

F. Bignucolo – Impianti di produzione dell'energia elettrica

SEZIONE B – IMPIANTI DI PRODUZIONE A FONTE FOSSILE

Capitolo 8

Impianti turbogas, ciclo combinato e speciali

1

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas

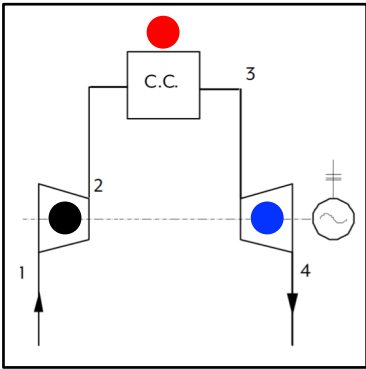
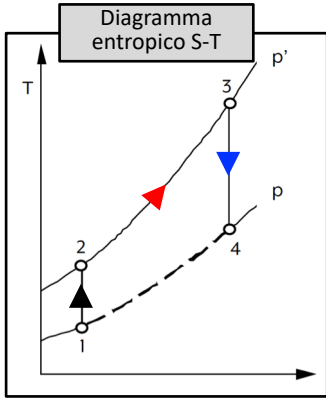
- Gli impianti turbogas differiscono notevolmente dagli impianti termoelettrici a vapore
 - Funzionamento basato su trasformazioni termodinamiche **a ciclo aperto** (es. ciclo Brayton)
 - Il motore primo è un una **turbina a gas**
 - Taglie di potenza inferiore rispetto ai gruppi tradizionali a vapore → Diversi gruppi in parallelo
- I **vantaggi** di questo tipo di impianto derivano dalla struttura più semplice
 - Tempi più brevi di realizzazione e minori costi di investimento
 - Semplicità costruttiva
 - Rapida accensione
 - Agevole modulazione delle condizioni di funzionamento
- Tra gli **svantaggi**, la necessità di impiegare combustibili pregiati (gas naturale, derivati leggeri del petrolio) e il basso rendimento comportano elevati costi operativi
- L'analisi di vantaggi e svantaggi porta a utilizzare questo tipo di impianti per la **produzione di punta**

2

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- 3 trasformazioni elementari:
 - Compressione (1-2)** del gas ($p \rightarrow p'$) e conseguente aumento di temperatura (tale fase assorbe potenza meccanica)
 - Combustione in camera di combustione (2-3)**, ovvero trasformazione dell'energia chimica in energia termica \rightarrow Aumento di temperatura a pressione costante
 - Espansione in turbina 3-4**. Tale fase a entropia costante fa ritornare il fluido alla pressione iniziale \rightarrow Il fluido si raffredda (pur se $T_4 > T_1$)
- La richiusura del ciclo (linea tratteggiata 4-1) è solo fittizia \rightarrow I fumi vengono espulsi in atmosfera e nuova aria viene immessa nel circuito

3

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- Il rendimento del ciclo di Brayton elementare è calcolabile con riferimento ai livelli di entalpia raggiunti nelle varie fasi del ciclo

$$\eta = \frac{L}{Q} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

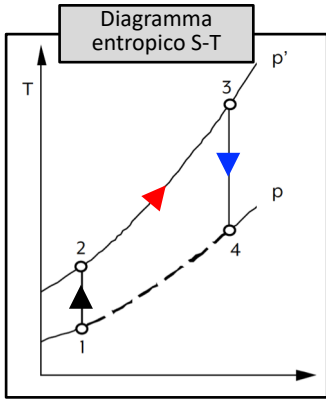
$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

I tratti 2-3 e 4-1 sono ognuno a pressione costante (p' e p rispettivamente)

- Si definisce $K = c_p/c_v$ (rapporto tra il calore specifico a pressione costante ed il calore specifico a volume costante)
- Per un gas ideale si può scrivere

$$T \cdot p^{\frac{1-K}{K}} = \text{costante}$$

$$T_3 = \left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{K-1}{K}} \cdot T_4$$

$$T_2 = \left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{K-1}{K}} \cdot T_1$$


