
- Rendimento del ciclo

$$\eta = \frac{\text{area}(ABCD)}{\text{area}(aBCDd)} = \frac{(S_2 - S_1)(T_1 - T_2)}{(S_2 - S_1)T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

- La macchina di Carnot è una macchina perfetta (senza perdite), quindi irrealizzabile
 - Studio di cicli reali che tendano al rendimento del ciclo di Carnot



► Figura 7.11 Ciclo di Carnot, rappresentato nel diagramma entropico di Rankine (a) e nel diagramma entalpico di Mollier (b).

15

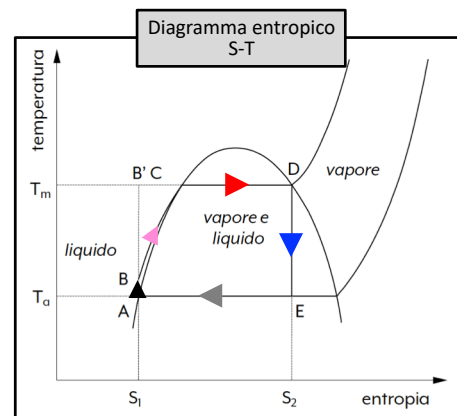
Cicli termici

Ciclo Rankine

- È il più semplice tra i cicli realizzabili
- 5 trasformazioni energetiche (fasi)
 - **Trasformazione adiabatica AB**: compressione dell'acqua tramite una pompa di alimento
 - **Trasformazione isobara BC**: riscaldamento dell'acqua alla temperatura T_m di vaporizzazione
 - **Trasformazione isobara-isoterma CD**: vaporizzazione in caldaia alla temperatura T_m
 - **Trasformazione adiabatica DE**: espansione del vapore in turbina
 - **Trasformazione isobara-isoterma EA**: condensazione del vapore nel condensatore alla temperatura T_a

$$\eta = \frac{\text{area}(ABCDEA)}{\text{area}(S_1ABCDES_2)}$$

{ Surriscaldamento del vapore
 Risurriscaldamento del vapore
 Rigenerazione dell'acqua di alimento
 Ciclo ipercritico



16

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

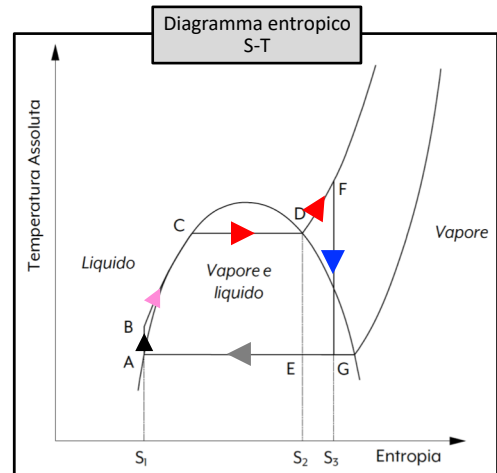
• **Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH)**

- Prima dell'espansione in turbina, la temperatura del vapore viene portata ad un valore superiore a quella posseduta dal vapore saturo secco ($T_F > T_D$)
- Il percorso del ciclo Rankine con surriscaldamento sul diagramma entropico è quindi ABCDFG
- Rendimento maggiore rispetto al ciclo standard senza surriscaldamento

$$\eta = \frac{\text{Area } ABCDFG}{\text{Area } S_1BCDFS_3} > \frac{\text{Area } ABCDE}{\text{Area } S_1BCDS_2}$$

↕

$$\eta = \frac{h_F - h_G}{h_F - h_B}$$



17

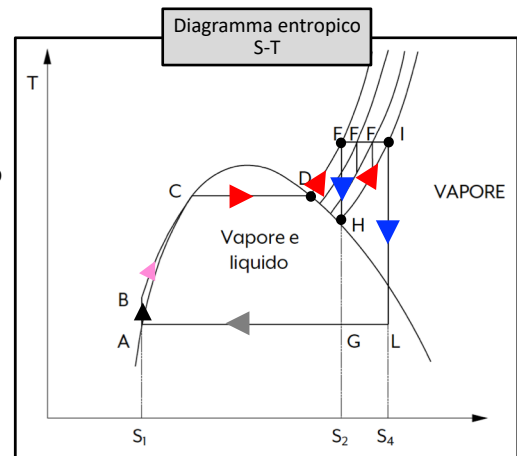
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

• **Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e risurriscaldamento (RH)**

- Ottenuto a partire da un ciclo Rankine con semplice surriscaldamento (SH)
- Il vapore viene riportato alla temperatura iniziale ($T_I = T_F$) dopo aver subito una parziale espansione in turbina (fino al punto H)
- Seconda fase di espansione (dal punto I al punto L)
 - Mistilinea ABCDFHIL
- Tale ciclo ha un rendimento superiore a quello con semplice surriscaldamento solo se

$$\frac{\text{Area } HILG}{\text{Area } S_2HIS_4} > \frac{\text{Area } ABCDFG}{\text{Area } S_1BCDFS_2}$$



18

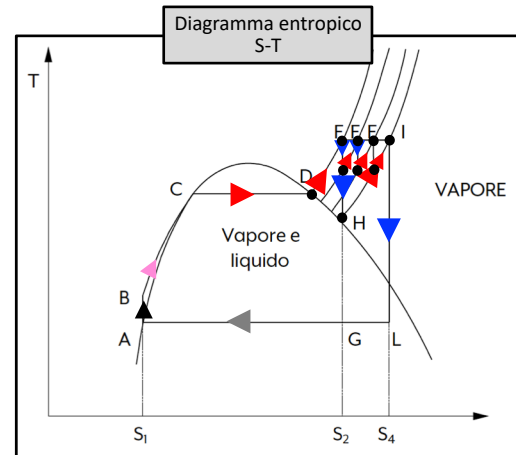
Cicli termici

• Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e risurriscaldamento (RH)

- Il rendimento del ciclo ideale con risurriscaldamento è calcolabile in relazione ai valori di entalpia corrispondenti ai vari punti del ciclo

$$\eta = \frac{(h_F - h_H) + (h_I - h_L)}{(h_F - h_B) + (h_I - h_H)}$$

- In linea teorica, effettuando più surriscaldamenti si possono ottenere ancora miglioramenti del rendimento
- Il risurriscaldamento richiede di riportare il vapore a pressione ridotta dalla turbina alla caldaia e viceversa → Alte temperature → Tubazioni costose e di grandi dimensioni (pressione $p_{HI} < p_{DF}$)
- Per ragioni costruttive ed economiche non conviene andare oltre il doppio risurriscaldamento (impiegato in cicli con pressioni ipercritiche, vedi slide successive)

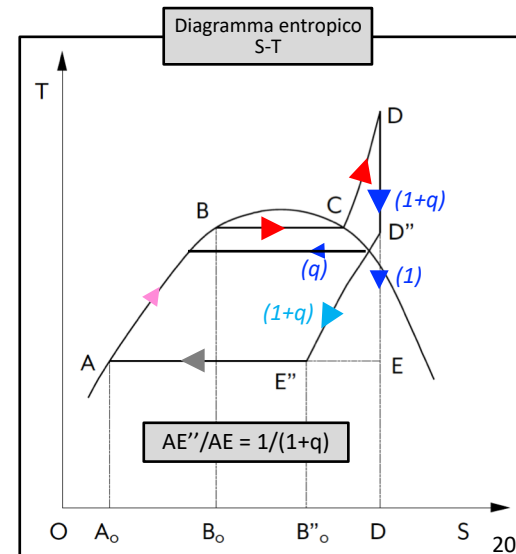


19

Cicli termici

• Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e rigenerazione termica

- Obiettivo di eliminare dal ciclo di Rankine il riscaldamento del liquido a spese del combustibile
- Si può realizzare parzialmente utilizzando vapore spillato da più punti della turbina, man mano che nella espansione esso raggiunge le condizioni più idonee per effettuare il riscaldamento del liquido
- Rappresentazione grafica del ciclo riferita ad una sottrazione di vapore continua
 - I valori dell'ascissa rappresentano l'entropia dell'intera massa del fluido anziché dell'unità di massa (in quanto parte del vapore è spillato dalla turbina)
 - Il rapporto AE''/AE è pari a quello tra massa di vapore che si scarica al condensatore e la massa totale che percorre la parte ABCDD'' del ciclo



20

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

• Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e rigenerazione termica

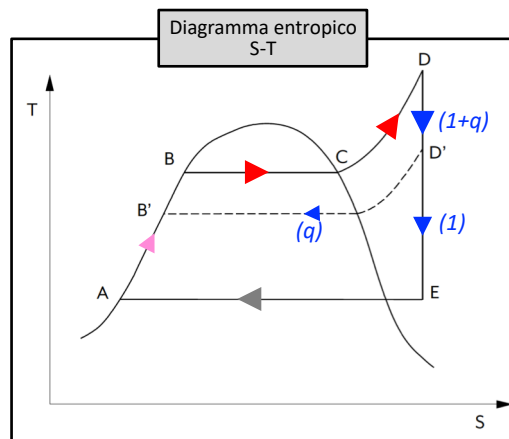
- Nella realtà lo spillamento non è continuo, quindi avviene ad esempio in corrispondenza del punto D'
- Il rendimento del ciclo è quindi calcolabile

$$\eta = \frac{(h_D - h_E) + q \cdot (h_D - h_{D'})}{(h_D - h_{B'}) (1 + q)}$$

- Equazione di equilibrio termico tra la quantità di vapore spillata (q) e la quantità d'acqua da riscaldare (1)

$$q(h_{D'} - h_{B'}) = (h_{B'} - h_A)$$

- È possibile esprimere il rendimento in modo che al numeratore e al denominatore si è aggiunto uno stesso addendo, proporzionale a q



$$\eta = \frac{(h_D - h_E) + q(h_D - h_{D'})}{(h_D - h_A) + q(h_D - h_{D'})}$$

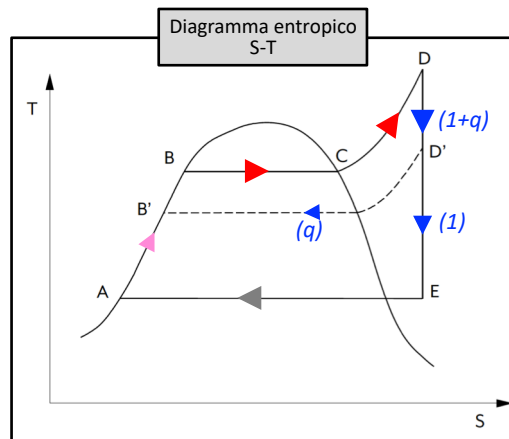
21

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

• Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e rigenerazione termica

- Il rendimento termodinamico del ciclo è tanto migliore quanto più grande è la quantità q del vapore spillato
- Oltre certi limiti, il rendimento complessivo decresce in quanto più vapore viene spillato e meno ne rimane a compiere lavoro in turbina
- Negli impianti moderni si effettuano solitamente 6÷7 spillamenti parziali
- A parità di potenza generata, occorre una portata maggiore di vapore in ingresso alla turbina (maggiore produzione di vapore da parte della caldaia)
 - Consumo di combustibile si riduce comunque in quanto la caldaia viene alimentata con acqua già riscaldata
- Il calore del vapore viene usato anche per pre-riscaldare l'aria comburente



