

## **SEZIONE 3.2**

# **Tecnologie tradizionali per la generazione elettrica**

**Fabio Bignucolo**

*Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Università di Padova*

*Centro studi Levi Cases*



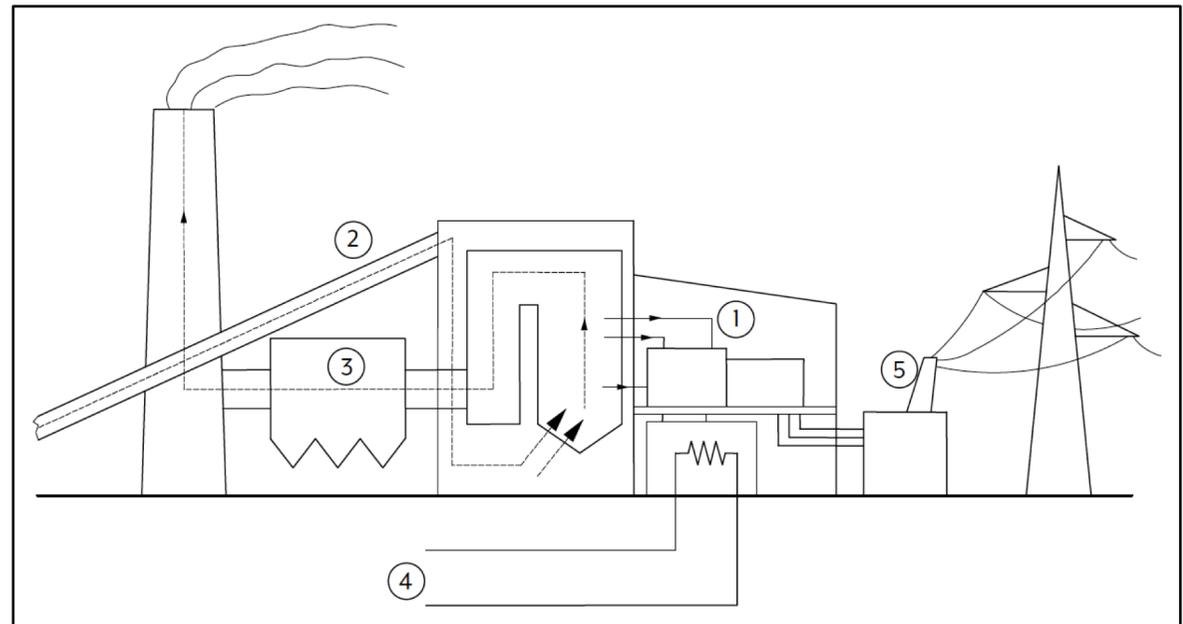
## Impianti termoelettrici – Plant layout

- 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

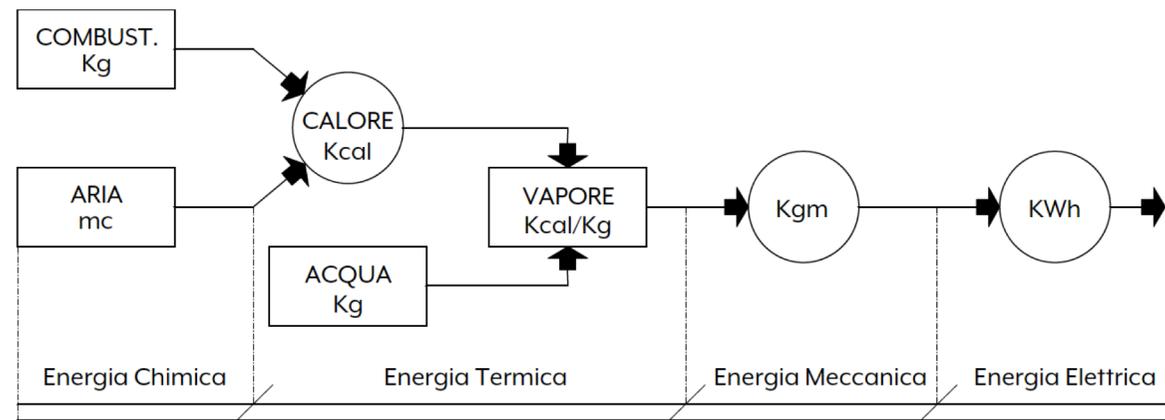
- Necessario considerare le reciproche posizioni vincolate di ingressi e uscite
- Minimizzazione dei percorsi e dei relativi ingombri
- Contenimento sia dei costi di installazione che di quelli di gestione (correlati con le perdite nell'impianto) e di manutenzione



## Impianti termoelettrici – Trasformazioni energetiche

- Molteplici trasformazioni energetiche in serie → Prodotto dei rendimenti equivalenti
  - $\eta_c$  : rendimento del ciclo termodinamico (circa 40-50%)
  - $\eta_{gv}$  : rendimento del generatore di vapore (circa 93%)
  - $\eta_T$  : rendimento della turbina (circa 91%)
  - $\eta_A$  : 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%

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

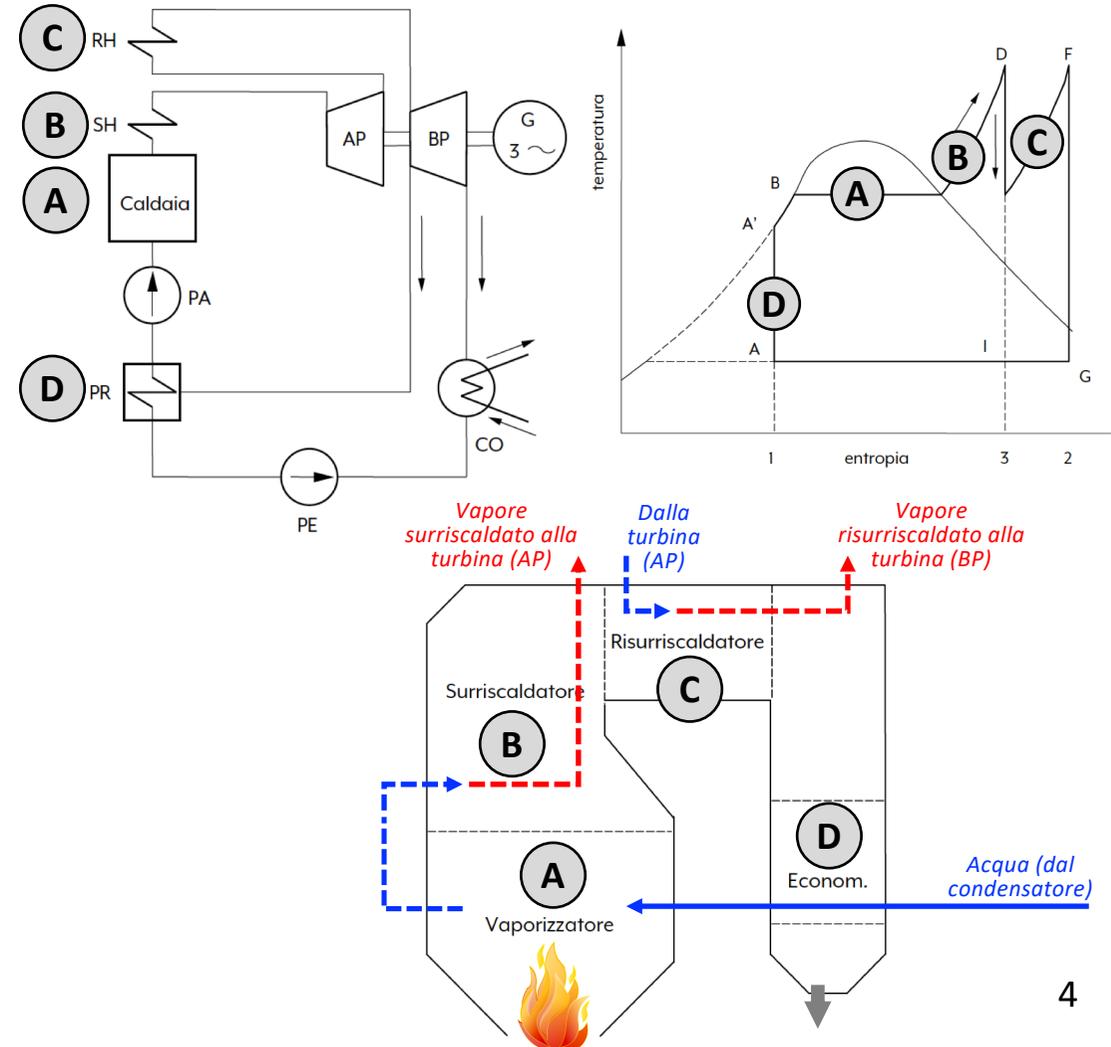


► Figura 7.10

Trasformazioni energetiche tipiche di un impianto termoelettrico.

## Impianti termoelettrici – Circuito vapore tradizionale

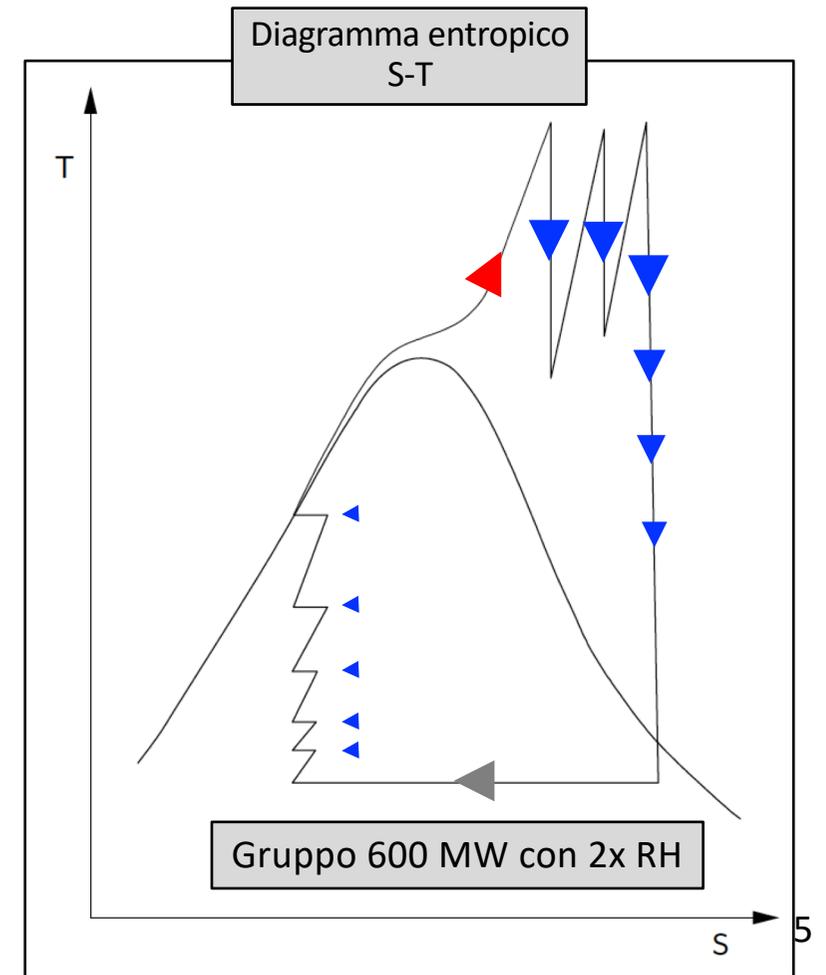
- Il generatore di vapore ha la funzione di trasformare l'energia contenuta nel combustibile in energia termica e di trasmetterla al fluido
  - **Stato liquido (acqua di alimento) → Vapore** (con determinate caratteristiche di pressione e temperatura)
- Classificazione:
  - Combustibile: carbone, nafta, 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