4

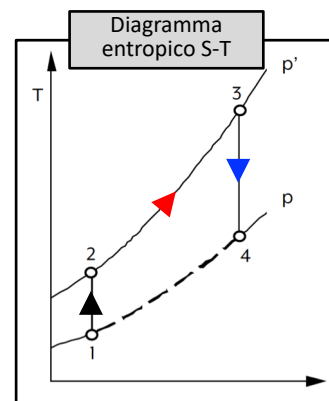
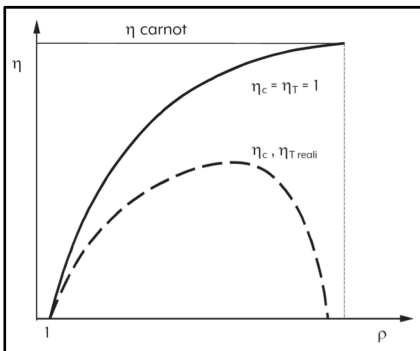
Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- Si definisce il **rapporto di compressione p** come il rapporto p'/p
- Il **rendimento del ciclo Brayton elementare** diventa quindi

$$\eta = 1 - \frac{1}{\rho^{\frac{K-1}{K}}} \text{ (ideale)}$$

- **Idealmente**, il rendimento aumenta con il rapporto di compressione fino a tendere asintoticamente al rendimento del ciclo di Carnot se $\rho \rightarrow \infty$
- In realtà il **rendimento di compressore e turbina** limitano il rendimento complessivo per elevati rapporti di compressione



5

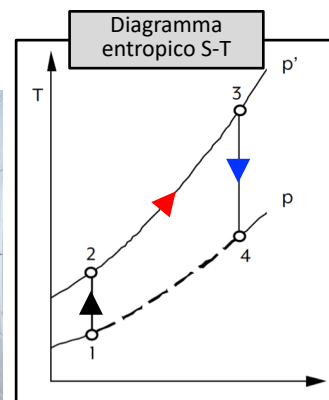
Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- Per una **impianto reale** (fluido reale e macchine reali), $\rho \cong 8$ e $K = 1,4$
 - Rendimento del **compressore** $\eta_c \sim 0,85$
 - Rendimento della **turbina** $\eta_T \sim 0,85$
 - Rendimento della **camera di combustione** $\eta_{cc} \sim 0,95$

$$\eta_{reale} = \eta_{ideale} \cdot \eta_c \cdot \eta_T \cdot \eta_{cc} = (25 \div 30)\%$$

- Il rendimento complessivo ottenibile in configurazione reale è piuttosto modesto se confrontato con un ciclo Rankine tradizionale (anche senza stadi di surriscaldamento e risurriscaldamenti)
 - Miglioramento del rendimento tramite parziale **rigenerazione** (sfruttamento del calore dei gas di scarico)



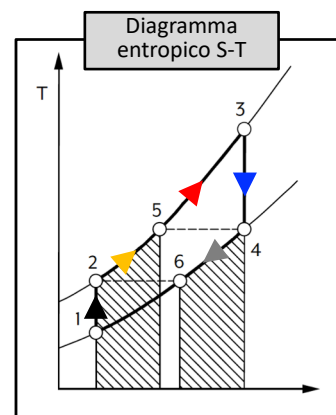
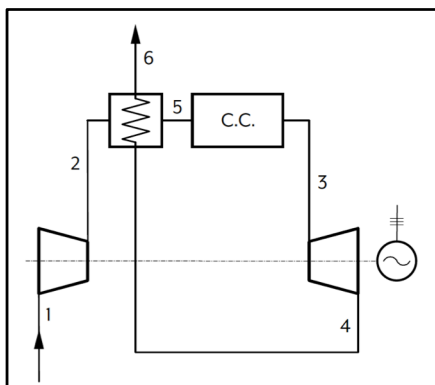
6

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton rigenerativo

- Un impianto turbogas emette grandi portate di gas di scarico a temperatura relativamente elevata
- **Ciclo di Brayton rigenerativo**: il calore dei gas di scarico viene parzialmente utilizzato per preriscaldare l'aria in ingresso alla camera di combustione