$$\eta = \frac{(h_D - h_E) + q(h_D - h_{D'})}{(h_D - h_A) + q(h_D - h_{D'})}$$

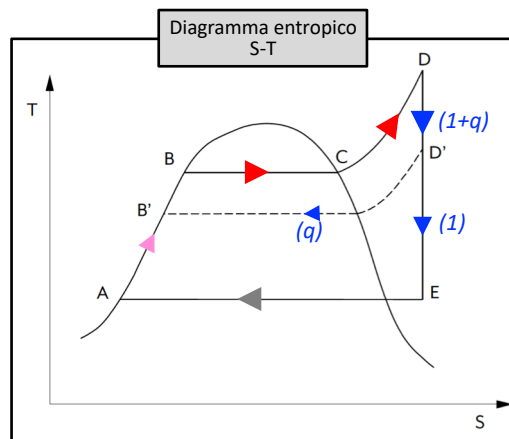
22

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

• Ciclo Rankine con surriscaldamento (SH) e rigenerazione termica

- Dal punto di vista della turbina, la sezione di flusso del vapore aumenta man mano che cala la pressione
- La rigenerazione ha il pregio di ridurre il volume di vapore negli ultimi stadi (Bassa Pressione, BP) nei quali si incontrano difficoltà nello smaltimento di grandi portate



$$\eta = \frac{(h_D - h_E) + q(h_D - h_{D'})}{(h_D - h_A) + q(h_D - h_{D'})}$$

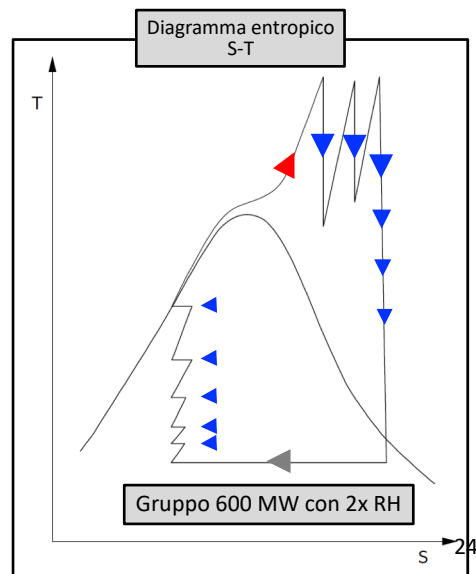
23

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

• Ciclo Rankine a pressione ipercritica

- Adozione di pressioni superiori a quella critica (progressi effettuati nel campo della metallurgia e della tecnica di costruzione dei generatori di vapore)
 - Adozione di generatori di vapore ad attraversamento meccanico e di pompe di alimentazione molto perfezionate
- L'acqua di alimento, dopo il preriscaldamento ad opera del ciclo termico (spillamenti), perviene al generatore di vapore a pressione superiore alla critica
- Attraversando le varie superfici di scambio passa dallo stato liquido direttamente a quello di vapore surriscaldato (pressione di 225,6 kg/cm² e temperatura di 374,2°C)
- È evidente nel diagramma l'incremento di area utile che si ottiene con l'adozione del ciclo ipercritico rispetto ad un ciclo ipocritico → Migliore rendimento
- Trade-off tra maggiori costi (sia installazione che gestione/manutenzione) e beneficio (rendimento)



24

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

<p>(a) Ciclo elementare $\eta = 40,1\%$</p>		
<p>(b) Ciclo con surriscaldamento (SH) del vapore $\eta = 43,3\%$</p>		

25

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Cicli termici

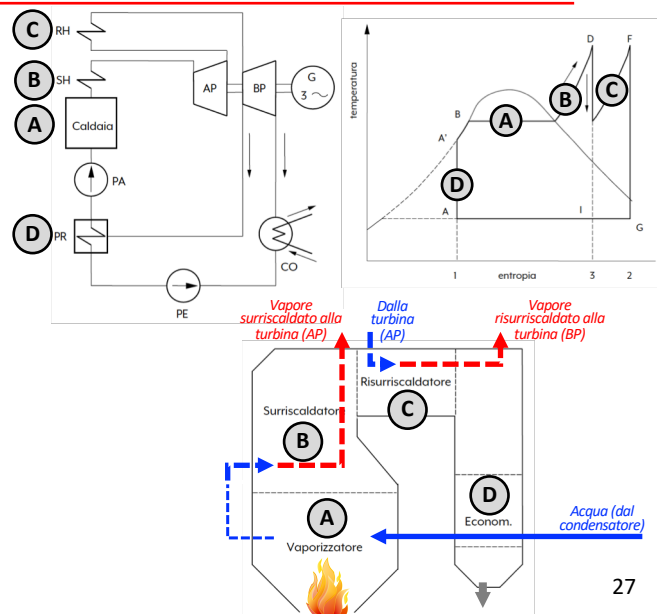
<p>(c) Ciclo con surriscaldamento (SH) del vapore e rigenerazione $\eta = 44,1\%$</p>		
<p>(d) Ciclo con surriscaldamento (SH) del vapore e risurriscaldamento (RH) $\eta = 45,3\%$</p>		

26

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Generatore di vapore (caldaia)

- Il generatore di vapore ha la funzione di trasformare l'energia contenuta nel combustibile in energia termica e di trasmetterla al fluido
 - **Stato liquido (acqua di alimento) → Vapore** (con determinate caratteristiche di pressione e temperatura)
- Classificazione:
 - **Combustibile:** carbone, nafta, metano, gas di scarico (recupero da forni) ecc.
 - **Sistema di alimentazione dell'aria comburente e di scarico dei fumi:** a tiraggio naturale, a tiraggio meccanico pressurizzato, aspirato o bilanciato
 - **Pressione di esercizio:** inferiore o superiore alla critica (225 ata, atmosfera tecnica), rispettivamente subcritiche e ipercritiche



27

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Generatore di vapore (caldaia)

- **Dati nominali:**
 - **Potenzialità:** quantitativo di vapore prodotto in un'ora, in [t/h]. Può raggiungere le 3.000-4.000 t/h per gli impianti di più grossa taglia
 - **Consumo specifico di vapore:** tanto più ridotto quanto più "spinto" è il ciclo termodinamico
 - 3 kg_{vap}/kWh per i più moderni gruppi termoelettrici convenzionali
 - 5-6 kg_{vap}/kWh per i gruppi termoelettrici nucleari (per questioni di sicurezza)
 - 10 kg_{vap}/kWh per i gruppi geotermoelettrici (bassa temperatura del vapore estratto dal sottosuolo)
 - **Superficie di riscaldamento:** area interposta fra i prodotti della combustione ed il fluido da scaldare, in [m²]
 - **Pressione di esercizio:** pressione nominale di funzionamento, in [kg/cm²] (o ata)
 - **Temperatura di esercizio:** temperatura del vapore in uscita dalla caldaia, in [°C]
 - **Carico termico superficiale:** quantità di calore che viene assorbita in un'ora da 1 m² di superficie di riscaldamento, in [Cal/m²h].
 - **Carico termico volumetrico:** quantità di calore che viene prodotto in un'ora in un m³ di camera di combustione, in [Cal/m³h]



28

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Generatore di vapore (caldaia)

• Gruppi termici unificati

- In Italia i gruppi termici sono unificati secondo le caratteristiche in tabella

MW	160	320	600	660
P [ate]	146	178	258	258
T [°C]	540	540	540	540

► Tabella 7.5 Valori unificati di pressione (in atmosfere tecniche relative) e di temperatura per i gruppi termici unificati in Italia

- I gruppi a potenza nominale più elevata sono a pressione ipercritica (>225 ate)
- La temperatura è invece fissata per tutte le taglie standard al valore di 540°C
 - Limite tecnico legato alle caratteristiche tecnologiche e di resistenza dei materiali usati



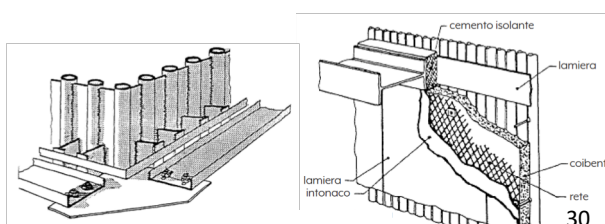
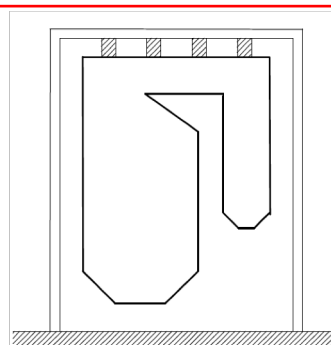
29

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Generatore di vapore (caldaia)

• Aspetti costruttivi

- L'avviamento di una caldaia è una fase critica dal punto di vista termico → Passaggio da temperatura ambiente a temperatura dell'ordine del migliaio di gradi centigradi
 - La dilatazione termica assume valori non trascurabili viste le dimensioni in gioco dei corpi metallici
- **Costruzione della caldaia sospesa dall'alto** ad una struttura metallica portante in travature metalliche
- I tubi costituenti il vaporizzatore presentano delle alette che permettono di saldarli uno all'altro al fine di formare le pareti di un involucro chiuso, ovvero la camera di combustione
- La superficie esterna, rivolta all'ambiente, viene opportunamente rivestita da coibentante solido allo scopo di limitare le dispersioni termiche (incidono sul rendimento della caldaia)



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Turbina

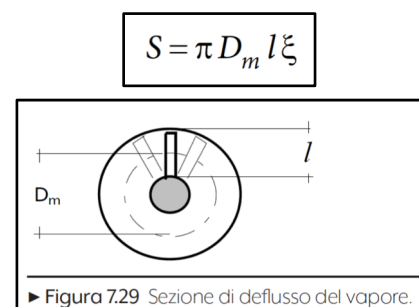
- **Elementi di classificazione**
 - **Direzione e forma della vena del vapore**
 - Turbine assiali (deflusso del vapore avviene secondo un cono con asse coincidente con l'asse della turbina)
 - Turbine radiali (deflusso del vapore in tutte le direzioni perpendicolari all'asse della turbina)
 - **Numero di elementi che costituiscono la turbina**
 - Turbine monocellulari (un distributore e una girante)
 - Turbine multicellulari (più coppie distributore-girante)
 - **Modalità di trasformazione dell'energia termica**
 - Turbine ad azione (trasformazione energetica da termica a cinetica esclusivamente nel distributore)
 - Turbine a reazione (trasformazione energetica da termica a cinetica avviene in parte nel distributore fisso ed in parte nelle palette della girante)
- Attualmente si usano prevalentemente turbine assiali, multicellulari, in parte costituite da elementi ad azione ed in parte a reazione

31

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Turbina

- **Velocità di rotazione**
 - Correlazione diretta con la frequenza di rete
 - Date le potenze in gioco è sconsigliabile l'uso di riduttori di tipo meccanico (affidabilità, dimensioni e rendimento) → Accoppiamento diretto turbina-alternatore
 - In **Alta Pressione (AP)**, il vapore è caratterizzato da volume specifico v_s molto ridotto per cui la sezione di deflusso richiesta è abbastanza modesta (coefficiente di ingombro $\xi < 1$)
 - Le palette non possono essere troppo corte per non creare giochi relativi troppo elevati con la cassa
 - La soluzione più semplice è quella di ridurre il diametro medio D_m della girante
 - Necessario rispettare la relazione tra la velocità assoluta del vapore in ingresso della girante e la velocità periferica della stessa (similmente a TSP nell'eolico)
 - Per contenere il numero degli stadi in serie occorre mantenere una velocità periferica adeguata
 - D_m contenuto → Velocità di rotazione elevata