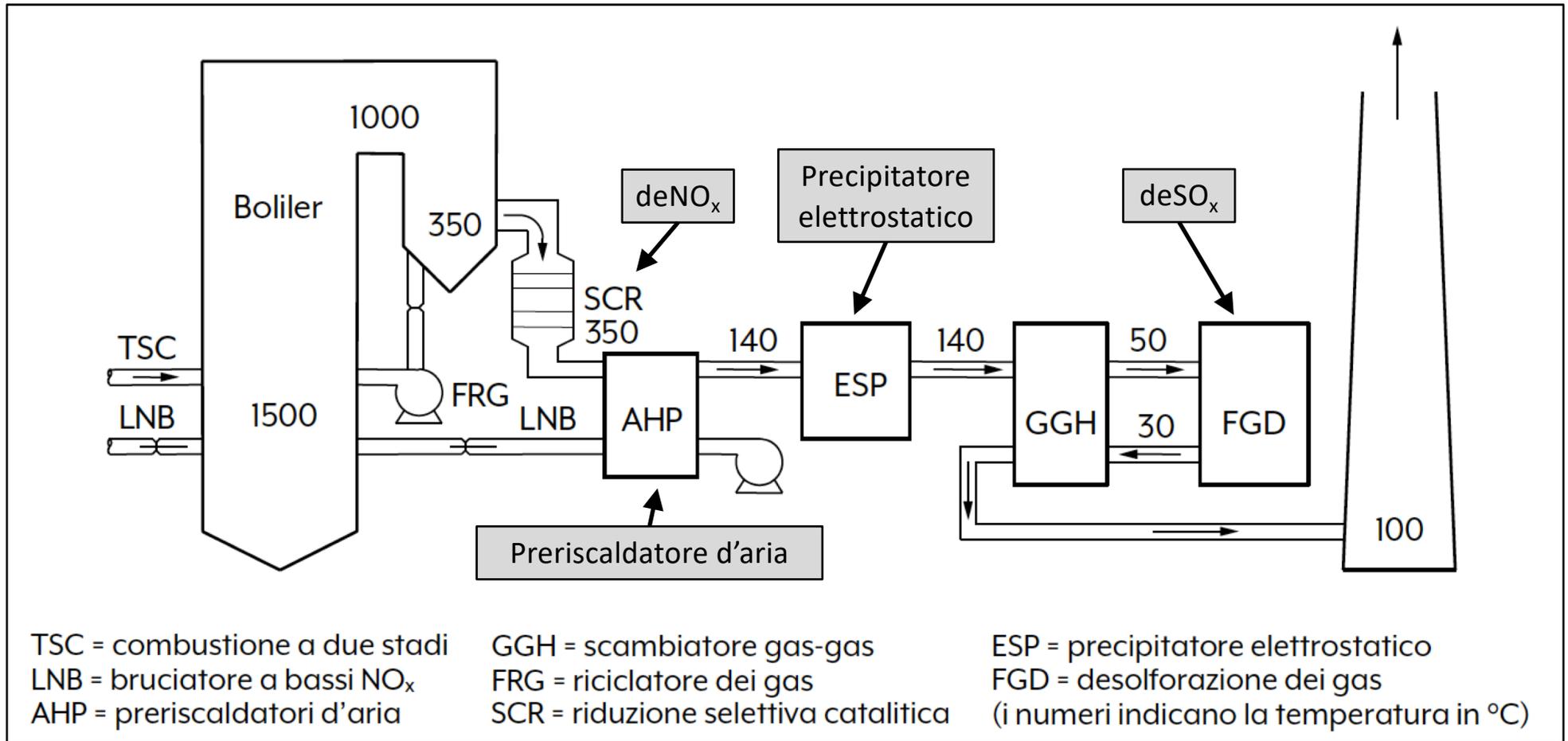
## Impianti termoelettrici – Circuito vapore ipercritico

### • 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  $225,6 \text{ kg/cm}^2$  e temperatura di  $374,2^\circ\text{C}$ )
- 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)



## Impianti termoelettrici – Trattamento fumi



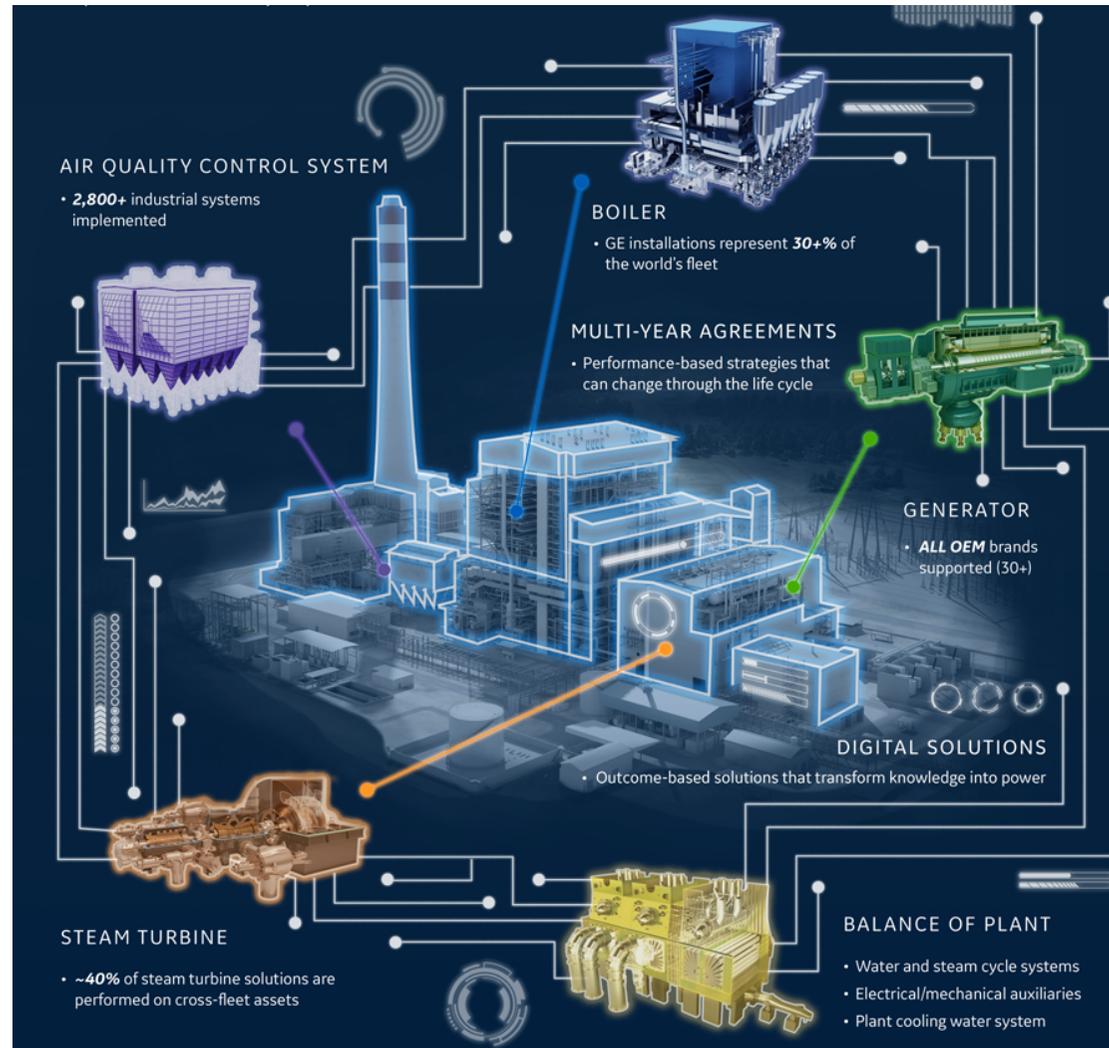
## Impianti termoelettrici – Overview commerciale

The one-stop-shop for all your needs

Which plant would you like to explore?



## Impianti termoelettrici – Overview commerciale



# Impianti termoelettrici – 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.



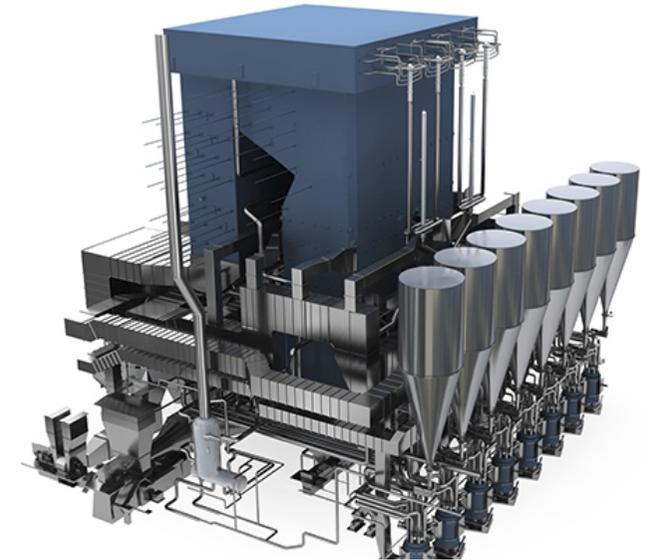
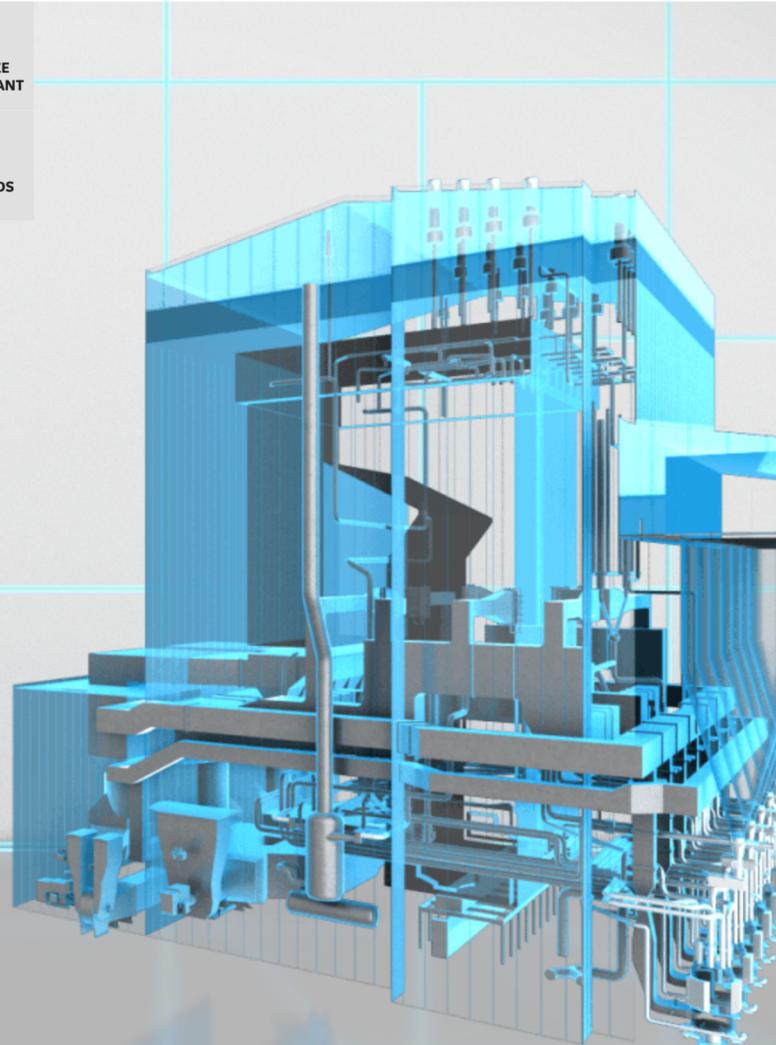
#### Digital solutions

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.

DIGITIZE  
YOUR PLANT

FACTOIDS



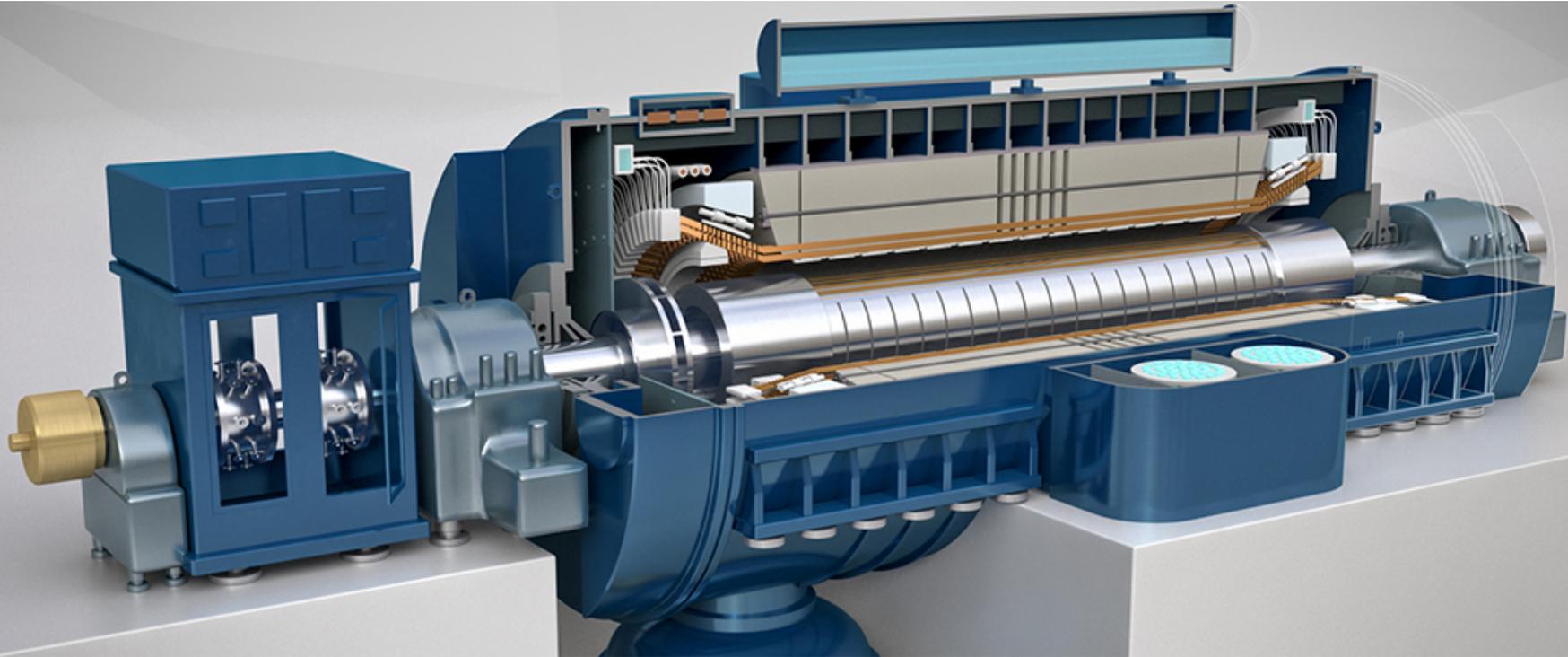
Typical fuels	Bituminous, sub-bituminous
	Lignite A
	Oil and gas
Capacity	Up to 1,350 MWe
	Up to 330 bar / 650°C / 670°C
	DRH 330 bar / 650°C /670°C/670°C