- **Compressione 1-2**
- **Riscaldamento 2-5** tramite scambiatore con i gas di scarico (isobaro)
- **Combustione in camera di combustione (5-3)** → Aumento di temperatura a pressione costante
- **Espansione in turbina 3-4**
- **Raffreddamento dei fumi 4-6** per cessione di calore all'aria compressa
- I fumi vengono rilasciati in atmosfera (ciclo aperto)



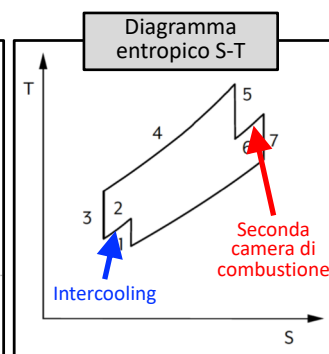
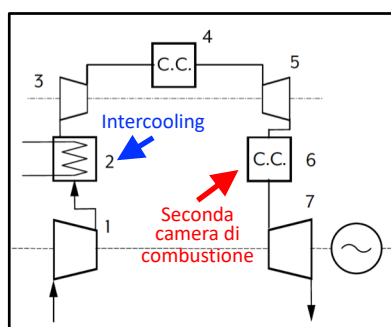
7

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Ciclo di Brayton multi-stadio

- Per migliorare il rendimento del ciclo, si possono adottare cicli sviluppati in due o più stadi

- **Nella fase di compressione**, con **intercooling** (refrigerazione, fase 2) interposta tra le compressioni in cascata 1 e 3
 - Si riduce il lavoro di compressione
 - E' possibile conseguire rapporti di compressione più elevati
- **Nella fase di espansione**, con **seconda camera di combustione** (6) tra due turbine in cascata (5 e 7)



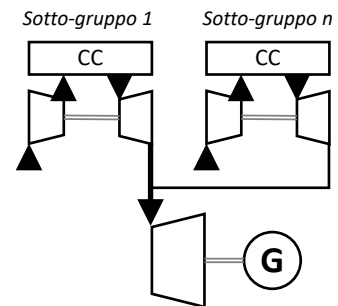
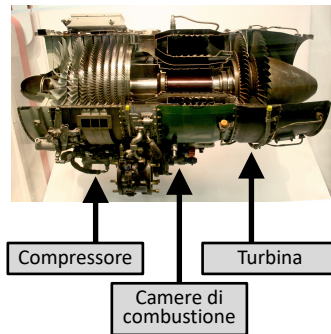
- L'impianto diventa molto più complesso e costoso
- Possono essere raggiunti rendimenti equivalenti superiori al 40%

8

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti turbogas – Reattori aeronautici

- Possono essere realizzati impianti a turbogas basati sull'impiego di **reattori di tipo aeronautico**
 - Compressori
 - Generatori dei gas caldi
 - Turbine per l'alimentazione dei compressori
- I gas di scarico ad alta temperatura provenienti da più reattori di questo tipo vengono, di seguito, inviati ad espandersi in una **turbina a gas accoppiata ad un generatore elettrico**
- Un impianto turbogas emette grandi portate di gas di scarico a temperatura relativamente elevata
- I reattori di derivazione aeronautica richiedono una sosta di manutenzione ogni 1.500 ore di funzionamento circa → Essendo impianti di punta, ciò significa una **manutenzione significativa ogni anno**



9

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Altre applicazioni di sistemi turbogas



Turboreattore EJ-200 dell'Eurofighter (vista lato compressore)



- Fiat Turbina (1954):
- Compressore a due stadi
 - Turbina a due stadi
 - Turbina matrice a uno stadio
 - Velocità dichiarata circa 250 km/h
 - Pinne stabilizzatrici
 - Cx 0,14
 - Sospensioni a 4 ruote indipendenti



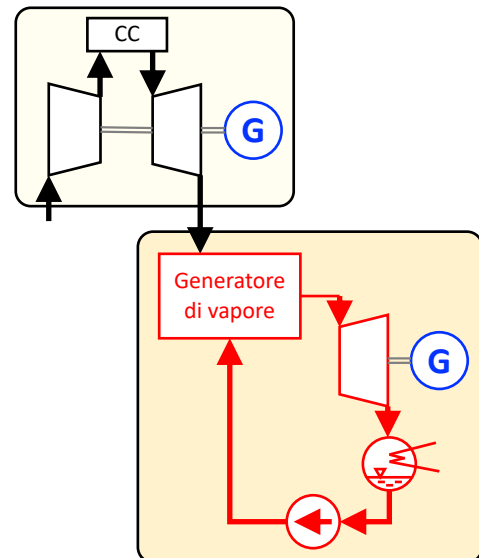
locomotore a turbogas della Union Pacific Railroad