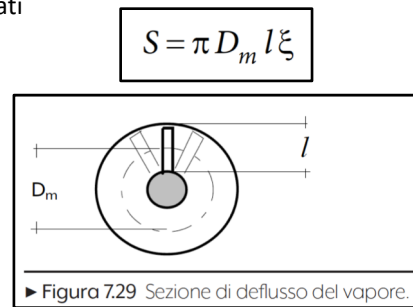
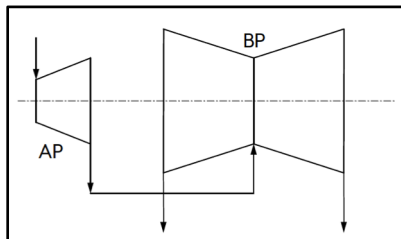


32

Turbina

• **Velocità di rotazione**

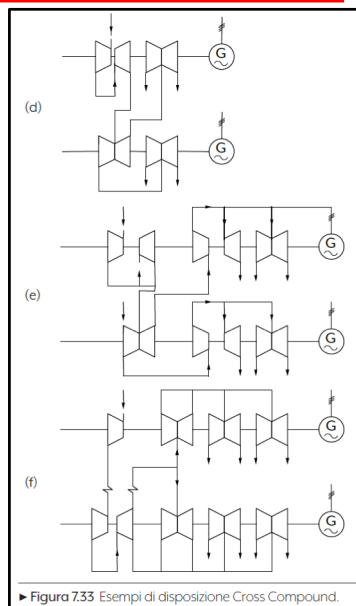
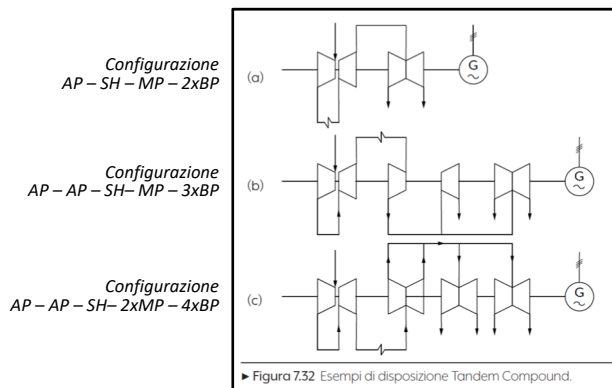
- Negli stadi **Bassa Pressione (BP)** le esigenze sono opposte perché il vapore ha elevato volume specifico
 - Sono richieste sezioni di deflusso elevate
 - Uso di diametri medi D_m e lunghezze delle palette l molto elevati
- Allo scopo di contenere le sollecitazioni di tipo centrifugo si renderebbe necessaria l'adozione di velocità di rotazione relativamente basse → Non compatibili con esigenze AP
 - Una soluzione alternativa prevede l'**installazione di più stadi BP in parallelo** → La sezione complessiva di deflusso richiesta allo scarico è ripartita fra 2 o più unità BP



Turbina

• **Disposizione dei corpi della turbina**

- **Tandem compound:** i vari corpi della turbina possono essere accoppiati di testa in modo da formare una sola linea d'albero (configurazione usata per gruppi fino a 600 MW)
- **Cross compound:** i vari corpi sono montati in due linee di albero distinte



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Turbina

Definizione di potenza della turbina

Taglia nominale 320 MW

- **Potenza nominale continua:** potenza garantita per funzionamento continuo, ossia è la potenza per la quale la macchina è stata progettata → Condizione di massimo rendimento
- **Potenza massima continua:** potenza erogata dalla turbina a valvole tutte aperte. In questa condizione la macchina non raggiunge il rendimento massimo
- **Potenza nominale di punta:** potenza che la turbina produce, nelle stesse condizioni della potenza nominale continua, con il riscaldatore di più alta pressione escluso ed eventualmente il successivo parzializzato in modo da ottenere una diminuzione massima di temperatura dell'acqua di alimento di 60 °C rispetto al valore che si ha con tutti i riscaldatori in servizio (ovvero con spillamenti parzialmente non utilizzati)
 - Maggiore quantità di vapore che lavora in turbina → Aumento della potenza (ma diminuzione del rendimento per il riscaldamento del liquido in ingresso)
- **Potenza massima di punta:** potenza che si ottiene con valvole tutte aperte e con riscaldatori di alta pressione esclusi (come nel caso precedente). La macchina deve normalmente poter funzionare almeno 500 ore in queste condizioni
- **Potenza minima continua o minimo termico:** minima potenza realizzabile in condizioni di sicurezza, con macchina in servizio continuo (es. limite per eccessivo riscaldamento della cassa della turbina BP)

321 MW

328 MW

343 MW

349 MW

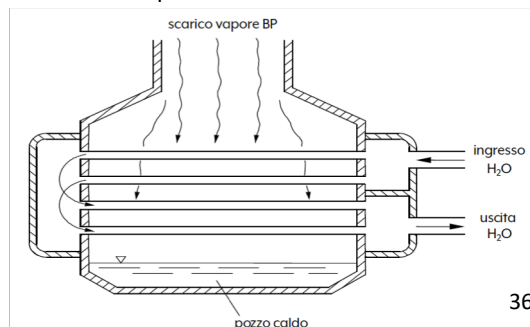
150 MW

35

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Condensatore

- Il condensatore è un grande scambiatore di calore con una triplice funzione
 - Consentire l'espansione del vapore fino ad un valore di pressione inferiore a quella atmosferica
 - Aumentare l'area del ciclo funzionale, con conseguente aumento del rendimento complessivo
 - Recuperare, sotto forma di acqua di condensazione, gran parte del vapore impiegato
 - Costituire una riserva di acqua utile a fronteggiare brusche variazioni di portata nel ciclo termico
- Per le depressioni interne, il condensatore è composto da un involucro in lamiera di acciaio saldata, con pareti opportunamente rinforzate per resistere alla pressione a cui è sottoposto dall'esterno verso l'interno (resistenza a schiacciamento).
- Il condensatore riceve lo scarico della turbina (BP)
- Il vapore nella parte mediana lambisce un fascio tubiero nel quale circola l'acqua di raffreddamento e cede all'acqua che li percorre il suo calore latente di evaporazione, si condensa e diminuisce notevolmente di volume → Formazione di un certo grado di vuoto all'interno del condensatore
- La condensa del vapore viene raccolta nella parte inferiore del condensatore, detta pozzo caldo

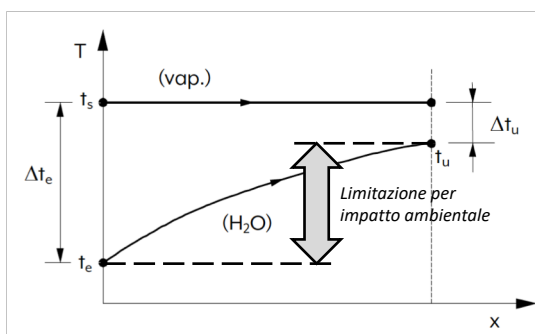


36

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Condensatore

- Peculiarità del condensatore:
 - Modesto salto termico tra i due fluidi:** vapore 30-40°C a 0,05 kg/cm² e acqua refrigerante alla temperatura di 5-25°C (in funzione delle caratteristiche del sito e della stagione)
 - Grande quantità di calore da scambiare** (calore latente di evaporazione è 560 kcal/kg di vapore)
 - Per un gruppo da 320 MW si ha circa 600 t/h di portata vapore al condensatore
 - Grande dimensione della superficie di scambio termico**
 - Per un gruppo da 320 MW, 16.000 m² di superficie di scambio, circa 17.000 tubi con diametro 1''
 - Grande portata di acqua di raffreddamento necessaria per condensare il vapore**
 - Salto termico medio dell'acqua di raffreddamento $\Delta t = 8-9^\circ\text{C}$
 - Per asportare le 560 kcal occorrono 70-100 litri di acqua per ogni kg di vapore

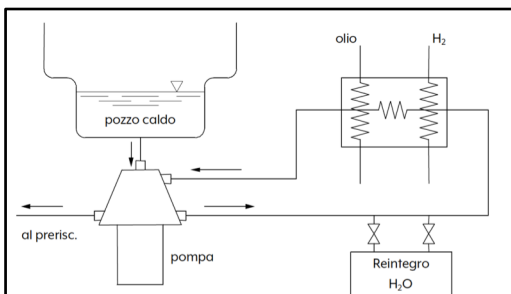


37

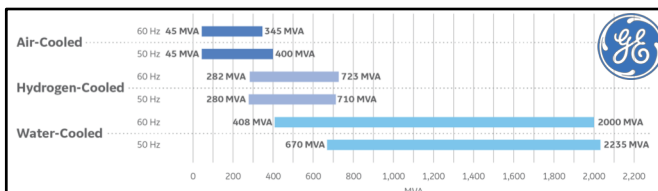
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Condensatore

- Il condensatore costituisce l'anello di collegamento tra il circuito fluido operativo (acqua-vapore) ed il fluido di raffreddamento (acqua)
- A valle del condensatore è installata la **pompa di estrazione del condensato**, che è dotata di due distinte mandate
 - La prima mandata verso i pre-riscaldatori rigenerativi
 - La seconda mandata alimenta un **circuito di recupero del calore ceduto dai fluidi di raffreddamento del gruppo** (olio di lubrificazione dei cuscinetti e raffreddamento turboalternatore, es. idrogeno)



► Figura 7.37 Circuito di estrazione.

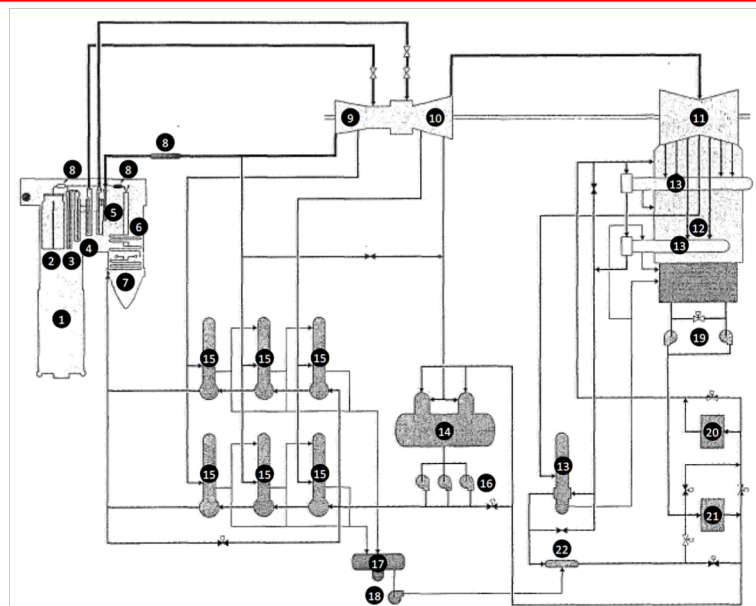


- Trattamento dell'acqua di reintegro (resine cationiche e resine anioniche)
- Pompe di alimento
- Degasatore

38

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Sintesi del circuito acqua-vapore