## Impianti termoelettrici – 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)

## **Impianti termoelettrici – 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%

## Impianti termoelettrici – 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.

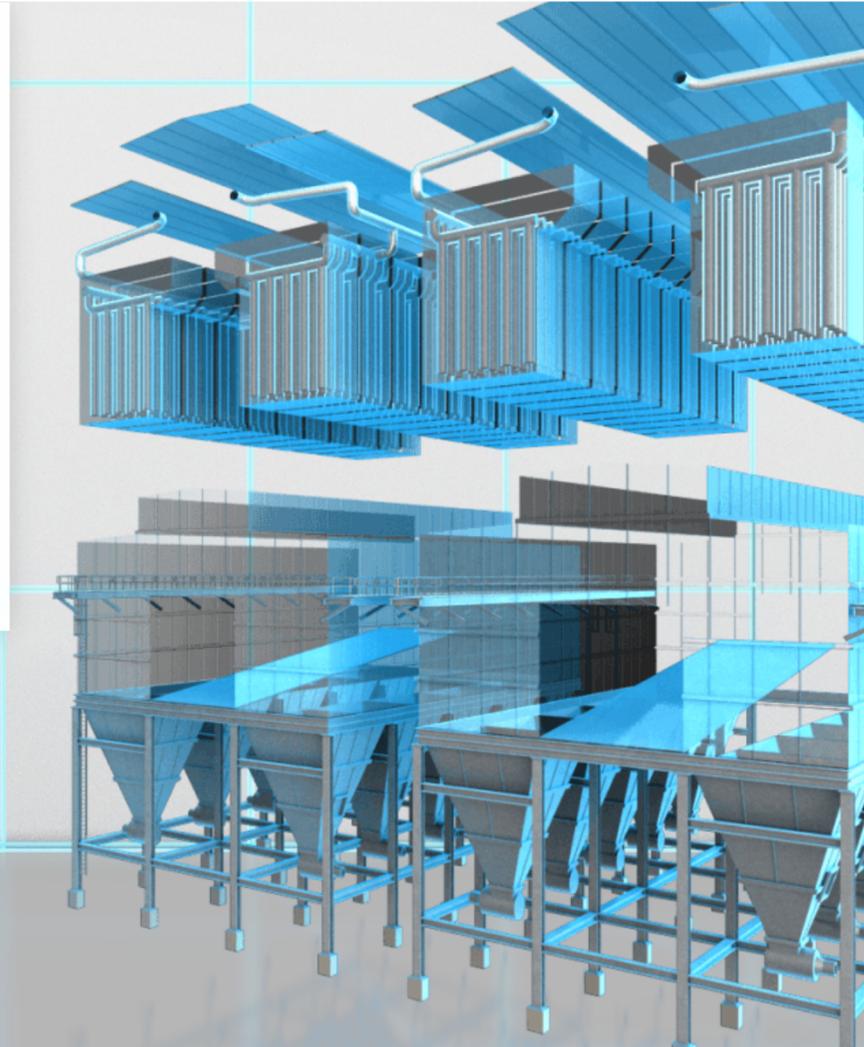
Our technologies are helping customers achieve significant emissions reductions including:

**SOx** **Sulfur Oxides**  
Up to 99.8% removal

**Hg** **Mercury**  
Up to 90% removal

**NOx** **Nitrogen Oxide**  
Up to 95% removal

**PM** **Particular Matter**  
Up to 99% removal



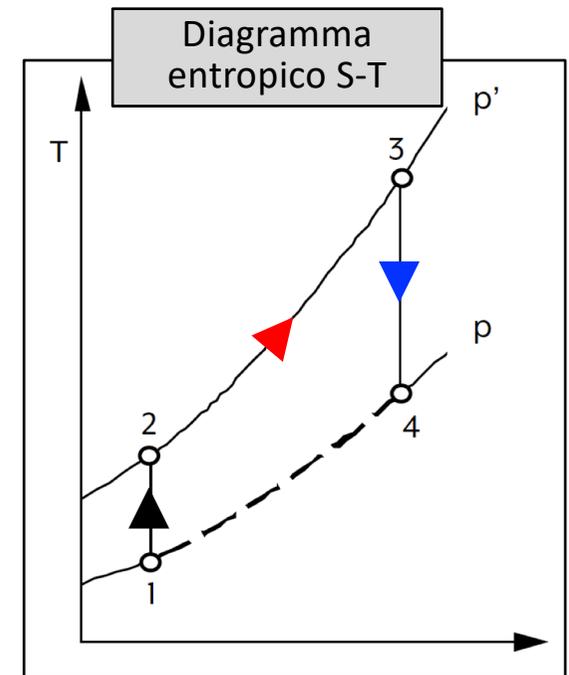
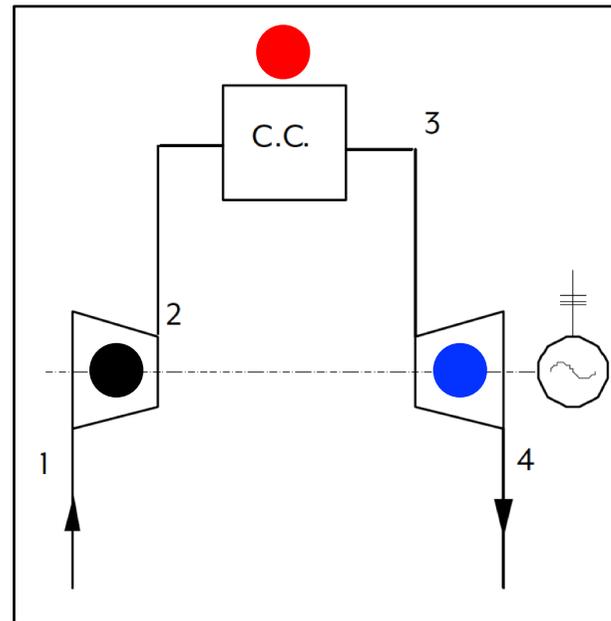
## Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- 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  $T_4 > T_1$ )



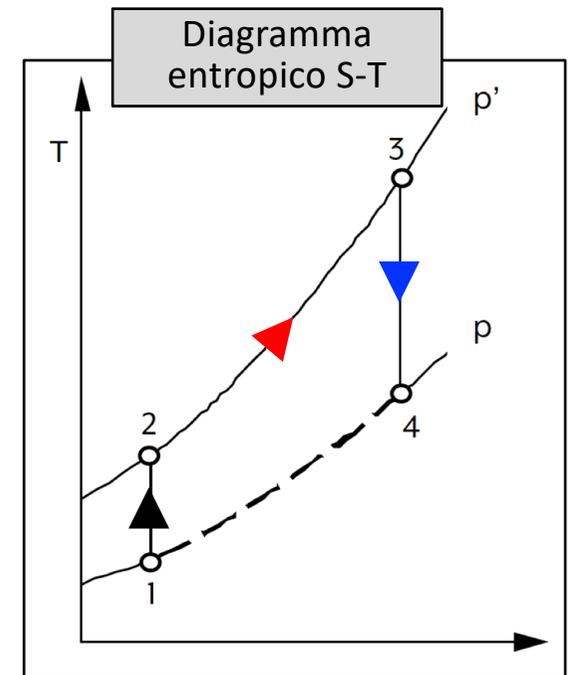
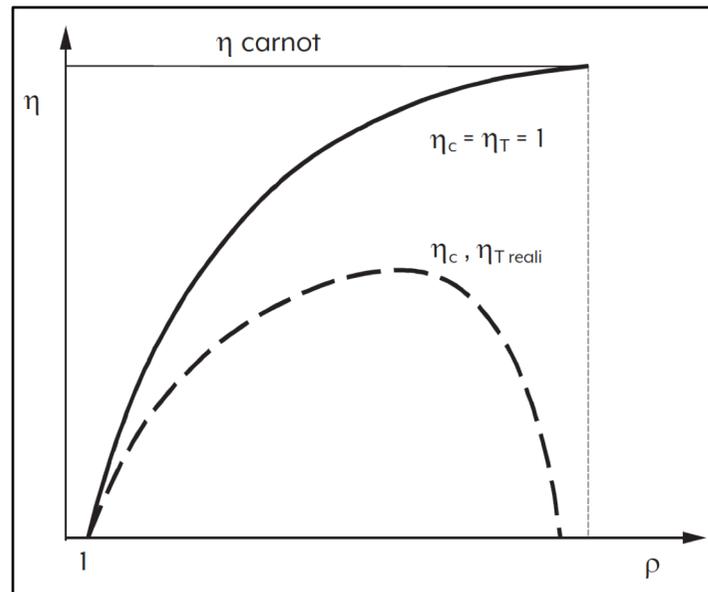
- La richiusura del ciclo (linea tratteggiata 4-1) è solo fittizia  $\rightarrow$  I fumi vengono espulsi in atmosfera e nuova aria viene immessa nel circuito

## Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

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

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

- 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

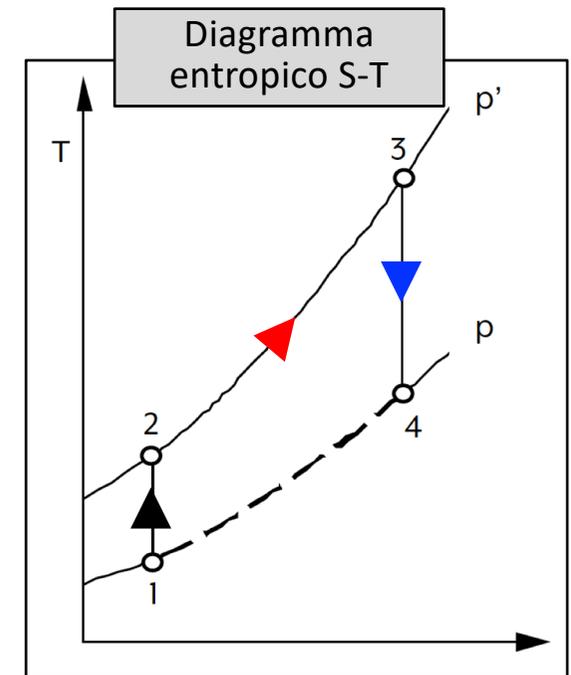


## Impianti turbogas – Ciclo di Brayton elementare

- 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  $\eta_{cc} \sim 0,95$

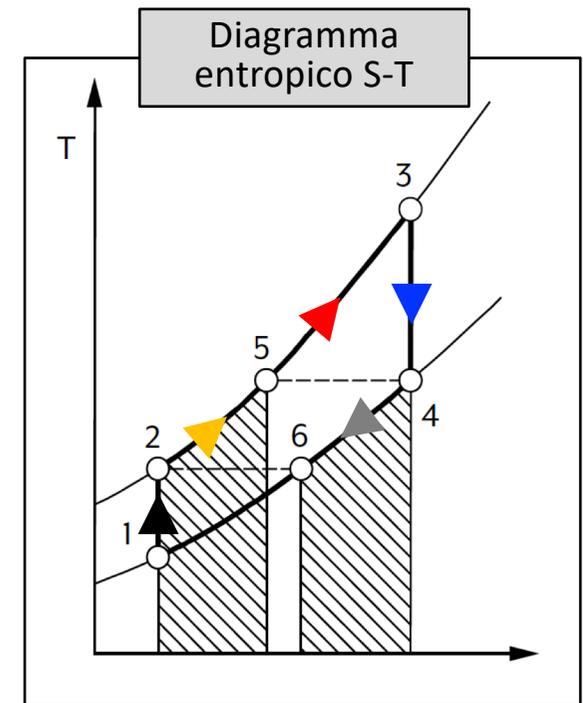
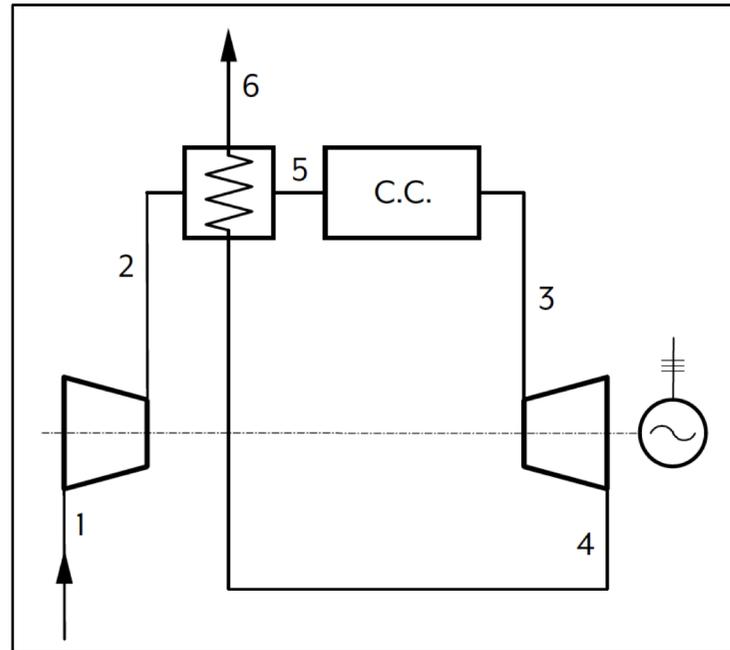
$$\eta_{reale} = \eta_{ideale} \cdot \eta_c \cdot \eta_T \cdot \eta_{cc} = (25 \div 30)\%$$