10

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- Il progresso tecnologico dei materiali ha permesso di elevare la temperatura di funzionamento dei palettaggi di turbina ($800^{\circ}\text{C} \rightarrow 1.000-1.250^{\circ}\text{C}$)
- Possibile realizzare **impianti a ciclo combinato**
 - I gas di scarico del gruppo turbogas si impiegano per far funzionare un evaporatore
 - Il ciclo a vapore sfrutta, come sorgente di calore, il contenuto entalpico dei gas scaricati dalla turbina a gas della sezione turbogas
- Si ottengono **rendimenti complessivi maggiori rispetto ad un ciclo Rankine semplice**
 - Si riduce drasticamente l'irreversibilità causata dallo scarico in ambiente di gas caldi
 - I cicli a vapore (ciclo Rankine) possono lavorare a basse temperature
 - Si ottengono gas di scarico a temperatura $30-40^{\circ}\text{C}$

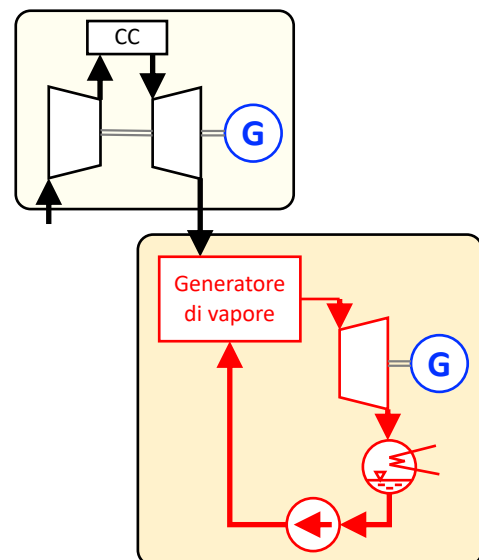


11

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- Il principio della combinazione dei cicli può essere applicato
 - Al potenziamento di impianti termoelettrici tradizionali già in esercizio (**repowering**)
 - Alla realizzazione di **nuovi impianti**
 - La sezione a vapore ha potenza inferiore di quella del ciclo a gas ($\leq 50\%$)
 - Le turbine a gas sono suscettibili di grandi innovazioni tecnologiche e le loro prestazioni mostrano un trend sempre crescente, mentre lo stato dell'arte delle macchine a vapore è sostanzialmente assestato
 - Gli incrementi sostanziali nella potenza prodotta da un impianto a ciclo combinato dipendono in primo luogo dagli avanzamenti delle turbine a gas

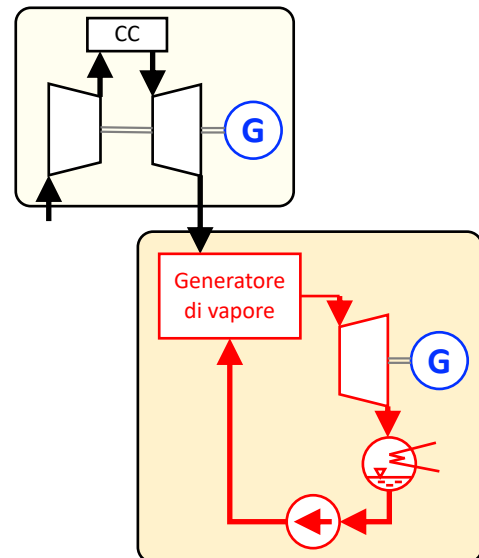


12

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- Le grandi centrali a ciclo combinato consentono di eliminare il rapido decadimento delle prestazioni ai carichi parziali (grande handicap degli impianti turbogas puri)
- Le turbine a gas vengono generalmente alimentate con **gas naturale**
- Minore richiesta di acqua di raffreddamento rispetto ad un tradizionale impianto con ciclo a vapore, a parità di potenza nominale complessiva
- Sono state sviluppate tecnologie di impianto a ciclo combinato, tra cui:
 - Ciclo combinato Unfired → Nuovi impianti
 - Ciclo combinato Fully-fired → Repowering