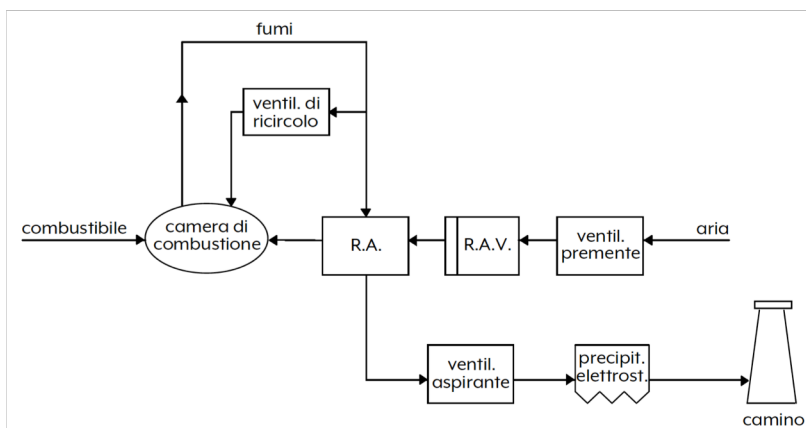
1. Camera di combustione
2. Corpo cilindrico
3. Surriscaldatore a piastre
4. Surriscaldatore di media e alta temperatura
5. Risurriscaldatore
6. Surriscaldatore di bassa temperatura
7. Economizzatore
8. Desurriscaldatori
9. Turbina-Cilindro alta pressione (AP)
10. Turbina-Cilindro media pressione (MP)
11. Turbina-Cilindro bassa pressione (BP)
12. Condensatore
13. Riscaldatori bassa pressione
14. Degasatore
15. Riscaldatori alta pressione
16. Pompe di alimento
17. Serbatoio espansione drenaggi
18. Pompe ripresa drenaggi
19. Pompe di estrazione del condensato
20. Impianto letti misti del condensato
21. Impianto di filtrazione del condensato
22. Miscelatore

39

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito combustibile/aria-fumi

- Il circuito combustibile/aria-fumi comprende tutti i transiti di massa che forniscono combustibile e comburente alla camera di combustione, fino allo scarico dei prodotti di risulta della combustione (fumi) in atmosfera tramite il camino
- Sono compresi:
 - Camera di combustione
 - Circuito di alimento del combustibile
 - Ventilatori di ricircolo, premente e aspirante
 - Riscaldatori dell'aria tramite fumi (R.A.) e tramite vapore (R.A.V.)
 - Sistema di trattamento fumi: antiparticolato, deSO_x, deNO_x
 - Camino



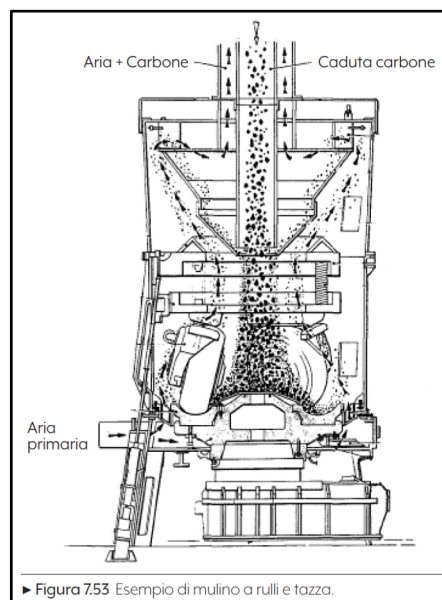
40

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito di alimento del combustibile

• Combustibile solido (carbone)

- Il carbone è un materiale fossile derivante da processi di trasformazione di materiale organico vegetale in condizioni particolari: elevate pressioni, elevate temperature e assenza di ossigeno
- Dal punto di vista temporale si definisce il **rango** del carbone: torba è il più recente, antracite è quello di formazione più antica
- Il tipo di materiale biologico di origine dal quale il carbone deriva ne determina il **pregio**
- Una qualità determinante del carbone è il **tenore di zolfo** in esso presente → Filtraggio deSO_x → Vietato uso di carboni con quantità di zolfo >1%
- Per migliorare la combustione, il carbone viene macinato in forma di **polverino impalpabile** (dopo la rimozione di corpi metallici estranei mediante magneti)
- Necessari **filtri anti-particolato**



41

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito di alimento del combustibile

• Combustibile solido (carbone)

		Sul secco				
		Immediata	Elementare			
				Pezzature al mulino	mm	0÷50
Umidità totale	%	-	7,0	Macinabilità Hardgrove		48÷75
Ceneri	%	10	9,3	Temperatura rammollimento ceneri	°C	1270
Materie volatili	%	33	-	Potere calorifico superiore sul secco	kCal/kg	7250
Carbonio fisso	%	57	-	Potere calorifico inferiore sul secco	kCal/kg	6993
Zolfo	%		0,7	Potere calorifico inferiore sul tale quale	kCal/kg	4665
Carbonio	%		68,4			
Idrogeno	%		4,6			
Ossigeno (e azoto)	%		10,0			
		100,0	100,0			

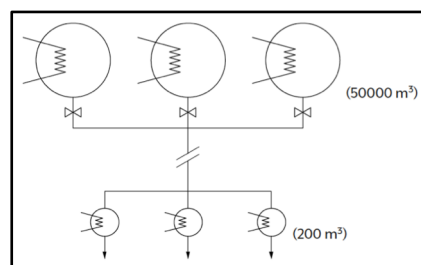
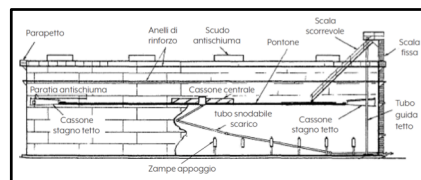
42

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito di alimento del combustibile

• Combustibile liquido

- Può essere impiegata la frazione pesante del petrolio grezzo
- È consentito l'utilizzo di olio combustibile con tenore di zolfo <3% (limite meno stringente rispetto al carbone perché il combustibile liquido causa meno problemi in termini di particolato solido)
- Stoccaggio principale in serbatoi cilindrici a tetto galleggiante di grande capacità (50.000 m³) → Si evita la formazione di miscele esplosive di sostanze volatili e aria
- L'olio combustibile, a bassa temperatura, diventa troppo denso per circolare nelle tubazioni
 - Si definisce punto di scorrimento la temperatura minima alla quale l'olio è fluido
 - Sul fondo dei serbatoi e su tutte le condutture di adduzione sono installate delle serpentine riscaldanti
- Ulteriori recipienti di minore dimensione (200÷300 m³) dove l'olio viene ulteriormente riscaldato fino a raggiungere una sufficiente fluidità per l'immissione in bruciatore (150°C)



43

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito di alimento del combustibile

• Combustibile liquido

- Nelle fasi di accensione della caldaia e per bruchi aumenti di carico si impiega olio combustibile leggero (gasolio) → Accorciamenti dei transitori termici
- Interessanti le caratteristiche dell'olio a basso tenore di zolfo (BTZ)
 - Minori richieste si trattamenti deSO_x
 - Purtroppo punto di scorrimento decisamente maggiore rispetto agli altri due olii → Maggiore consumo per il mantenimento della temperatura minima del fluido

Tipo di olio	Olio denso	Olio leggero	Olio a basso tenore di zolfo (BTZ)
Peso specifico a 15°C (g/cm ³)	0,950	0,830	0,850-0,995
Viscosità a 50°C (GR E)	20	1-2	40
Zolfo (%)	3	2	1
Azoto (%)	0,5		0,5
Ossigeno (%)	1,0		1,0
Idrogeno (%)	11,5		12,5
Carbonio (%)	84,0		84,0
Vanadio e sodio (p.p.m.)	200		120 e 100
Potere calorifico inferiore (kcal/kg)	9.750	10.500	9.800
Punto di infiammabilità (°C)	65	65	65
Punto di scorrimento (°C)	10	-10	30-45
Sedimenti e acqua vol. (%) max.	1		1

44

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Circuito di alimento del combustibile

• Combustibile gassoso

- Generalmente presente in sacche sotterranee, associato a giacimenti petroliferi
- Il trasporto e lo smistamento avvengono attraverso una fitta rete di gasdotti in pressione, assimilabile, per struttura, alla rete elettrica
- Ha acquisito un crescente interesse negli ultimi anni, fino a diventare il combustibile fossile largamente più utilizzato in Italia (nel 2016, circa il 40% della produzione elettrica, contro il 10% del carbone ed il 5% circa degli altri combustibili)
- Combustibile fossile col minore impatto ambientale (uranio escluso)
- Limiti di disponibilità nel prossimo futuro?

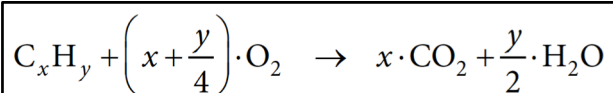
Metano (%)	94,0%
Idrocarburi superiori calcolati come metano (%)	2,35%
Azoto (%)	3,2%
Peso specifico (kg/Nmc)	0,711
Potere calorifico superiore (kcal/Nmc)	9.065
Potere calorifico inferiore (kcal/Nmc)	8.170

45

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione

- La combustione è un processo, chiaramente irreversibile, di combinazione di alcuni elementi con ossigeno, in debite proporzioni
- La reazione avviene in maniera quasi istantanea ed è fortemente esotermica
- Gli elementi combustibili sono carbonio (C), idrogeno (H) e zolfo (S)
- La combustione dello zolfo produce più effetti indesiderati (fumi, anidride solforica) che calore
- Le reazioni per i singoli elementi sono
 - Carbonio $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 7.862 \text{ kcal}/(\text{kg di C})$
 - Idrogeno $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O + 33.915 \text{ kcal}/(\text{kg di } H_2)$
 - Zolfo $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{quantità di calore trascurabile}$
- Le reazioni per gli elementi composti (es. gas naturale) sono del tipo



46

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni

Numero di massa A
Elemento
Numero atomico Z

47

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni

- **Ossigeno teorico**
 - La quantità di ossigeno teorico O_t si ottiene
 - Sommando le quantità di ossigeno (portata di massa) necessarie al completamento delle singole reazioni di ossidazione dei vari elementi presenti nel combustibile (carbonio, zolfo, idrogeno)
 - Carbonio $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \text{Energia}$ $a = W_c C\% \frac{16+16}{12} = W_c C\% \frac{8}{3}$, in [kg/h]
 - Zolfo $S + O_2 \rightarrow SO_2 + \text{Energia (pochissima)}$ $b = W_c S\% \frac{16+16}{32} = W_c S\% 1$, in [kg/h]
 - Idrogeno $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O + \text{Energia}$ $c = W_c H\% \frac{16+16}{2 \times 2} = W_c H\% 8$, in [kg/h]
 - Detraendo l'ossigeno già esistente nel combustibile $d = W_c O_2\%$, in [kg/h]

$$O_t = a + b + c - d, \quad \text{in [kg/h]}$$

48

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni

• Quantità di aria di alimento

- In caldaia viene inviata aria e non ossigeno puro
- Necessario determinare la **quantità di aria teorica** A_t , tenuto conto della quantità di ossigeno comunemente presente nell'aria (23,15%)

$$A_t = O_t \frac{1}{0,2315}, \quad \text{in [kg/h]}$$

- La combustione deriva da un processo probabilistico di incontro tra atomi di comburente e di combustibile
- Per favorire la completa combustione si deve fornire un certo **eccesso percentuale di aria** $\epsilon\%$ in funzione della natura del combustibile
 - Maggiore è la fluidità del combustibile, minore è l'eccesso di aria necessario (15% per carbone, 6% per olio combustibile, 4% per il gas naturale)
- La **quantità di aria secca da inviare in camera di combustione** è quindi pari a A_{ef}

$$A_{ef} = A_t (1 + \epsilon\%), \quad \text{in [kg/h]}$$

49

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni

• Quantità di acqua nell'aria di alimento

- L'aria di alimento prelevata dall'ambiente contiene sempre un certo **tenore di umidità**, più o meno elevato in relazione al luogo di installazione e alle condizioni climatiche
- La quantità di vapore contenuto in 1 m³ di aria satura, a 20°C, vale $\rho_{vs} = 14,75 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
- L'aria secca a temperatura e pressione standard ha
 - V_m è il volume molare standard (22,41 dm³/mol)
 - m_m è la massa molare media (28,96 g/mol) del (condizioni STP).
- Noto il valore ambientale dell'umidità relativa UR%, la **quantità d'acqua introdotta nella camera di combustione** si calcola