- 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)



## 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)



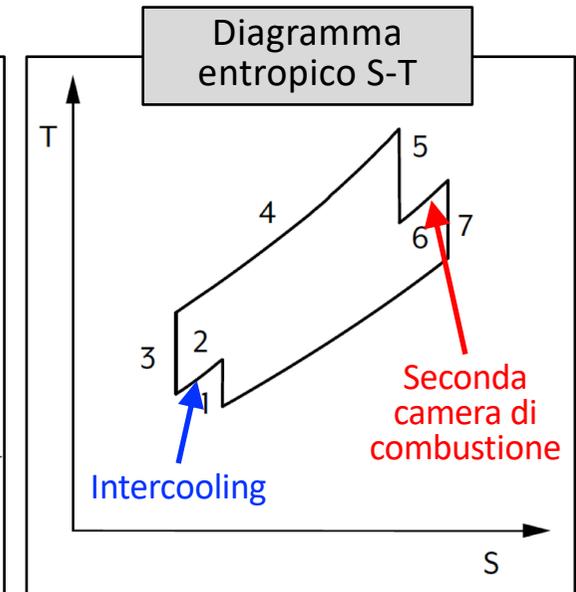
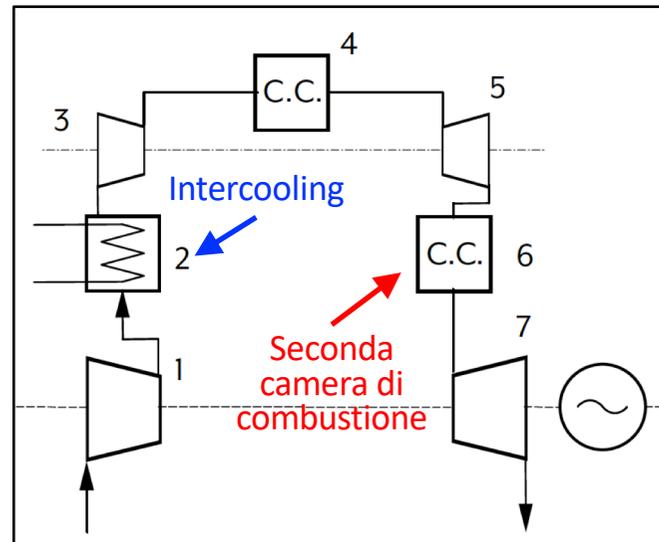
## Impianti turbogas – Ciclo di Brayton multi-stadio

- 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

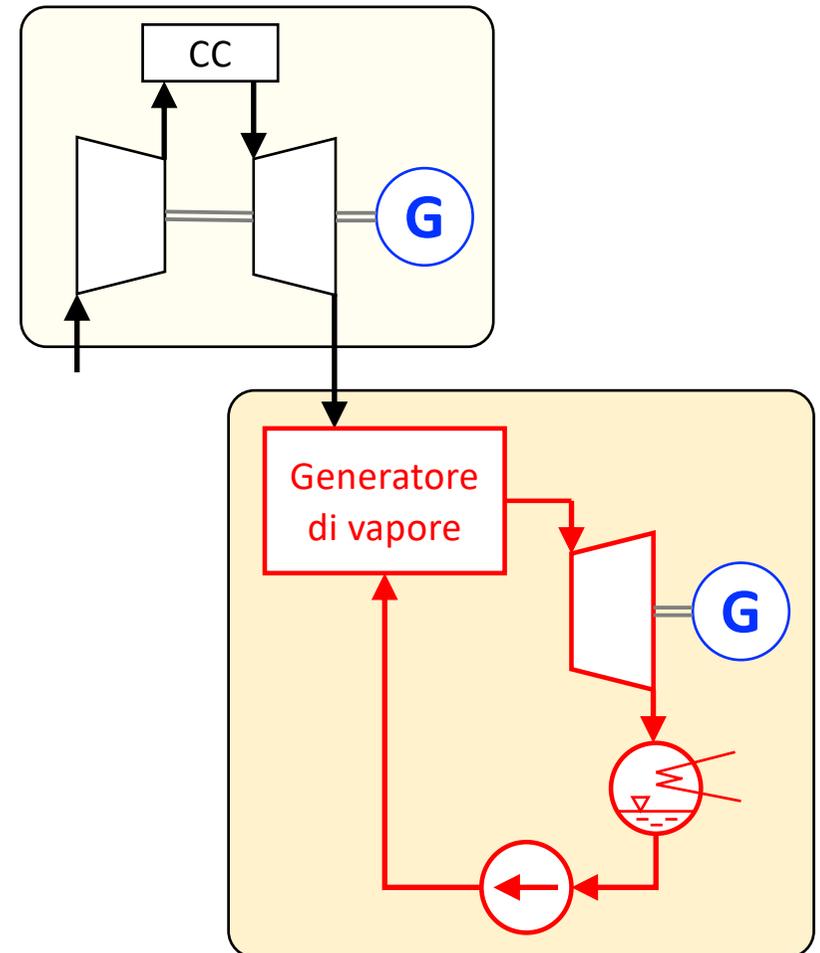
- **Nella fase di espansione**, con seconda camera di combustione (6) tra due turbine in cascata (5 e 7)



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

## Impianti a ciclo combinato

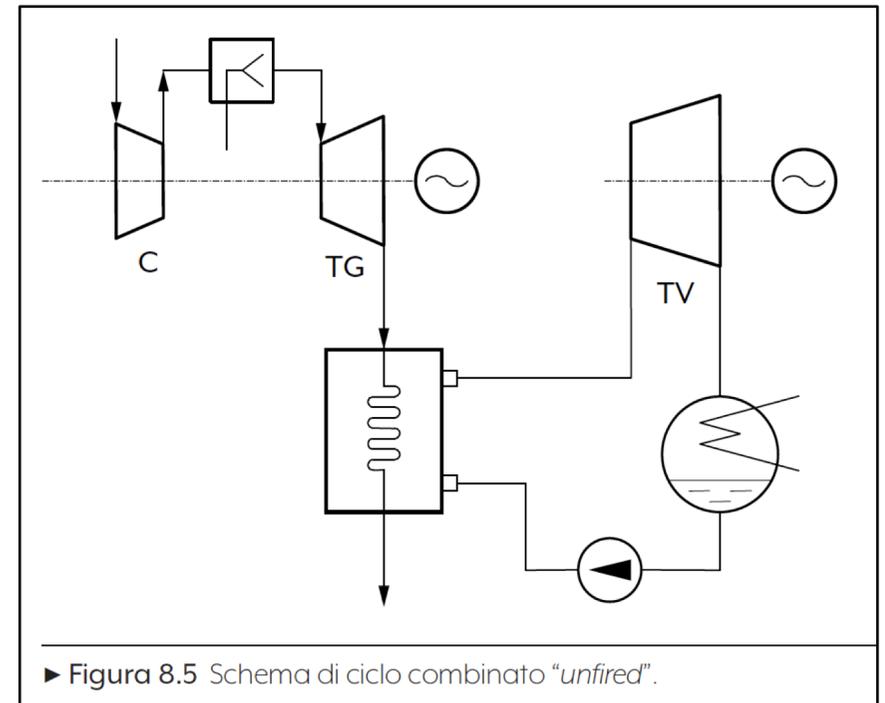
- Il progresso tecnologico dei materiali ha permesso di elevare la temperatura di funzionamento dei palettaggi di turbina ( $800^{\circ}\text{C} \rightarrow 1.000-1.250^{\circ}\text{C}$ )
- Possibile realizzare **impianti a ciclo combinato**
  - I gas di scarico del gruppo turbogas si impiegano per far 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°C



## Impianti a ciclo combinato

### • Ciclo combinato unfired

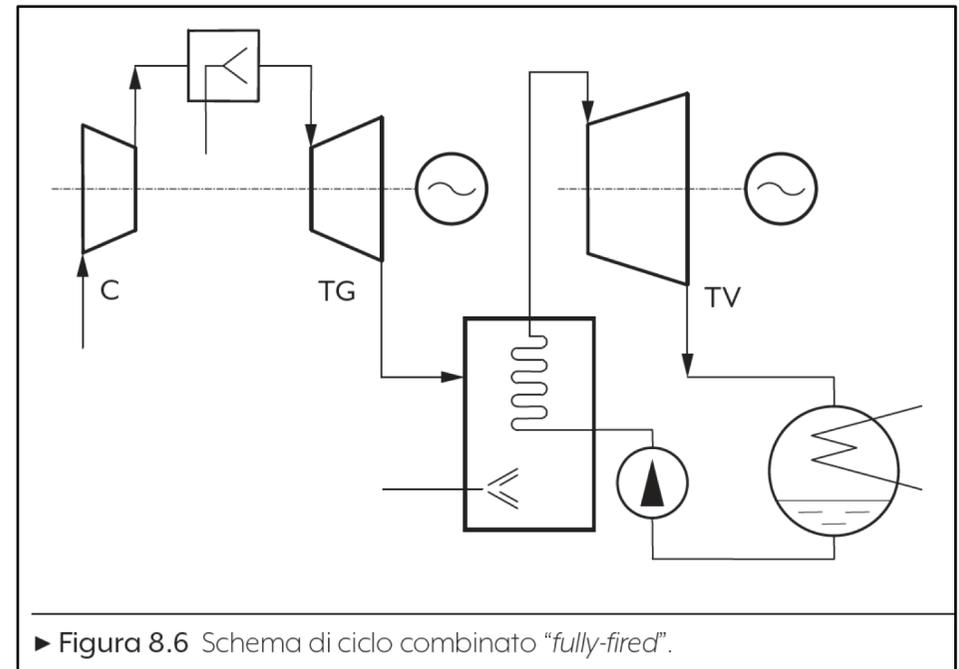
- La “caldaia” adibita alla produzione del vapore è un **puro scambiatore di calore** con temperatura dei gas di scarico fino a 600°C
- La parte competente al ciclo vapore ha un'importanza minoritaria
- Rimane predominante la produzione della sezione turbogas
- Viene recuperata buona parte del calore
  - 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 significativo 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)