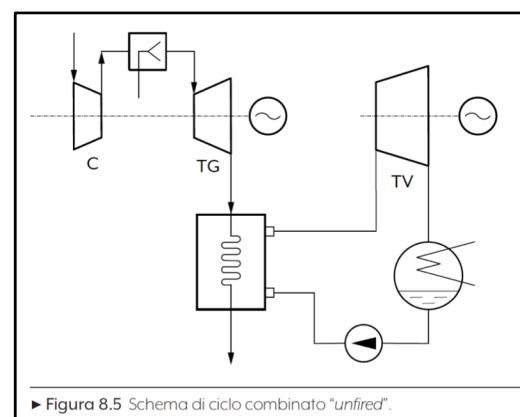


13

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- **Ciclo combinato unfired**
 - La "caldaia" adibita alla produzione del vapore è un **puro scambiatore di calore** con temperatura dei gas di scarico fino a 600°C
 - La parte competente al ciclo vapore ha un'importanza minoritaria
 - Rimane predominante la produzione della sezione turbogas
 - Viene recuperata buona parte del calore
 - Fluido in ingresso alla turbina a gas a 1.000-1.100°C
 - Fumi scaricati in atmosfera a 30-40°C
 - **Rendimento globale può superare in modo sinificativo il 50% (>60% in condizioni nominali)**
 - Questo schema è usato nei nuovi impianti
 - Minori costi d'installazione per unità di potenza
 - Minori costi di gestione (migliore rendimento)



► Figura 8.5 Schema di ciclo combinato "unfired".

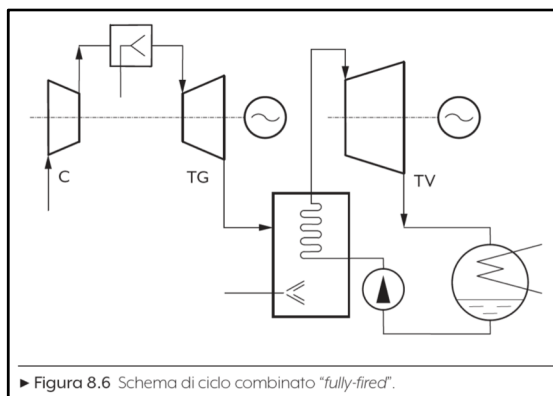
14

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- **Ciclo combinato fully-fired**

- I gas di scarico del turbogas, ad alta temperatura, vengono immessi in una caldaia in cui si brucia combustibile fossile tradizionale
- Si ottiene un gruppo termoelettrico tradizionale con aggiunto un gruppo turbogas a monte
 - La sezione turbogas ha importanza minoritaria
- Soluzione ottimale in abbinamento a impianti esistenti (**repowering**) sebbene si ottenga un rendimento complessivo inferiore rispetto al ciclo unfired
 - 320 MWe → 400-450 Mwe



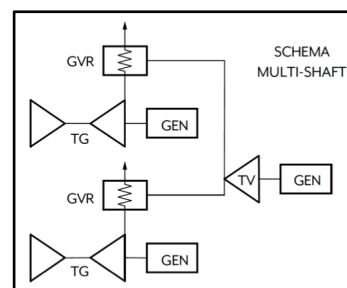
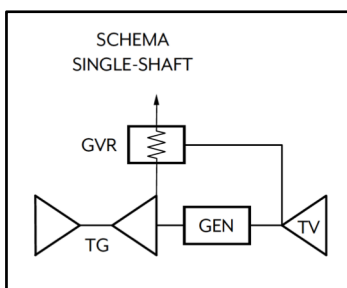
► Figura 8.6 Schema di ciclo combinato "fully-fired".