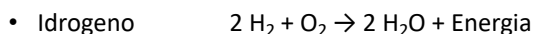
$$[H_2O] = \left(A_{ef} \frac{V_m}{m_m} \right) \rho_{vs} UR\%, \quad \text{in [kg/h]}$$

50

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni• **Portata dei fumi in uscita dalla caldaia**

- La portata dei fumi in uscita dalla caldaia è calcolabile singolarmente per prodotto della combustione



$$Q_{H_2O} = [H_2O] + W_c H\% \frac{2x(2+16)}{2x2} = [H_2O] + W_c H\% 9, \quad \text{in [kg/h]}$$

- È necessario considerare l'eccesso intenzionale d'aria $\epsilon\%$ → Uscita verso il camino di una piccola quantità di ossigeno

$$Q_{O_2} = O_f \epsilon\%, \quad \text{in [kg/h]}$$

- Oltre al combustibile, anche l'aria in ingresso contiene una parte di azoto N_2 (76,85%)

$$Q_{N_2} = 0,7685 A_{ef} + W_c N_2\%, \quad \text{in [kg/h]}$$

$$Q_f = Q_{CO_2} + Q_{SO_2} + Q_{H_2O} + Q_{N_2} + Q_{O_2}, \quad \text{in [kg/h]}$$

51

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni• **Portata dei fumi in uscita dalla caldaia**

- Analogamente a prima, per determinare le portate volumetriche è necessario
 - Moltiplicare per il volume molare standard del gas V_m (22,41 dm³/mol)
 - Dividere per la massa molare m_m espressa in [g/mol]
- Il valore Q_{fN} che si ottiene è valido in condizioni standard, cioè ad 1 atm e 0°C
 - Viene indicato in normalmetricubi/ora [Nm³/h]
- Tenendo conto della temperatura in caldaia si devono moltiplicare le portate volumetriche per un opportuno coefficiente di riporto

$$Q_{fT} = Q_{fN} \frac{t_f + 273}{273}, \quad \text{in [m}^3/\text{h]}$$

52

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Caratterizzazione della combustione – Calcolo delle emissioni

• Particolato solido

- Tra i prodotti della combustione figura anche il particolato solido
- La **portata ponderale del particolato emessa dal camino** Q_{part} è pari a quella prodotta dalla combustione, tolte le parti che non giungono fino al camino
 - Ceneri%: tenore di ceneri prodotte dalla combustione (contenute nel combustibile)
 - C_{fc} %: percentuale di ceneri che si depositano a fondo caldaia
 - C_{ec} %: percentuale di ceneri che si depositano sull'economizzatore
 - C_{pa} %: percentuale di ceneri che si depositano sul preriscaldatore dell'aria
 - C_{filtro} %: percentuale di ceneri trattenute dai filtri

} Peso relativo piuttosto contenuto

$$Q_{part} = W_c \cdot C_{eneri}\% \cdot (1 - C_{fc}\%) \cdot (1 - C_{ec}\%) \cdot (1 - C_{pa}\%) \cdot (1 - C_{filtro}\%), \quad \text{in [kg/h]}$$

- Dalla conoscenza degli elementi sopra ricavati è possibile procedere al dimensionamento dei condotti, della camera di combustione, dei ventilatori di alimentazione ed estrazione, dei filtri precipitatori e del camino

53

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Dimensionamento della camera di combustione

- La camera di combustione è costituita da fasci accostati di tubi evaporatori
- Il **volume della camera di combustione** per un impianto termoelettrico di taglia P_e (potenza elettrica generata) è determinabile direttamente

$$V = \frac{\Delta t}{3600} \cdot W_c \cdot V_g \cdot \frac{T}{273}, \quad \text{in [m}^3\text{]}$$

- Δt è il **tempo di combustione**, in [s]. La combustione completa richiede che il combustibile permanga in camera di combustione un certo tempo Δt (non trascurabile)

$$\Delta t = 0.1 + \delta t \left(r^{1.5+2}, \frac{1}{\sqrt{T}} \right), \quad \text{in [s]}$$

Combustione della frazione volatile del combustibile

Combustione della parte solida (carbone) o liquida (olio), tempo dipendente dal raggio r delle particelle e della temperatura assoluta T

54

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Dimensionamento della camera di combustione

- La camera di combustione è costituita da fasci accostati di tubi evaporatori
- Il **volume della camera di combustione** per un impianto termoelettrico di taglia P_e (potenza elettrica generata) è determinabile direttamente

$$V = \frac{\Delta t}{3600} \cdot W_c \cdot V_g \cdot \frac{T}{273}, \quad \text{in [m}^3\text{]}$$

- W_c è la **portata del combustibile**, in [kg/h]
 - È calcolabile dalla potenza elettrica generata P_e , in [MW], e dal tipo di combustibile utilizzato, ovvero dal potere calorifico inferiore P_{ci} , in [kCal/kg]
 - **Potenza termica** richiesta dalla centrale, assumendo il rendimento complessivo di centrale η
 - **Energia termica** E_t richiesta in 1 ora di funzionamento, in [kCal/h]
 - Portata del combustibile W_c , in [kg/h]

$$P_t = P_e \cdot \frac{1}{\eta}, \quad \text{in [MW]}$$

$$E_t = P_t \cdot 1 \cdot 860 \cdot 10^3, \quad \text{in [kCal/h]}$$

$$W_c = E_t \cdot \frac{1}{P_{ci}}, \quad \text{in [kg/h]}$$

55

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Dimensionamento della camera di combustione

- La camera di combustione è costituita da fasci accostati di tubi evaporatori
- Il **volume della camera di combustione** per un impianto termoelettrico di taglia P_e (potenza elettrica generata) è determinabile direttamente

$$V = \frac{\Delta t}{3600} \cdot W_c \cdot V_g \cdot \frac{T}{273}, \quad \text{in [m}^3\text{]}$$

- V_g è **volume di gas sviluppato da 1 kg di combustibile**, in [m³/kg]
 - Si determina, noto il combustibile, a partire dal calcolo della portata volumetrica dei fumi, in [m³/h]

$$V_g = Q_{fT} \cdot \frac{1}{W_c}, \quad \text{in [m}^3\text{/kg]}$$

56

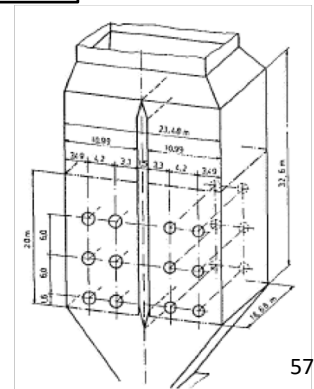
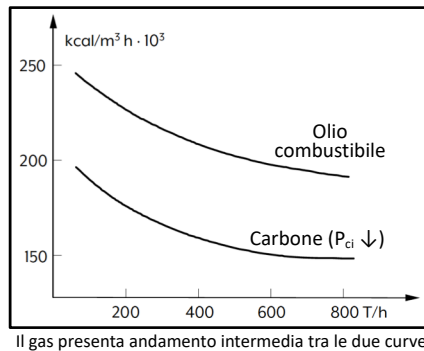
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Dimensionamento della camera di combustione

- Si può effettuare una verifica dei valori individuati attraverso il calcolo del **carico termico volumetrico** definito dalla formula

$$C = \frac{W_c \cdot P_{ci}}{V} = \frac{3600 \cdot W_c \cdot P_{ci}}{\Delta t \cdot W_c \cdot V_g \cdot \frac{T}{273}} = \frac{3600 \cdot P_{ci}}{\Delta t \cdot V_g \cdot \frac{T}{273}}, \quad \text{in [kcal/m}^3\text{h]}$$

- Tale parametro può essere confrontato con dati bibliografici o desumibili dall'esperienza
- Il carico termico dipende dal **tipo di combustibile** (P_{ci}) e dal **tempo di combustione** (Δt), ma non dipende dalla portata di combustibile (W_c)
- In genere il carico termico ha **andamento decrescente con la taglia del gruppo**



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Trattamento dei fumi

- Vincoli legali per quanto riguarda la composizione dei fumi scaricati nell'ambiente
- In passato la normativa prendeva in considerazione solamente le immissioni di inquinanti nell'ambiente in termini di **concentrazione al suolo in prossimità all'impianto**
 - Possibile eludere le finalità della normativa con un opportuno sovradimensionamento dell'altezza del camino → Spargimento delle sostanze inquinanti su un'area maggiore
- Sia la direttiva CEE del 1985 che il DM del 1987 fanno invece riferimento alle **emissioni al camino**

	Carbone (Tenore di zolfo 0,5-1%)	Olio Combustibile (Tenore di zolfo 0,5-3%)	Gas Naturale
SO ₂	1300-1800	1400-4300	--
NO _x	890	870	840
CO	44	38	26
PTS	100-200	70-200	--

Emissioni gassose, espresse in [mg/Nm³], valutate in condizioni di normalità per gli impianti termoelettrici tradizionali (senza sistemi di trattamento fumi)

Combustibile		Solido	Liquido	Gassoso
Emissioni [Mg/Nm ³]	SO _x	250	250	35
	NO _x	200	150	100
	PTS	50	50	5

Valori limiti proposti dalla CEE per le emissioni medie di SO₂, NO_x e polveri sospese nei fumi di scarico di impianti di combustione con potenza termica superiore a 300 MW

- In genere, le emissioni gassose di un impianto termoelettrico, comprese le polveri totali sospese PTS, eccedono ampiamente i valori limite → **Necessario il trattamento dei fumi**

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Trattamento dei fumi

- **Sistema di trattamento dei fumi**
 - **Sistemi di abbattimento del particolato solido** (polveri sospese trasportate)
 - Precipitatori meccanici
 - Filtri a manica
 - Precipitatori elettrostatici
 - **Sistemi di desolforazione** (deSO_x)
 - Prima della combustione
 - Durante la combustione
 - Dopo la combustione →
 - **Sistemi di denitrificazione** (deNO_x)
 - Desolforazione a umido non rigenerativi (con recupero), a calce/calcare e con ammoniaca (processo Walther)
 - Desolforazione a umido rigenerativi (con recupero), con bisolfito sodico (processo Wellman-Lord)
 - Desolforazione a semi-secco (senza recupero), con calcare/calce (processo spray-dry)