## 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

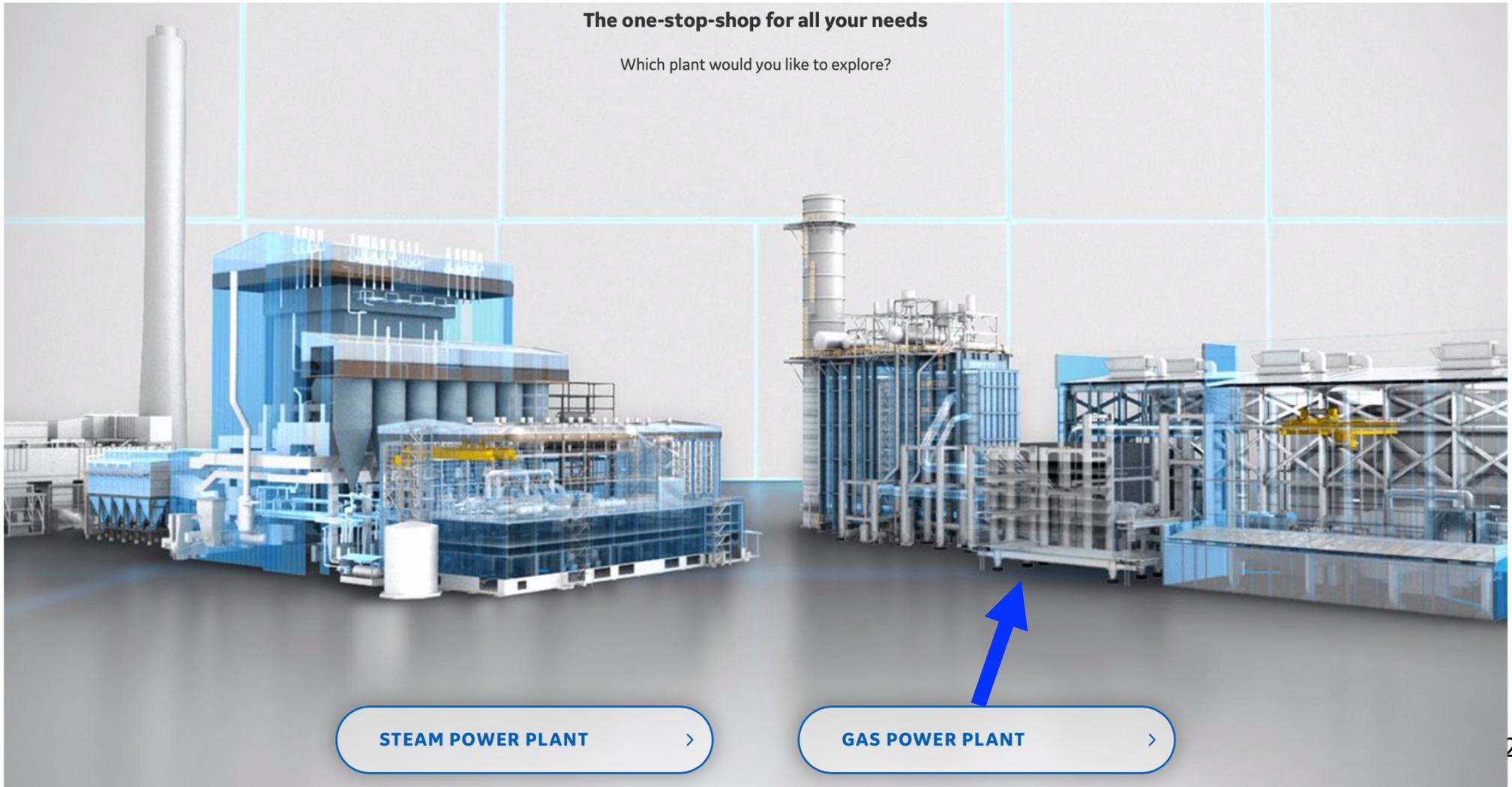


► Figura 8.6 Schema di ciclo combinato "fully-fired".

## Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale

The one-stop-shop for all your needs

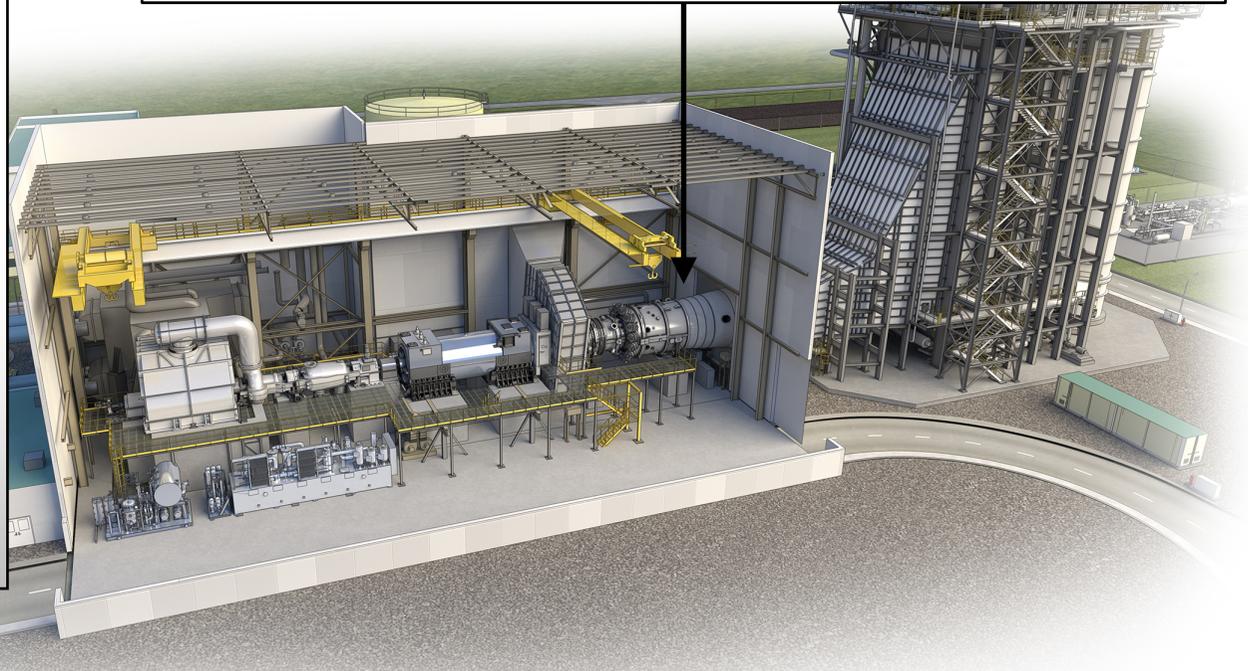
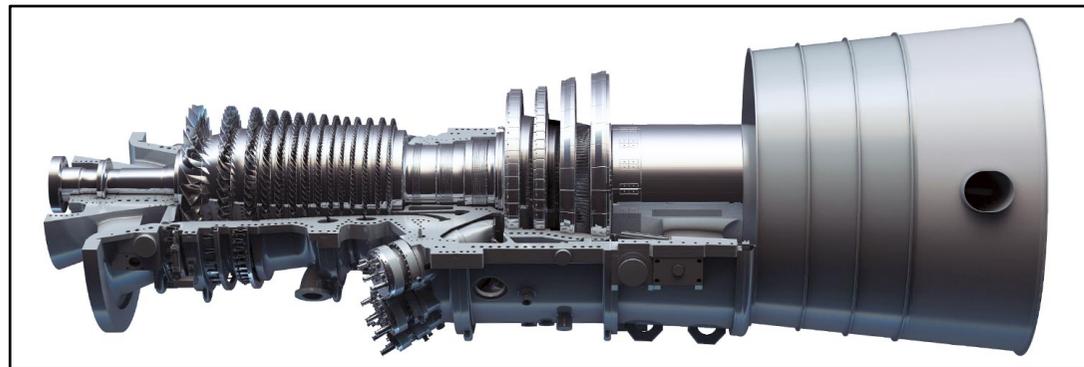
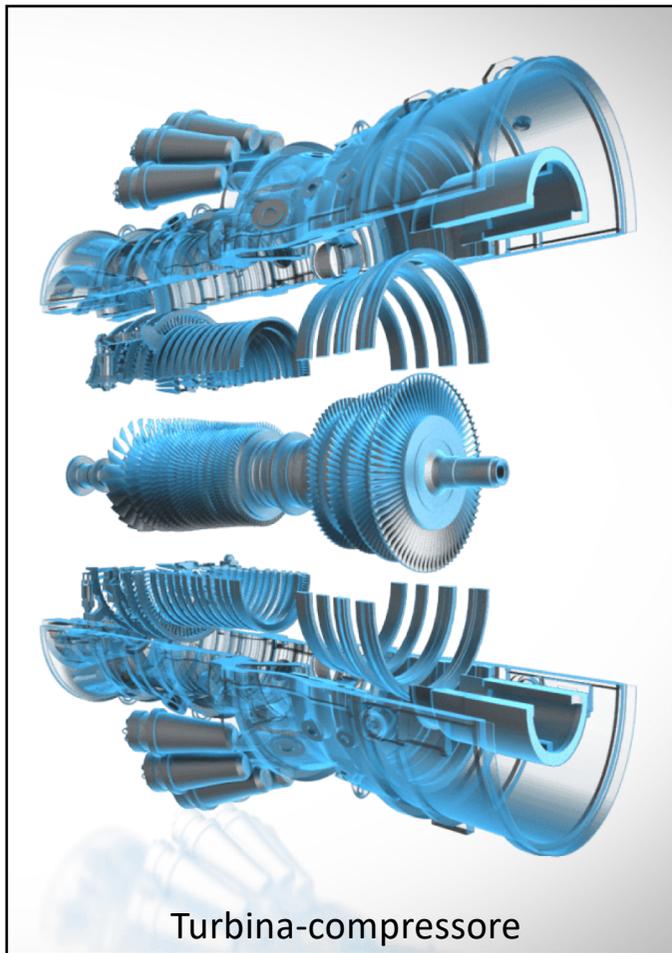
Which plant would you like to explore?



STEAM POWER PLANT >

GAS POWER PLANT >

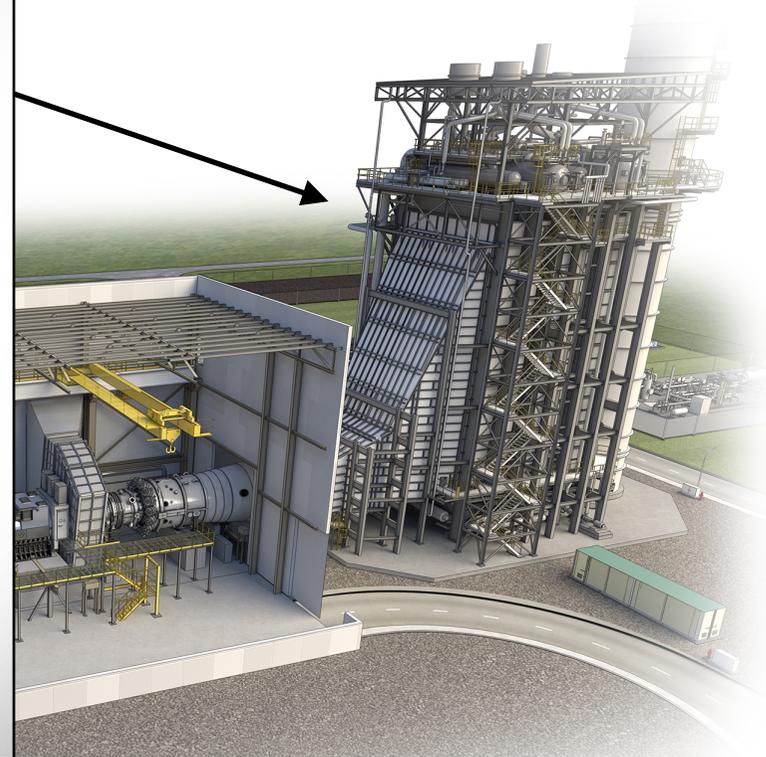
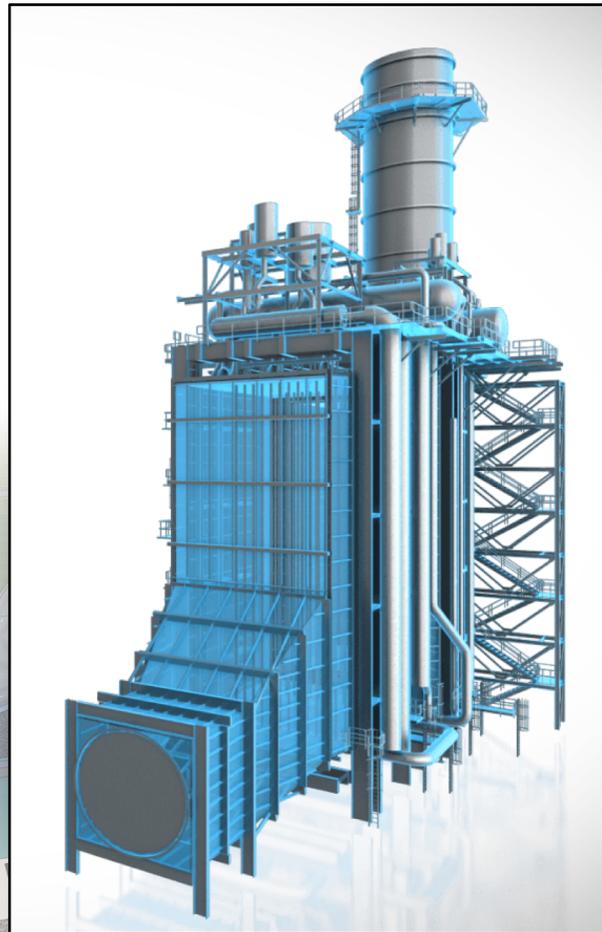
## Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale



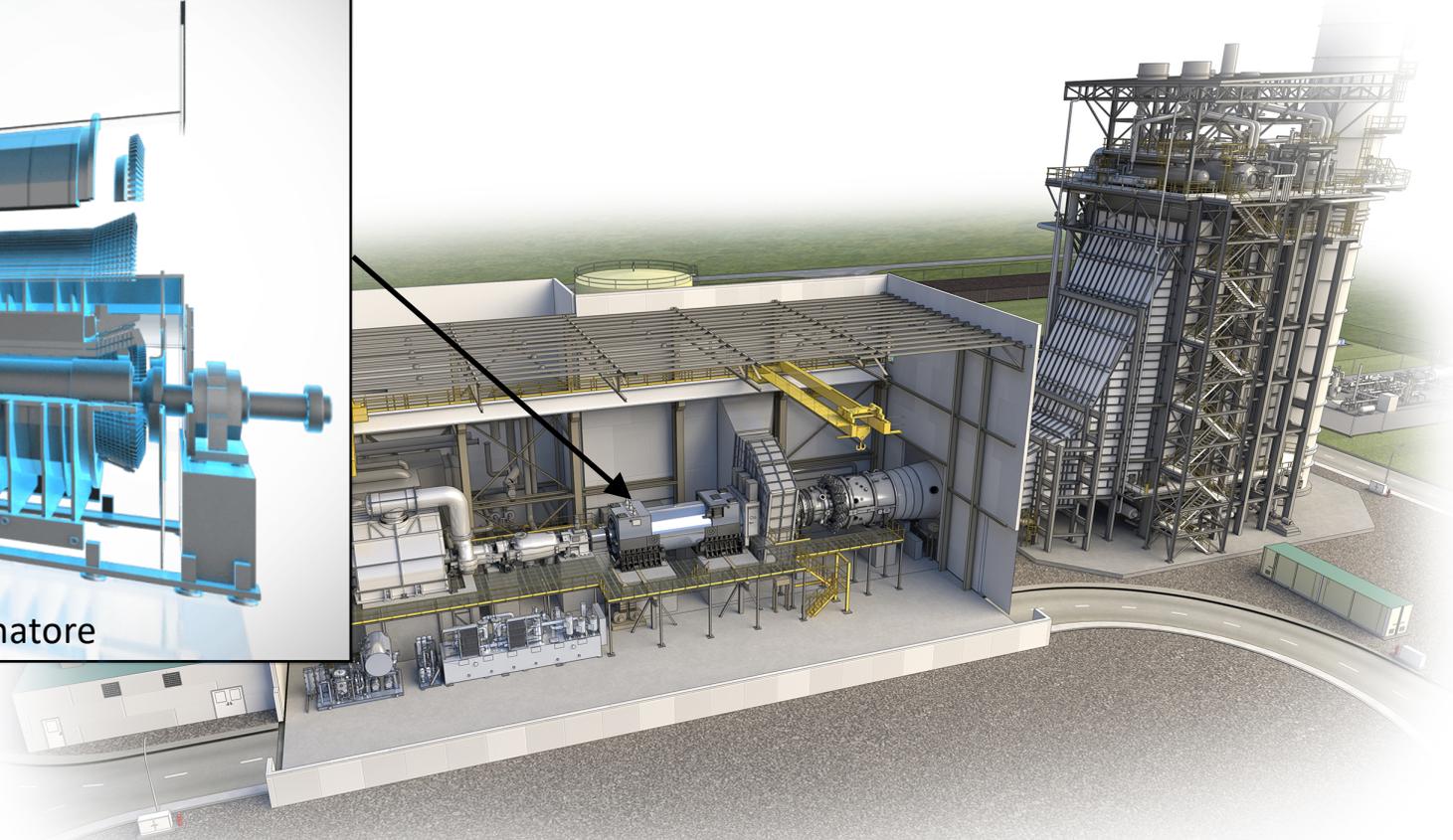
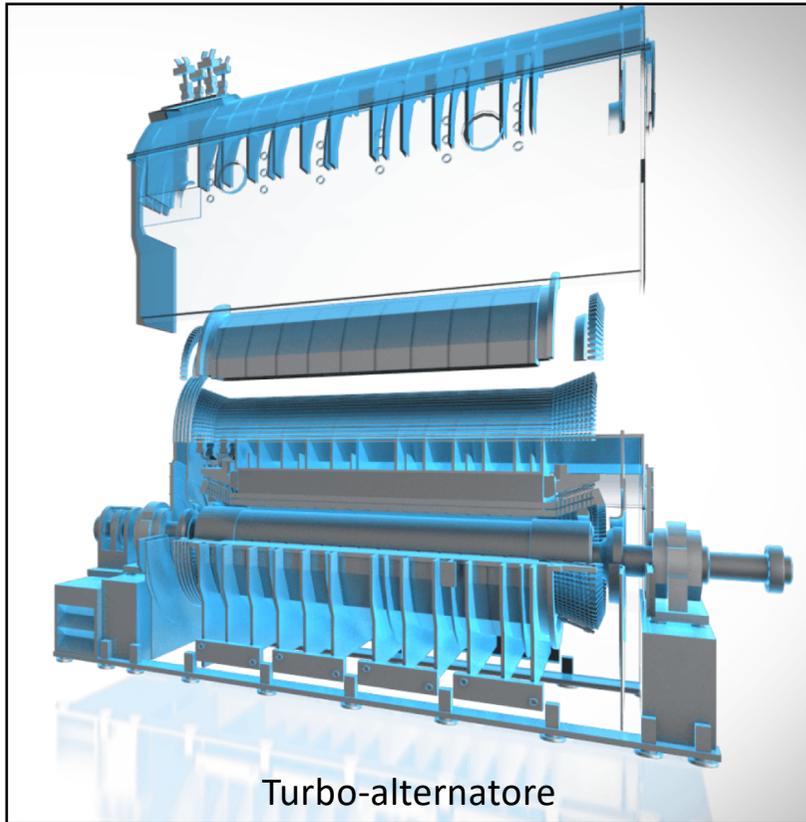
## Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale

### HRSG

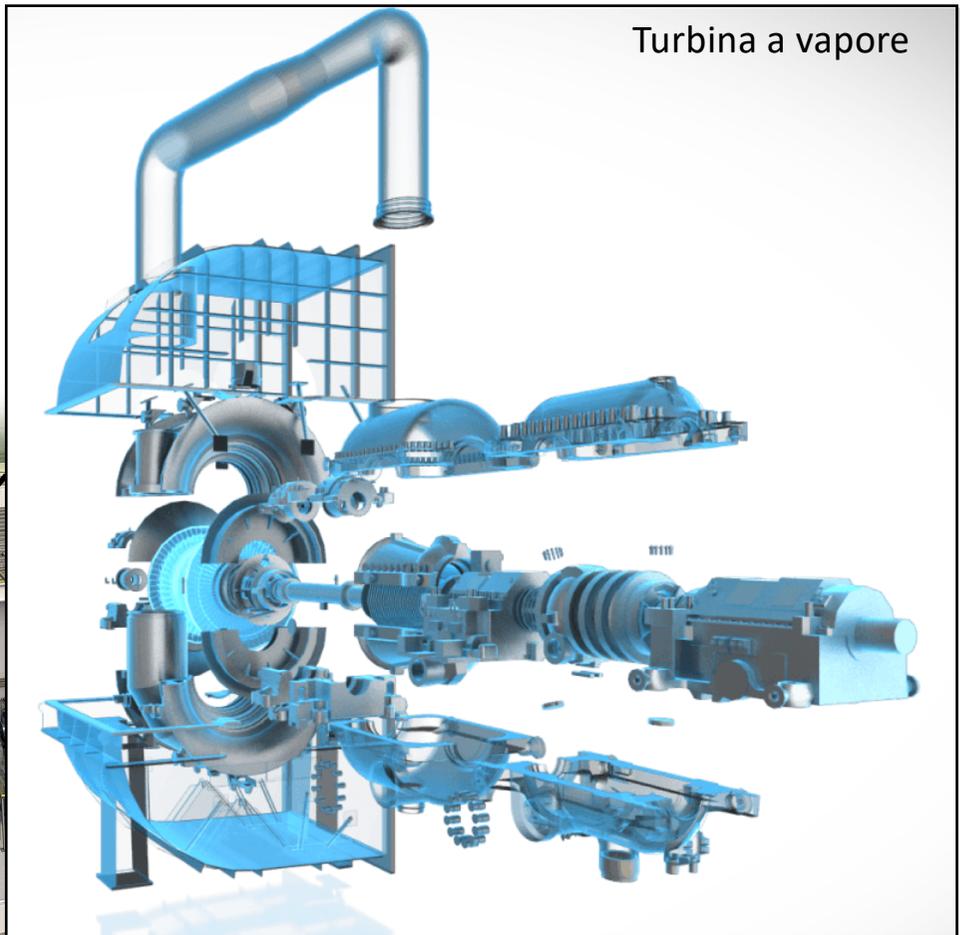
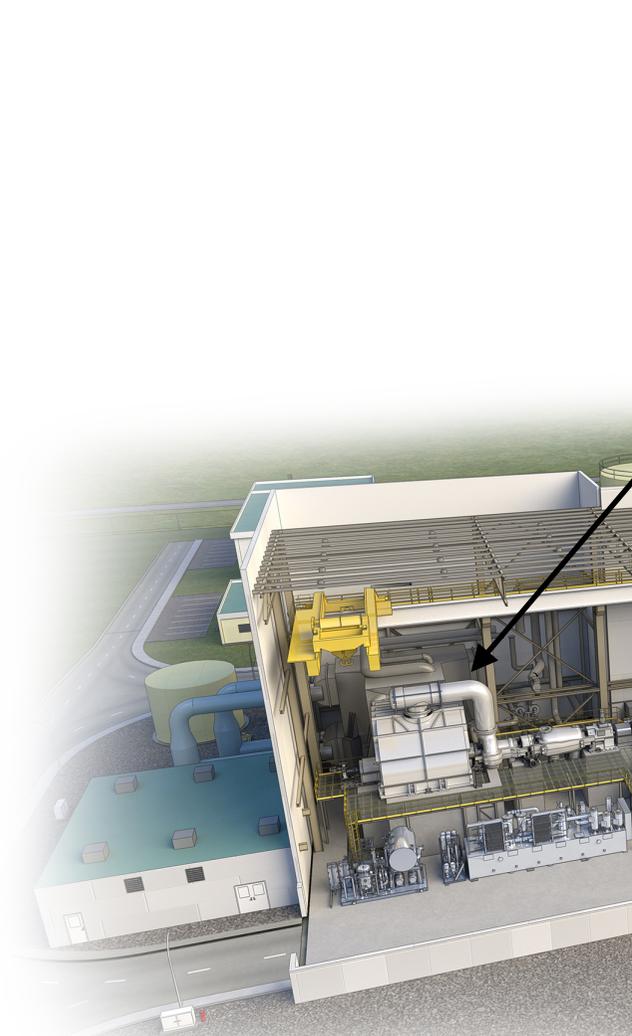
Heat Recovery  
Steam Generator



## Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale

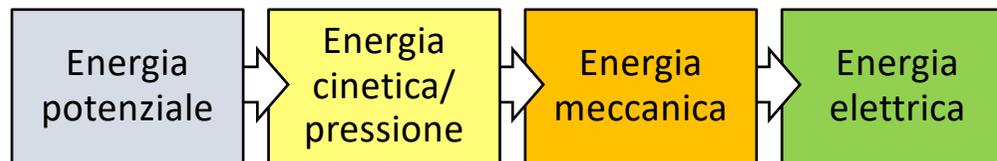
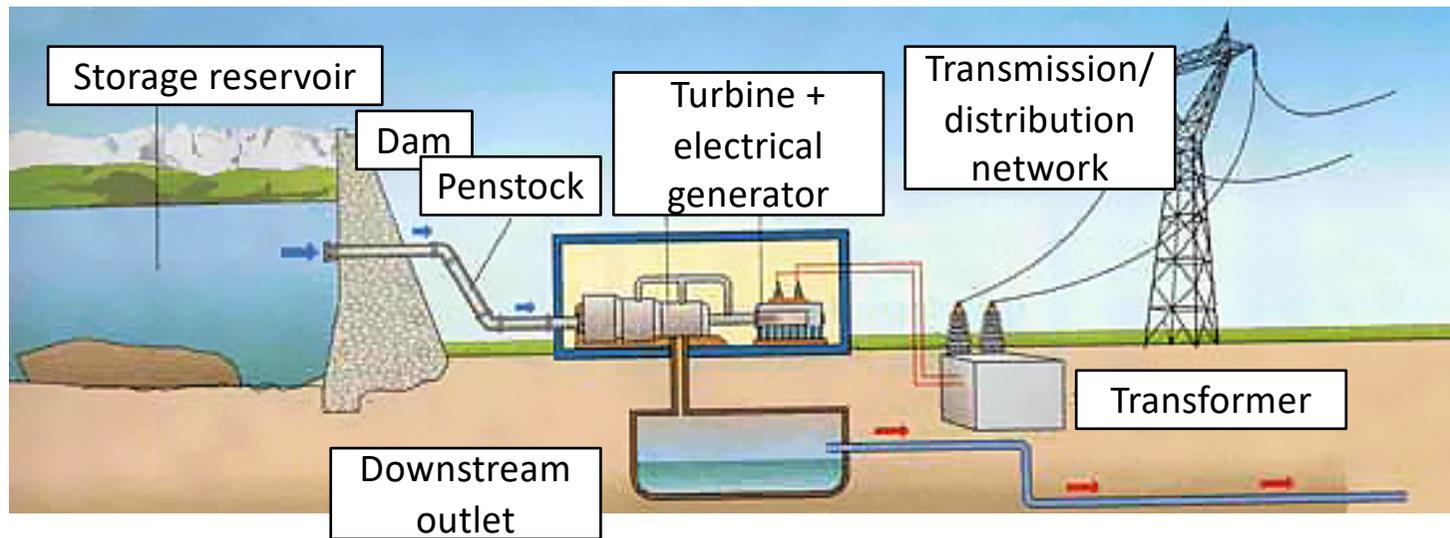