15

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato

- Esistono schemi più complessi che prevedono l'impiego di due o più gruppi turbogas per alimentare uno stesso gruppo a vapore
- Dal **punto di vista meccanico**
 - **Configurazione single-shaft**: tutte le macchine sono calettate sullo stesso asse (impianti con potenza nominale ↓)
 - **Configurazione multi-shaft**: vari gruppi disposti su più assi
 - Consente di raggiungere potenze più elevate
 - Maggiore complessità (numero più elevato di ausiliari)



16

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale

The one-stop-shop for all your needs

Which plant would you like to explore?



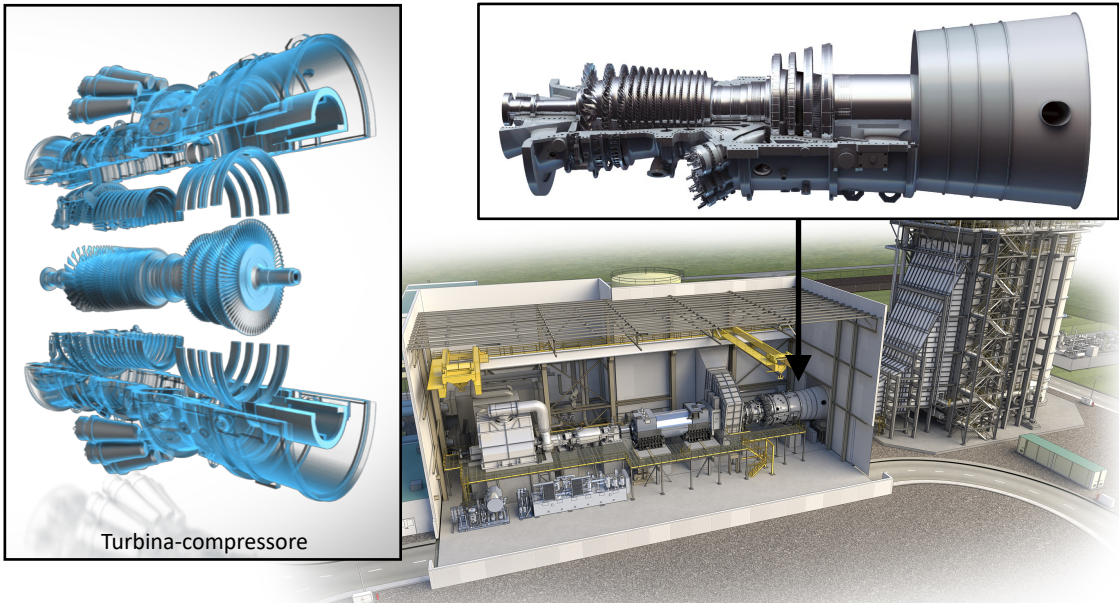
STEAM POWER PLANT >

GAS POWER PLANT >

17

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale



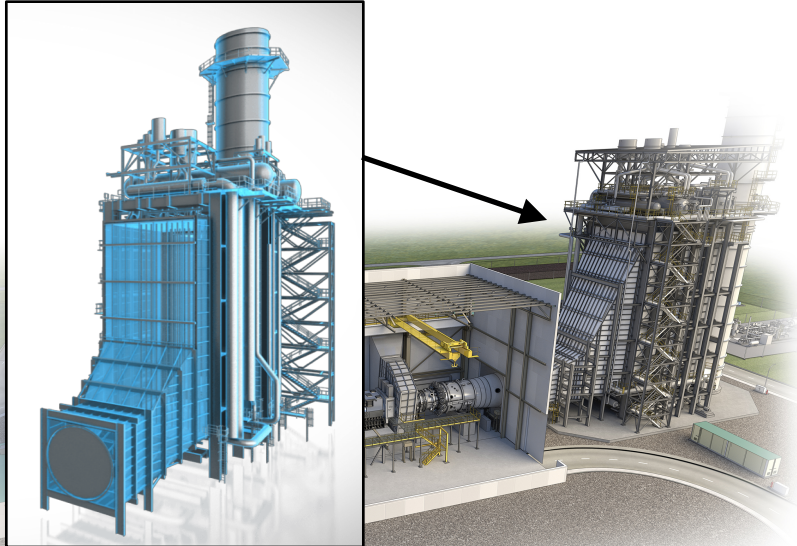
Turbina-compressore

18

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale

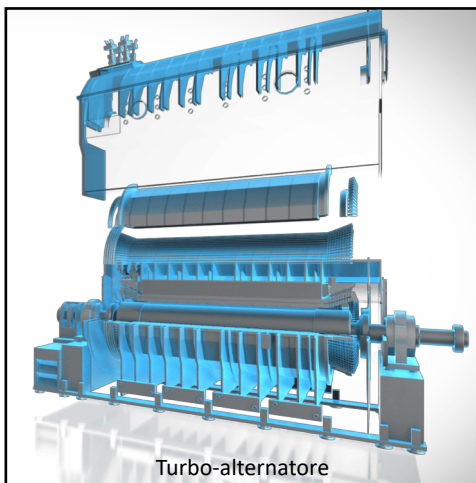
HRSG
Heat Recovery
Steam Generator



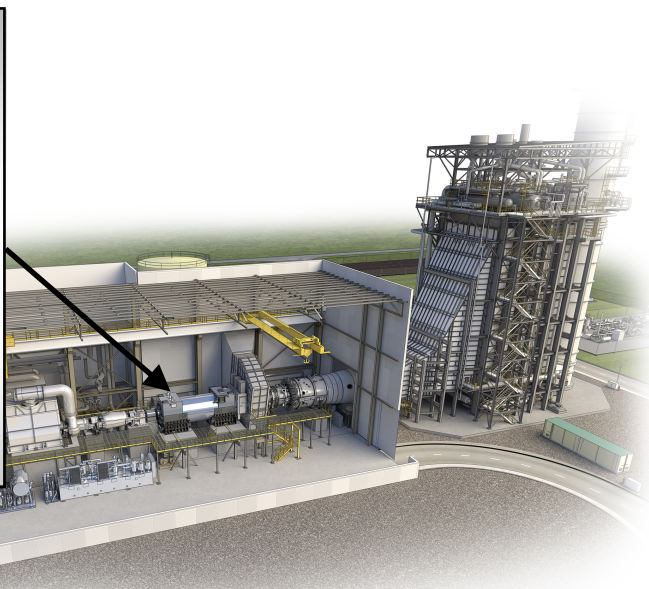
19

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale



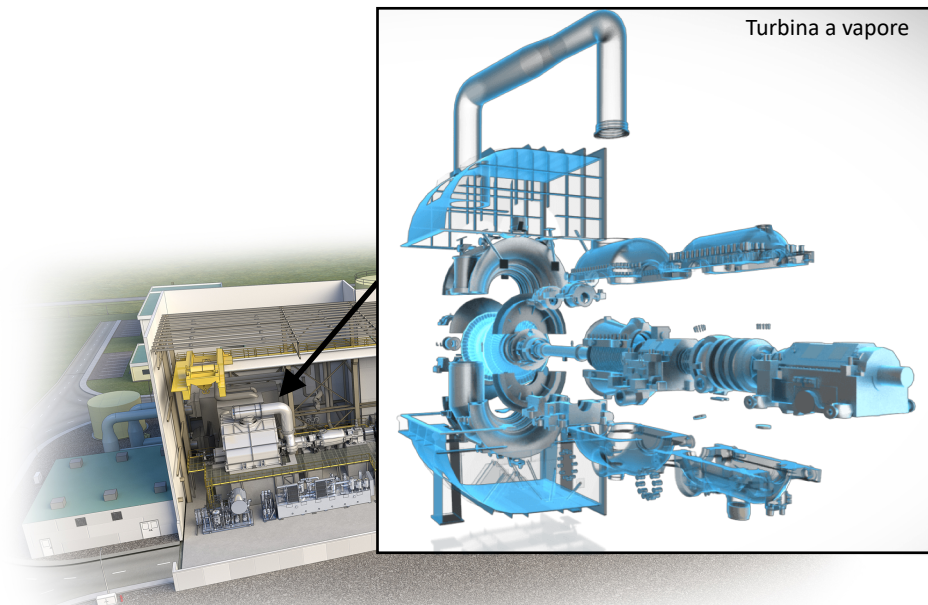
Turbo-alternatore



20

Sezione C – Capitolo 8 – Impianti turbogas e ciclo combinato

Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale



21