59

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori meccanici

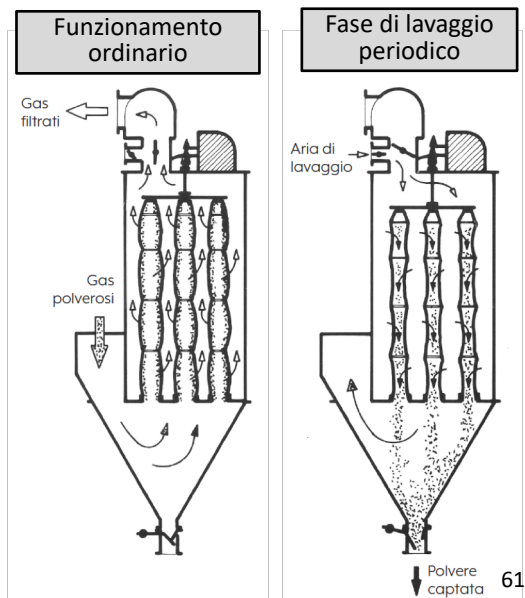
- I precipitatori meccanici sono adatti a rimuovere solo polveri grossolane (raggio equivalente superiore a 10 µm, ovvero particelle di dimensioni più grandi del PM10)
 - Si applicano a caldaie con focolare a griglia
- Sono inefficaci contro le polveri fini, quindi non trovano applicazione negli impianti termoelettrici attuali

60

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Filtri a manica

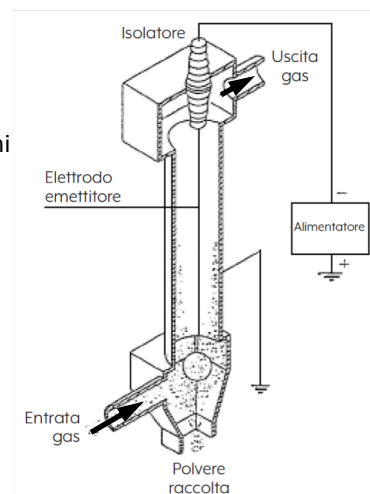
- Sono apparecchiature ad emissione costante, qualunque sia la polverosità dei gas
 - Risultano adatti soprattutto per centrali termoelettriche in cui la depolverizzazione viene effettuata a valle del trattamento deSO_x con modalità spray-dry
- I filtri sono realizzati con tessuto in fibra di vetro rivestita in grafite o teflon
- I filtri a tessuto (o a manica) hanno elevata efficienza ma comportano oneri di esercizio significativi (pulizia periodica, sostituzione degli elementi)
 - Elementi costosi e con vita media piuttosto breve (2-3 anni) a causa dell'azione aggressiva degli elementi contenuti nei fumi
 - Il lavaggio frequente è necessario a evitare un peggioramento delle capacità di filtraggio e delle perdite di pressione sul circuito fumi



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

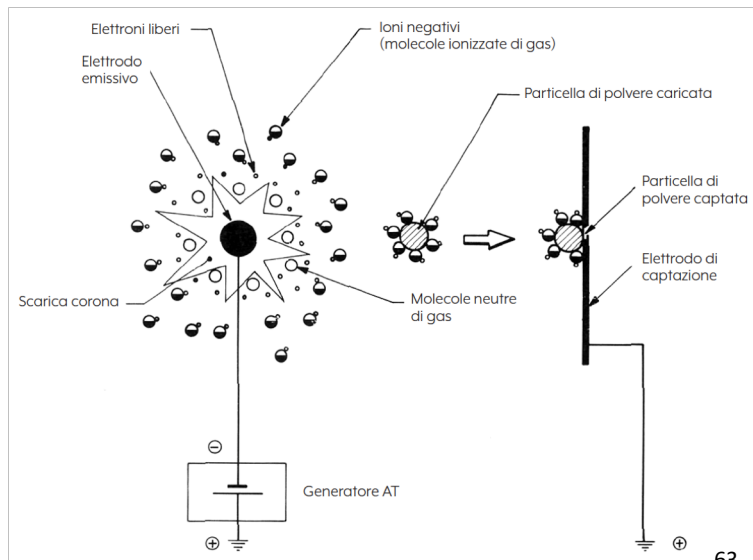
- I precipitatori elettrostatici costituiscono la soluzione tecnica più diffusa negli impianti attuali
 - Rendimenti di captazione ed affidabilità elevate
 - Minima resistenza al passaggio del gas (molto minore rispetto agli altri due sistemi precedenti) → Perdita di carico trascurabile sul circuito fumi
- Un filo metallico è sospeso all'interno del corpo cilindrico verticale
- Il filo è isolato dal corpo del filtro tramite un isolatore passante
- Si applica una differenza di potenziale continua tra filo e carcassa metallica (10s di kV) → Elettrodo emittore negativo
- Campo elettrico a simmetria cilindrica → Apprezzabile effetto corona intorno al filo
- Le micro-scariche parziali producono una certa ionizzazione del mezzo dielettrico (aria)
 - Gli ioni positivi vengono richiamati dal filo
 - Ioni negativi ed elettroni vengono accelerati dal campo elettrico verso la parete cilindrica



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

- La concentrazione di elettroni è massima ai margini della zona dove si manifesta l'effetto corona
- Ioni negativi ed elettroni, fortemente accelerati in direzione radiale, urtano le particelle di pulviscolo e vi aderiscono
 - Le particelle (caricate -) vengono attratte dalla parete cilindrica ed si depositano → Rimozione dei depositi con sistemi meccanici

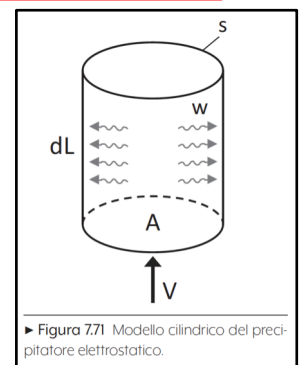


63

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

- Modello semplificato per la determinazione del rendimento del dispositivo
- Forma cilindrica per semplicità di trattazione → Campo elettrico radiale
- Si analizza un tratto di condotto cilindrico di lunghezza dL
 - N_0 : numero di particelle solide in ingresso
 - N : numero di particelle solide in uscita
 - A : sezione del condotto
 - s : circonferenza del condotto
 - V : velocità assiale dei fumi
 - w : velocità di attrazione del pulviscolo verso le pareti
- Vale la relazione di Deutsch (dN/N), la cui integrazione consente di determinare l'efficacia del precipitatore elettrostatico



$$\frac{dN}{N} = -\frac{s \cdot w \cdot dL}{A \cdot V} \xrightarrow{\text{Integrale lungo la direzione longitudinale}} N = N_0 \cdot e^{-\frac{swL}{Av}}$$

64

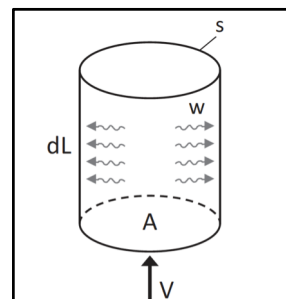
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

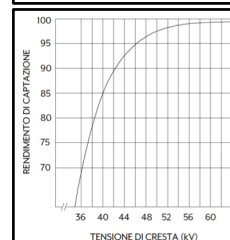
- Il **rendimento di captazione** è il rapporto tra quante particelle entrano e sono captate ($N_0 - N$) rispetto a quante entrano nel dispositivo (N_0)

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\frac{swL}{Av}}$$

- Si osserva che, affinché l'efficienza sia elevata (99,5-99,7%), occorre che il termine esponenziale sia piccolo, ovvero che l'esponente sia grande in modulo
 - Ridurre il diametro delle tubazioni cilindriche** → Il denominatore ($A \equiv D^2$) cala più velocemente del numeratore ($s \equiv D$)
 - Aumentare la superficie utile di captazione in senso longitudinale (L)**
 - Incrementare la velocità trasversale w delle particelle intensificando il campo elettrico**, ovvero la tensione di alimentazione
 - Saturazione nel rapporto rendimento/tensione (si aumenta anche il rischio di scarica tra elettrodi e carcassa)
 - Applicando una **tensione di alimentazione impulsiva** anziché continua



► Figura 7.71 Modello cilindrico del precipitatore elettrostatico.

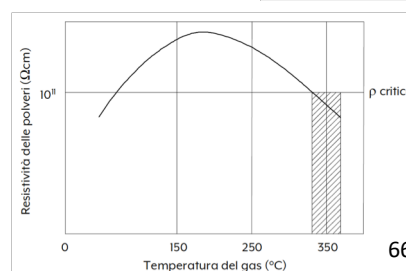
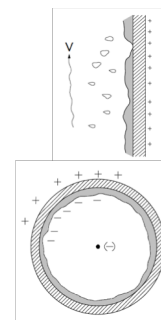


65

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

- L'efficienza η dipende molto anche dalla resistività superficiale delle particelle (range 10^8 - 10^{11} Ωcm)
 - Se la **resistività superficiale è troppo bassa**, le particelle tendono a cedere con una certa facilità la loro carica negativa alla parete positiva. Tornate elettricamente neutre, si staccano dalla parete e sono trascinate dai fumi
 - Se la **resistività è troppo elevata**, il particolato aderisce tenacemente alla parete rendendo difficoltosa l'operazione di rimozione meccanica (battitori). Inoltre, il deposito già esistente tende a respingere gli elettroni emessi dall'elettrodo filiforme, attenuando così l'effetto filtrante (back-corona)
- Fattori che influenzano maggiormente la resistività superficiale ρ
 - Composizione chimica:**
 - $\rho \uparrow$ in presenza di SiO_2 o Al_2O_3 (combustione del carbone)
 - $\rho \downarrow \downarrow$ in presenza di sostanze alcaline (come Na, K, Li)
 - Concentrazione di SO_2 :** $\rho \uparrow$ se presenza di SO_2 nei fumi $\downarrow \rightarrow$ Il contenimento della SO_2 impatta negativamente sull'efficienza di conversione nella captazione delle polveri
 - Temperatura dei fumi**

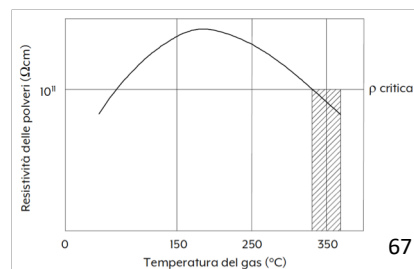


66

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

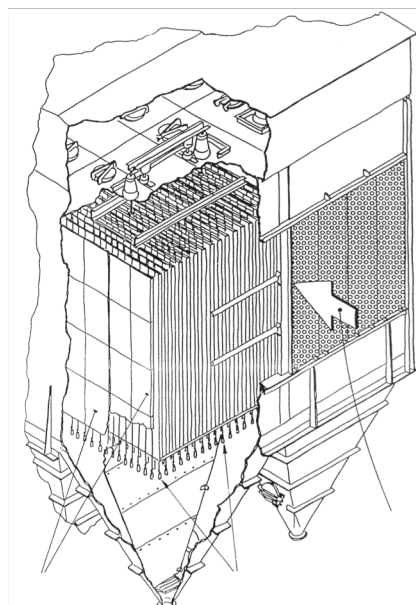
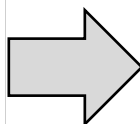
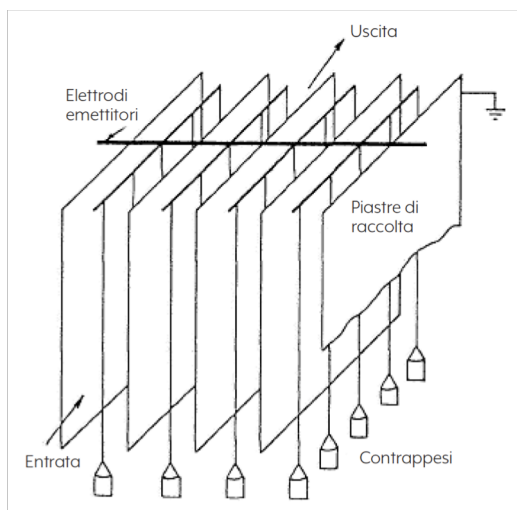
Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici

- La zona utile di funzionamento in temperatura ricade in 2 aree distinte:
 - **Temperatura dei fumi maggiori di 350°C**
 - Filtri elettrostatici immediatamente all'uscita della camera di combustione
 - Soluzione non semplice in quanto l'aggressività degli agenti chimici aumenta con la temperatura dei fumi
 - Essendo i fumi a temperatura elevata, il loro volume specifico è maggiore → Filtri con dimensioni più grandi e quindi più onerosi
 - **Temperatura dei fumi minori di 120-140°C**
 - Prassi impiantistica attuale (precipitatori a "freddo")
 - Operare in modo prossimo al limite inferiore potrebbe comportare condense acide nel locale macchine
 - Si cerca di "condizionare" la resistività superficiale del particolato immettendo nei fumi all'uscita della camera di combustione anidride solforica (poche ppm)



Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Abbattimento del particolato solido – Precipitatori elettrostatici



68

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Desolforazione (deSO_x)

- **Desolforazione prima della combustione**

- Azione preventiva usando **combustibile a basso tenore di zolfo** (es. petrolio BTZ ed alcuni carboni)
- Per il carbone viene normalmente eseguita un'operazione preliminare a bocca di miniera
 - Il carbone viene **bonificato** (sminuzzato e sottoposto a lavaggio)
 - I trattamenti di bonifica hanno effetto solo sullo zolfo inorganico (piritico), il quale rappresenta solo una parte del tenore totale di zolfo
 - Circa il 30% nei carboni a basso tenore di zolfo (usati negli impianti termoelettrici)
 - I trattamenti di bonifica non hanno effetto significativo sullo zolfo di natura organica
 - Nel migliore dei casi si possono ottenere carboni (costosi) con tenori di zolfo intorno a 0,4-0,8%
 - Per rispettare le norme sulle emissioni il carbone dovrebbe avere un tenore massimo di zolfo dello 0,2% → **Necessario prevedere almeno un'altra azione di desolforazione nell'impianto**

69

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Desolforazione (deSO_x)

- **Desolforazione durante la combustione**

- L'aggiunta di calcare o calce permette di fissare una quantità superiore di SO₂ alle particelle solide delle ceneri
 - L'abbattimento degli SO_x sarebbe indiretto, ovvero tramite l'abbattimento del particolato solido
- Nonostante diverse sperimentazione, il **metodo più efficace rimane ancora il trattamento post-combustione**

70

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Desolforazione (deSO_x)

- **Desolforazione dopo la combustione**
 - Vengono usati diversi processi di depurazione dei fumi, detti **FGD (Flue Gas Desulfurization)**
 - Essi trasformano l'anidride solforosa dalla fase gassosa a quella liquida o solida (in composto) tramite lavaggio dei fumi con soluzioni alcaline (sistemi a umido, a secco e a semisecco)
 - Molti dei processi FGD hanno efficienze di rimozione degli ossidi di zolfo molto elevate (oltre il 90%)
 - La rispettiva competitività economica è legata al tipo di prodotto finale in cui è relegato lo zolfo
 - Impatto col territorio
 - Vendibilità (es. sostanze riutilizzabili come il gesso, il solfato d'ammonio o lo zolfo elementare)
 - Possibilità di stoccaggio (es. residui inquinanti come fanghi stabilizzati di solfati e solfiti di calci, da collocare in discarica e che richiedono vaste aree di territorio per la loro sistemazione)
 - Tutti i processi FGD sono **onerosi** sia dal punto di vista costruttivo che da quello d'esercizio
 - Numero di addetti nei vari turni operativi
 - Parco per la movimentazione dei reagenti e dei prodotti di risulta
 - Cospicue quantità d'acqua
 - Consumo di energia elettrica per gli ausiliari e di vapore per il post-riscaldamento dei fumi

71

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Desolforazione (deSO_x)

- **Desolforazione dopo la combustione**
 - I metodi di desolforazione dei fumi proposti fino ad oggi sono oltre 200 (solo alcuni hanno raggiunto lo stadio commerciale)
 - I sistemi FGD si possono classificare secondo vari criteri:
 - Tipo di processo: rigenerativi (il cui reagente viene ciclicamente rigenerato) da quelli non rigenerativi (il cui reagente viene espulso con i prodotti di reazione → Reintegro)
 - Stato fisico delle sostanze reagenti con la SO₂: processi a umido (con reagente in fase liquida), processi spray-dry (con reagente allo stato liquido nebulizzato, che solidifica a contatto dei fumi), processi a secco (reagente allo stato secco)
 - Caratteristiche dei prodotti di risulta: con recupero (totale o parziale) del residuo e senza recupero
 - Sono usati principalmente:
 - Desolforazione a umido non rigenerativi (con recupero), a calce/calcare e con ammoniaca (processo Walther)
 - Desolforazione a umido rigenerativi (con recupero), con bisolfito sodico (processo Wellman-Lord)
 - Desolforazione a semi-secco (senza recupero), con calcare/calce (processo spray-dry)

72

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Denitrificazione (deNO_x)

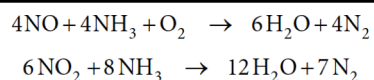
- È necessario contrastare la contemporanea presenza di monossido di azoto NO e di biossido di azoto NO₂ (NO_x e SO_x sono la causa primaria delle piogge acide)
- La formazione di ossidi di azoto NO_x è dovuta alla forte presenza di azoto nell'aria comburente
- La formazione di NO_x è strettamente legata alla temperatura presente in camera di combustione
 - Sensibile calo della formazione di NO_x con temperature nel range 900-1000°C
- Nelle caldaie degli attuali impianti termoelettrici si lavora con temperature ordinarie di 1.300-1.500°C
 - Adozione di bruciatori multistadio, nei quali la portata d'aria secondaria viene modulata secondo la disposizione dei bruciatori, iniettando più aria nei bruciatori superiori così da ridurre la temperatura
- Un miglioramento si può ottenere creando un ambiente fortemente riducente in camera di combustione
 - Iniezione di ammoniaca (NH₃) in caldaia (~30 t/giorno per un gruppo da 320 MWe)
 - Questo intervento però può presentare altri inconvenienti, soprattutto legati al fatto che l'ammoniaca che non ha reagito viene espulsa dal camino

73

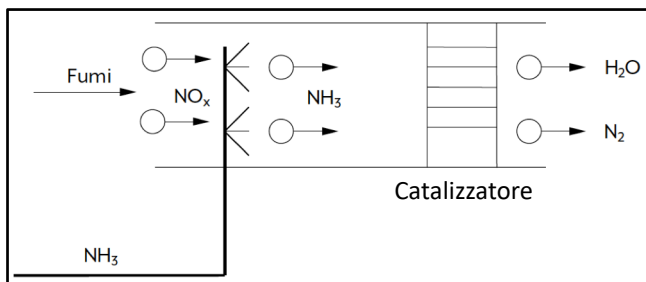
Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Denitrificazione (deNO_x)

- L'unica soluzione definitiva per l'abbattimento degli NO_x rimane il trattamento dei fumi con catalizzatore
- Uno dei sistemi in uso è quello denominato SCR (Selective Catalytic Reduction)
 - Nei fumi vengono iniettate quantità abbastanza contenute di ammoniaca (NH₃)
 - La miscela di molecole di NO_x e NH₃ passa attraverso sistemi a catalizzatore che favoriscono le reazioni



- All'uscita si ottiene acqua (vapore) e azoto allo stato gassoso



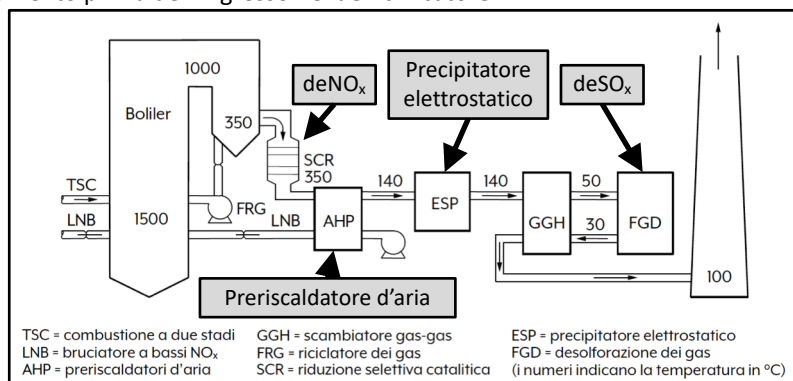
L'ammoniaca da iniettare nei fumi viene stoccata allo stato liquido → Riscaldata in modo da farla evaporare prima di essere miscelata con una certa quantità d'aria

74

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Denitrificazione (deNO_x)

- I sistemi SCR funzionano efficacemente con temperature dei fumi di 300-350°C
 - Occorre installare il sistema a valle della camera di combustione, dove però i fumi in uscita dalla caldaia sono sporchi, non avendo ancora subito alcun trattamento
 - Sono stati messi a punto sistemi SCR più complessi, in grado di trattare anche fumi sporchi
 - In alternativa, si dovrebbe installare un depolverizzatore a caldo e successivamente sottoporre i fumi a preriscaldamento prima dell'ingresso nel denitrificatore

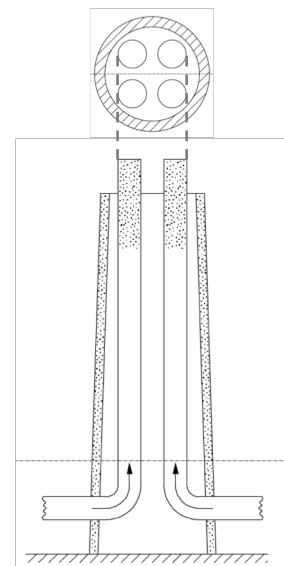


75

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Camino

- I moderni camini hanno la forma di una torre di calcestruzzo armato di altezza dell'ordine dei 200-300 m
- Hanno struttura generalmente multi-flusso (un unico camino per più gruppi termici, da 2 a 4)
- I fumi sono convogliati da canne di acciaio inox indipendenti (una per ogni gruppo termico)
 - Canne in acciaio inox (o in vetroresina) allo scopo di limitare la corrosione legata alla presenza di umidità e bassa temperatura (condense acide)
- All'interno della costruzione in calcestruzzo sono disposte scale o montacarichi che consentono l'ispezione esterna delle canne fumarie e l'eventuale manutenzione
- A causa dei trattamenti, i fumi escono dal desolforatore ad una temperatura di circa 30-50°C, troppo bassa per garantire un adeguato tiraggio al camino
 - È quindi necessario provvedere ad un post-riscaldamento dei fumi trattati, sfruttando il calore posseduto dai fumi prima dell'ingresso nel desolforatore (120-140°C)
 - Vengono inviati al camino fumi depurati a temperatura adeguatamente elevata (nell'ordine dei 100°C)