## Impianti a ciclo combinato – Overview commerciale



## Impianti idroelettrici

- Nelle centrali idroelettriche, l'energia potenziale dell'acqua si trasforma in energia cinetica/pressione
- L'energia del flusso fluido è poi convertita in energia meccanica dalla turbina, cui è collegato un generatore elettrico per la produzione di elettricità



## Impianti idroelettrici – Classificazione

### Molteplici criteri di classificazione

$$P_i = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

#### • Potenza nominale P [MW]

- Grandi impianti:  $P > 10 \text{ MW} \rightarrow \text{AT}$
- Piccoli impianti:  $P = 1 - 10 \text{ MW} \rightarrow \text{MT}$
- Mini-impianti:  $P = 0,1 - 1 \text{ MW} \rightarrow \text{MT}$
- Micro-impianti:  $P < 0,1 \text{ MW} \rightarrow \text{BT}$

#### • Portata derivata

- Piccola portata:  $< 10 \text{ m}^3/\text{s}$
- Media portata:  $10 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Grande portata:  $100 - 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$
- Grandissima portata:  $> 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$

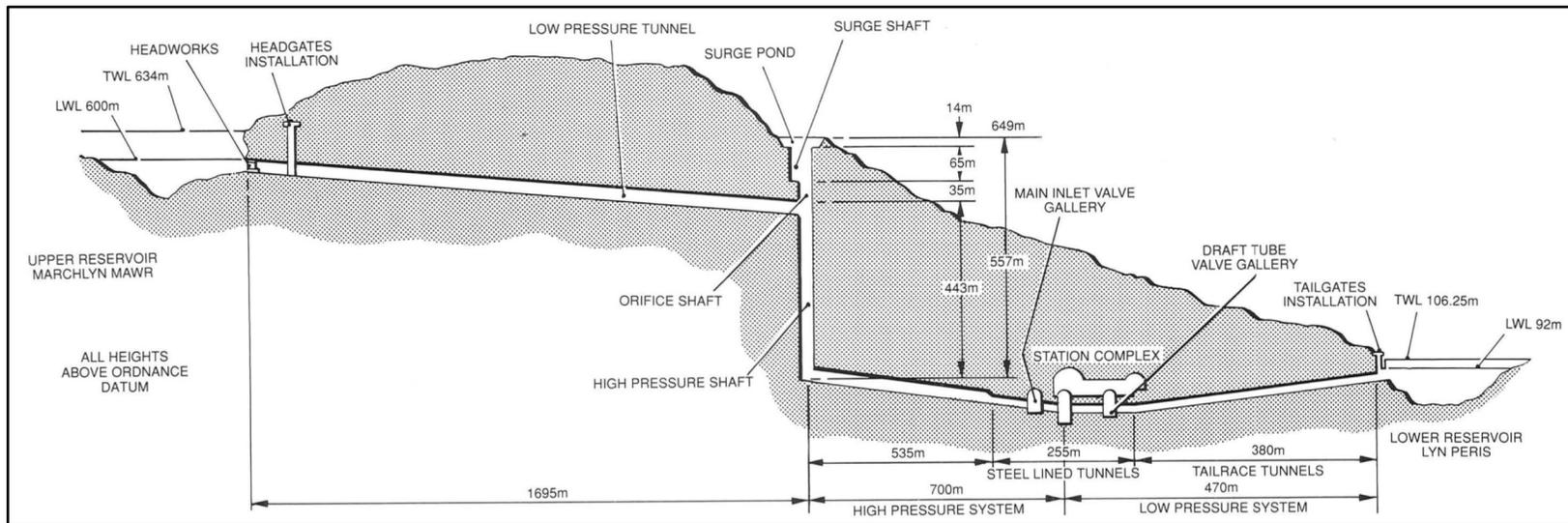
#### • Salto idraulico H [m] $\rightarrow$ Tipo di turbina

- Altissimo salto:  $H > 1.000 \text{ m}$
- Alto salto:  $H = 250 - 1.000 \text{ m}$
- Medio salto:  $H = 50 - 250 \text{ m}$
- Basso salto:  $H < 50 \text{ m}$

#### • Tipologia funzionale (in funzione del tempo necessario per riempire il serbatoio a monte dello sbarramento con la portata media annua del corso d'acqua):

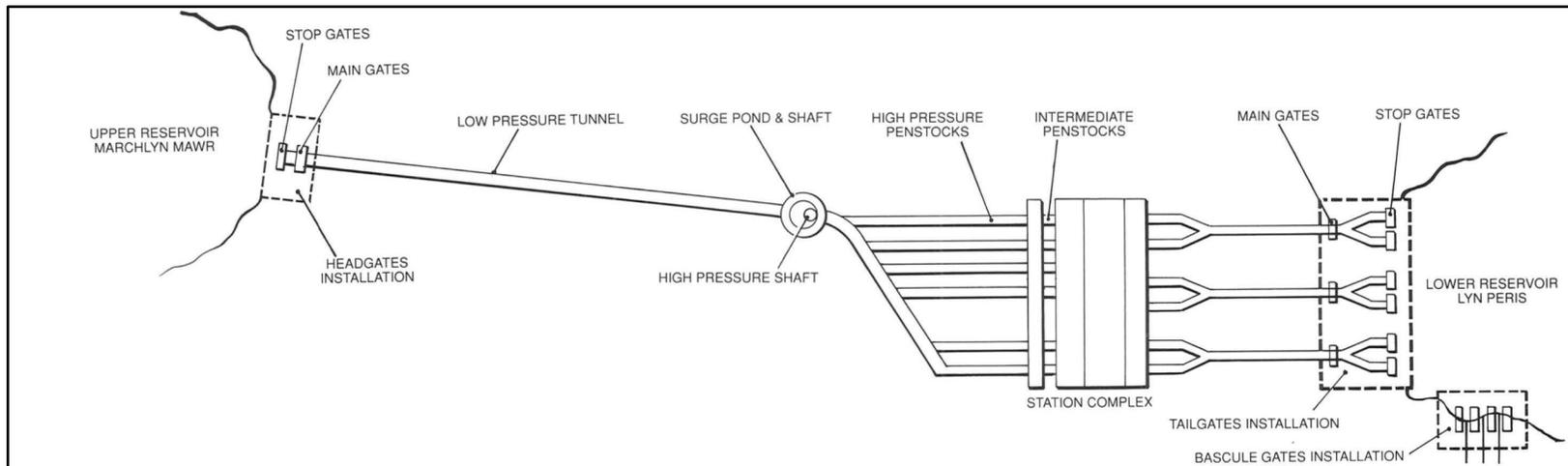
- Ad accumulo tramite pompaggio:  $T > 400 \text{ ore}$
- A bacino/serbatoio:  $T = 2-400/>400 \text{ ore}$
- Ad acqua fluente:  $T < 2 \text{ ore}$

## Impianti idroelettrici – Elementi costitutivi



Sezione pseudo-longitudinale dell'impianto:

- Galleria in pressione
- Pozzo piezometrico
- Condotta forzata in pozzo/caverna



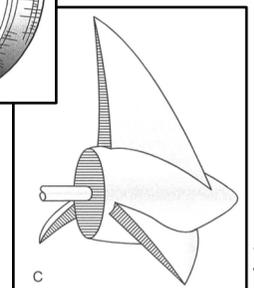
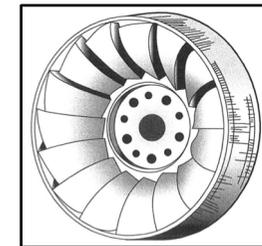
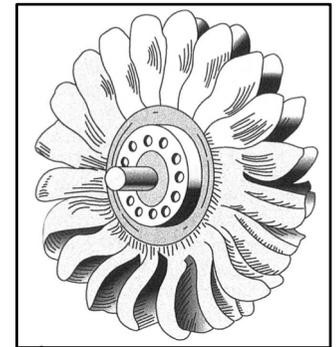
Vista in pianta dell'impianto

## Impianti idroelettrici – Turbine e grado di reazione

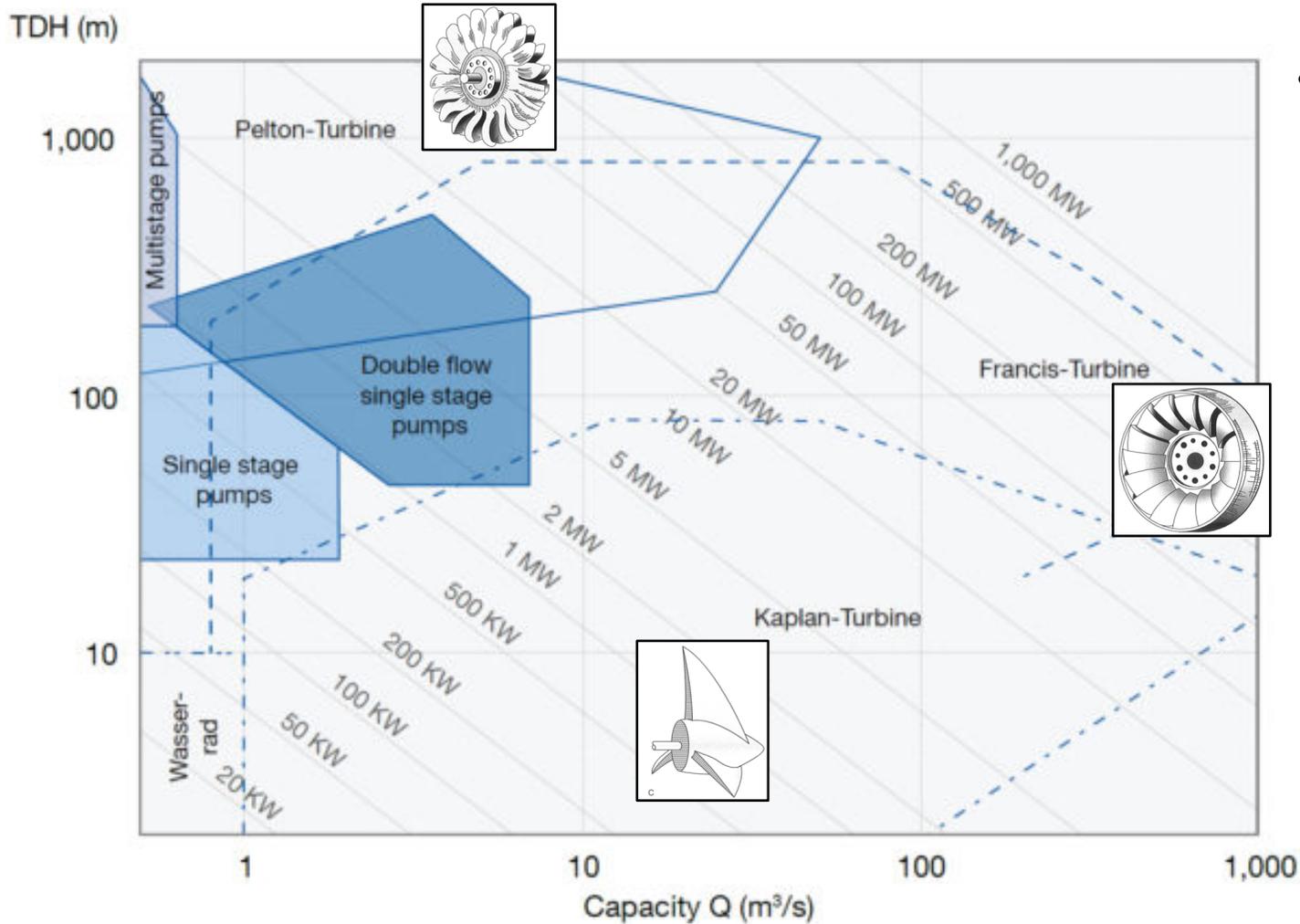
- Il **grado di reazione g.r.** esprime la quota parte di energia potenziale che non è convertita in cinetica nel distributore
  - $V_{i.r.}$  è la velocità dell'acqua in ingresso alla girante
  - g.r. è compreso tra 0 e 1

$$g.r. = \frac{H - \frac{V_{i.r.}^2}{2g}}{H}$$

- Turbine ad azione → Nel distributore (spina Doble) avviene l'intera conversione di energia da potenziale a cinetica → Turbina opera a pressione atmosferica
  - Turbina **Pelton** → g.r. = 0
- Turbina a reazione → La velocità di efflusso dal distributore (ovvero la velocità di ingresso in turbina) non corrisponde all'intera energia potenziale → Acqua in pressione
  - Turbine **Francis** e **Kaplan** → g.r. > 0
  - Nelle turbine a reazione, una parte dell'energia in ingresso alla turbina è comunque di tipo cinetico (g.r. < 1)
  - Il grado di reazione aumenta con la diminuzione del salto motore