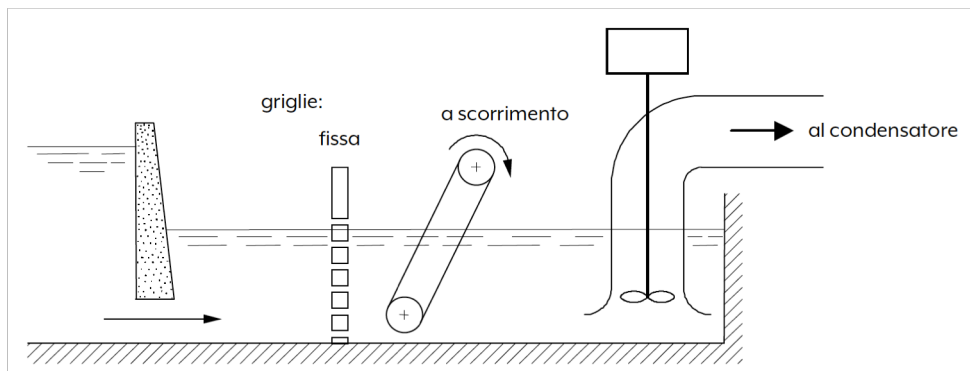
76

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Sistemi di raffreddamento

- **Sistemi di raffreddamento a ciclo aperto**

- L'acqua viene prelevata dal mare o da un fiume mediante opere di presa e successivamente purificata nel passaggio attraverso vasche di decantazione ed un sistema di griglie a diversa magliatura
- Un gruppo di pompe di sollevamento provvede ad inviare l'acqua di raffreddamento al condensatore
- L'acqua viene restituita mediante opere di scarico conformate in modo tale da favorire la miscelazione con l'acqua più fredda



77

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Sistemi di raffreddamento

- **Sistemi di raffreddamento a ciclo aperto**

- Potenza nominale delle pompe di sollevamento:
 - Prevalenza modesta (10-15 m)
 - Portate molto elevate (ad esempio $Q_{\text{acqua}}/Q_{\text{vapore}}$ circa 70)
 - $P_e = 320 \text{ Mwe} \rightarrow Q_{\text{vapore}} \cong 600 \text{ t/h} \rightarrow Q_{\text{acqua}} = 40.000 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Con $H = 12 \text{ m}$ e rendimento di pompaggio $\eta = 85\%$

$$P = \frac{9,81 \cdot Q_a \cdot H}{3600 \cdot \eta} = \frac{9,81 \cdot 40000 \cdot 12}{3600 \cdot 0,85} \cong 1500 \quad [\text{kW}]$$

- Le pompe di sollevamento possono avere potenza nominale fino a 0,5% della taglia del gruppo
- Funzionamento continuativo \rightarrow Elevato consumo di energia elettrica

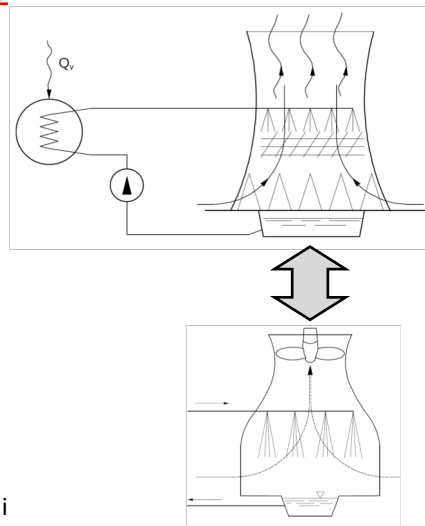
78

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Sistemi di raffreddamento

Sistemi di raffreddamento a ciclo chiuso – Torre di raffreddamento ad evaporazione

- Se non c'è una adeguata disponibilità d'acqua per il raffreddamento è necessario realizzare una torre di evaporazione
- L'acqua di raffreddamento viene frazionata in minute goccioline spruzzate sopra un sistema di griglie
- Per caduta esse scambiano calore con l'aria che risale in controcorrente per effetto camino
 - Una quantità d'acqua viene rilasciata nell'atmosfera come vapore → Reintegro continuo
- La portata d'acqua richiesta risulta confrontabile con quella del vapore proveniente dalla turbina al condensatore
- La portata d'aria richiesta è molto elevato (capacità termica dell'aria è molto inferiore a quello dell'acqua) → Torri di evaporazione sono molto grandi
- Possibile ricorso alla circolazione forzata per limitare le dimensioni della torre → Costo di installazione e consumo dei ventilatori



79

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

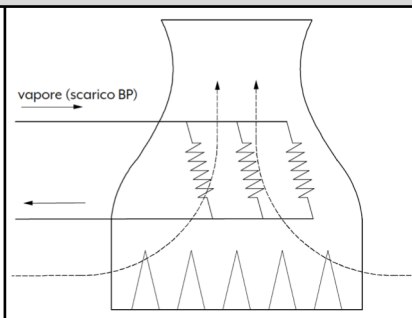
Sistemi di raffreddamento

Sistemi di raffreddamento a ciclo chiuso – Torre di raffreddamento a scambiatore

- La torre di raffreddamento funge da scambiatore a superficie (torre a secco) con l'aria
- Lo scambio avviene in banchi di radiatori in parallelo installati all'interno della torre

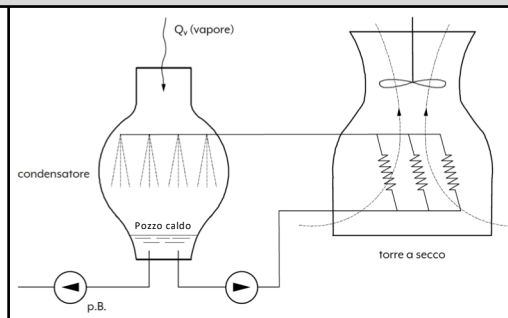
SISTEMI A CIRCOLAZIONE DIRETTA

Viene inviato alla torre direttamente il vapore da condensare



SISTEMI A CIRCOLAZIONE INDIRETTA

Si effettua il raffreddamento dell'acqua che si raccoglie nel condensatore (del tipo a miscela)



80

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Steam plants – Overview commerciale

The one-stop-shop for all your needs

Which plant would you like to explore?

STEAM POWER PLANT >

GAS POWER PLANT >

81

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Steam plants – Overview commerciale

AIR QUALITY CONTROL SYSTEM

- 2,800+ industrial systems implemented

BOILER

- GE installations represent 30+% of the world's fleet

MULTI-YEAR AGREEMENTS

- Performance-based strategies that can change through the life cycle

GENERATOR

- ALL OEM brands supported (30+)

DIGITAL SOLUTIONS

- Outcome-based solutions that transform knowledge into power

STEAM TURBINE

- ~40% of steam turbine solutions are performed on cross-fleet assets

BALANCE OF PLANT

- Water and steam cycle systems
- Electrical/mechanical auxiliaries
- Plant cooling water system

82

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Steam plants – Overview commerciale

STEAM PLANT SERVICE SOLUTIONS

Boiler

GE has serviced nearly 7,000 boilers globally, including 4,000 boilers from cross-fleet brands

Our customers can benefit from solutions tailored to 50+ boiler OEM brands including Donfang, BHEL, John Thompson, Shanghai, PFBC, and IHI

Our portfolio includes:

- FieldCore®**
Responsible for all field services activities, FieldCore can deliver more productive, reliable outcomes.
- Parts**
Take advantage of in-kind parts replacements to extend time between outages.
- Repairs**
Combining capabilities and experience to secure your boiler's performance.
- Performance Upgrades**
Our upgrade solutions are the backbone of plant performance improvements.
- Digital solutions**
Our digital solutions can help you achieve new heights of system-level optimization.

*A proposal to transfer Power Services field services fulfillment activities and related support functions in Europe to FieldCore and the proposed organization design is being discussed with employee representatives across Europe as appropriate and where required by law before any final decisions are taken.

Typical fuels	Bituminous, sub-bituminous
	Lignite A
	Oil and gas
Capacity	Up to 1,350 MWe
	Up to 330 bar / 650°C / 670°C
	DRH 330 bar / 650°C / 670°C/670°C

83

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

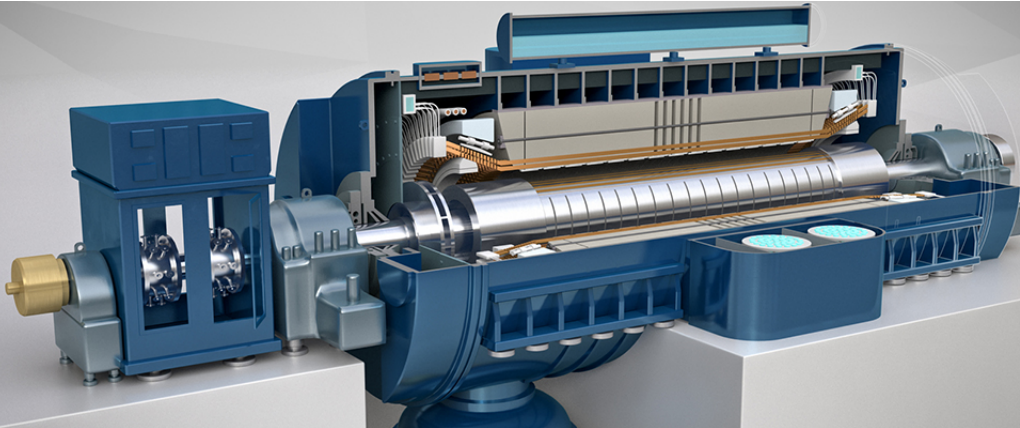
Steam plants – Overview commerciale

- Speed: 1,500 rpm
- Output: 1,750 MWe
- Heaviest Lift – Low Pressure Rotor: 280 t
- Power Train Dimensions: 20 m (width), 15 m (height), 70 m (length including generator)

84

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Steam plants – Overview commerciale



- Power Factor: 0.80 – 0.90 @50 Hz
- Apparent Power: 590 – 1,400 MVA
- Efficiency: up to 99%
- Terminal Voltage: 18 to 27 kV
- Reliability: 99.996%

85

Sezione C – Capitolo 7 – Impianti termoelettrici

Steam plants – Overview commerciale

STEAM PLANT SERVICE SOLUTIONS

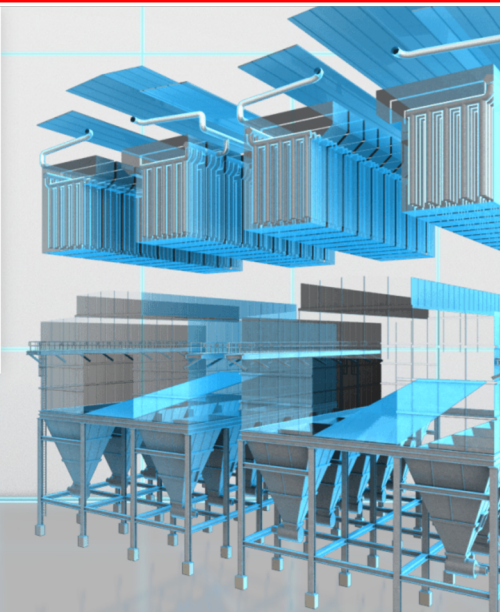
ECS
Environmental Control Systems.

2,800+
industrial systems installed, half of them on cross-fleet equipment

Our range of ECS services includes inspections, condition and lifetime assessments, outage management, monitoring and diagnostics, remote control and performance upgrades.

Our technologies are helping customers achieve significant emissions reductions including:

SO_x Sulfur Oxides Up to 99.8% removal	Hg Mercury Up to 90% removal
NO_x Nitrogen Oxide Up to 95% removal	PM Particular Matter Up to 99% removal



86