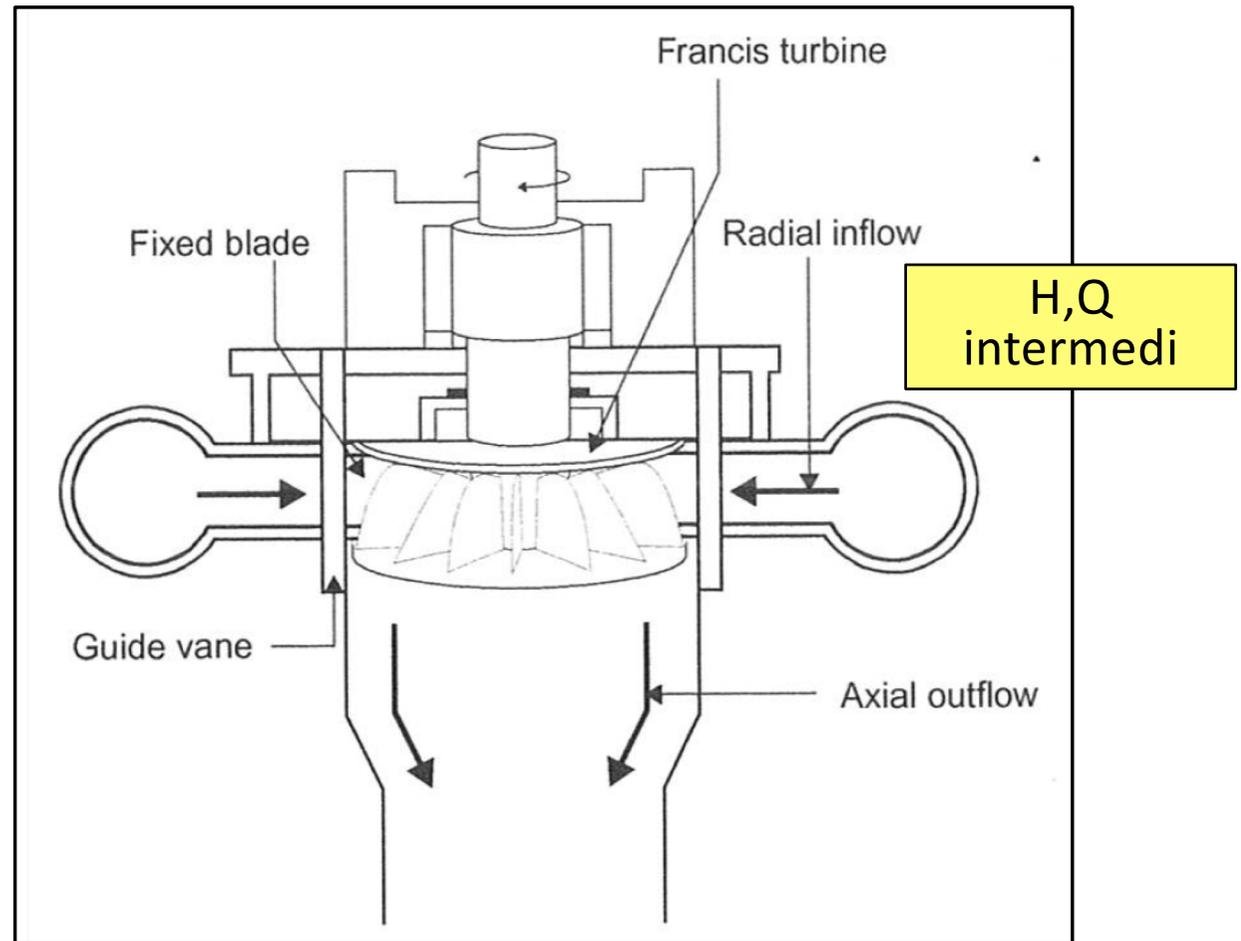
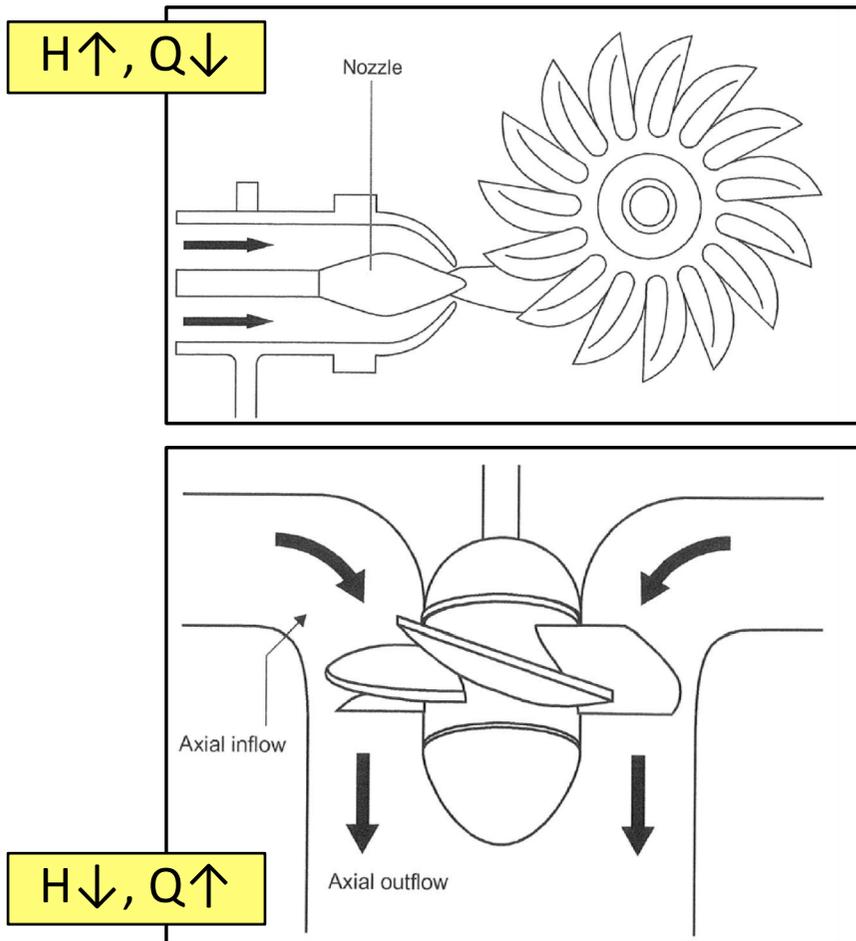


## Impianti idroelettrici – Tipi di turbina nel piano Q-H



- Nel piano Q-H, usando una doppia scala logaritmica, le **curve a potenza costante** diventano rettilinee

## Impianti idroelettrici – Tipi di turbina nel piano Q-H

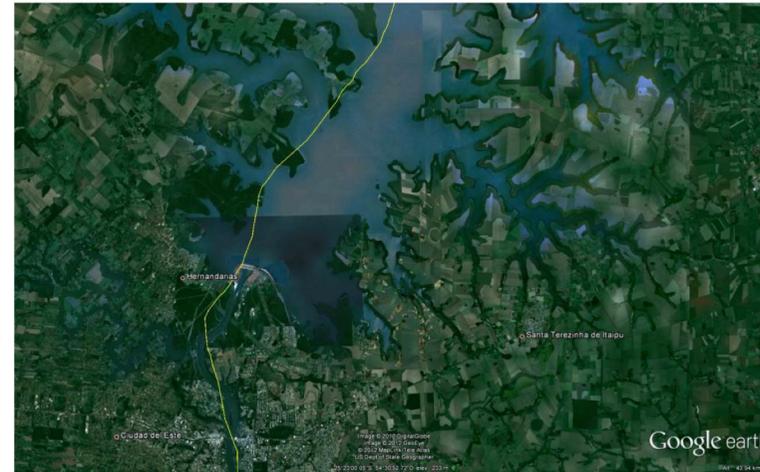
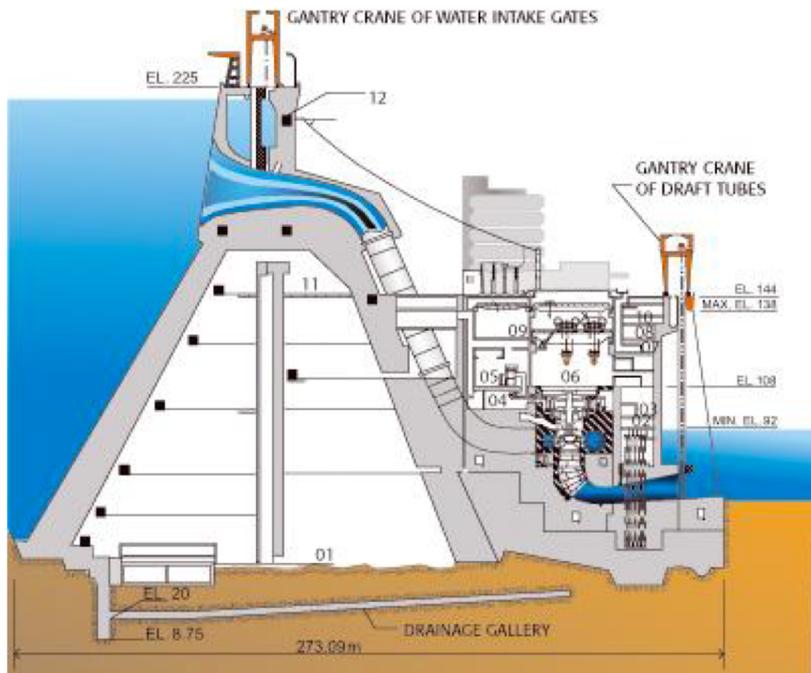


## Impianti idroelettrici – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

- 25°25'27" South, 54°35'35" West
- Rated power output 14 GW (= 20 x 700 MW)
- Net head 118.4 m
- Nominal flow rate 13,800 m<sup>3</sup>/s (690 m<sup>3</sup>/s each turbine)
- Maximum annual generation (2008) 94.69 TWh (~1/3 of the Italian annual consumption)
- Turbine type: Francis, vertical axis
- Penstocks: 10.5 m diameter, 142.2 m length



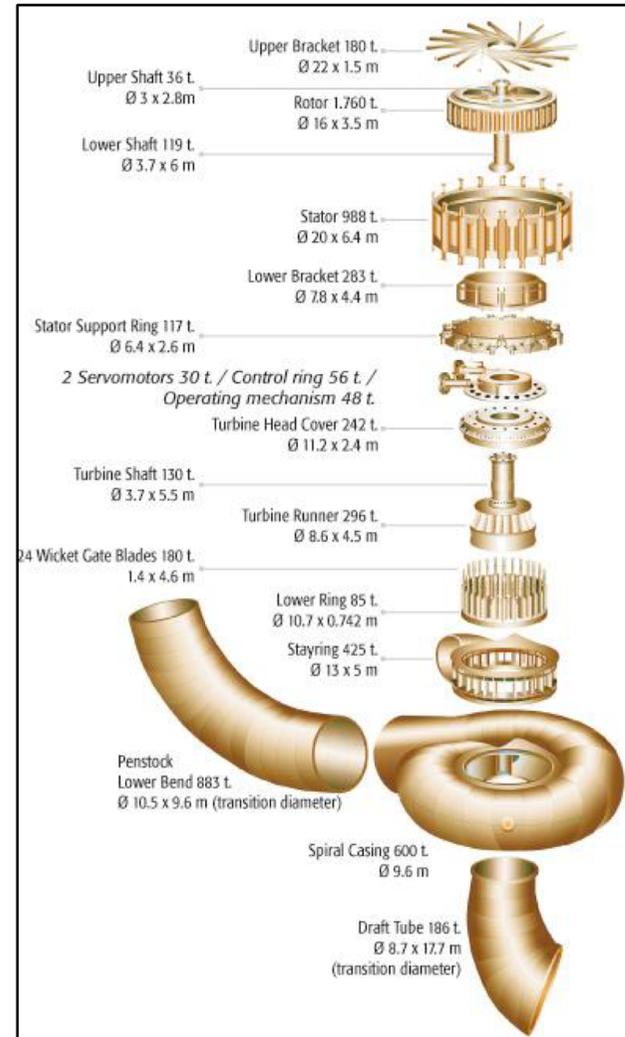
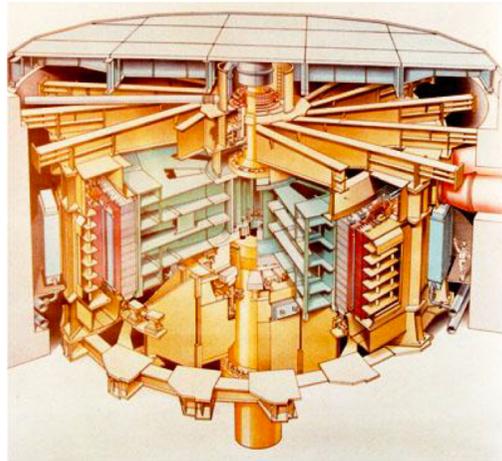
## Impianti idroelettrici – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis



## Impianti idroelettrici – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

Electrical generator

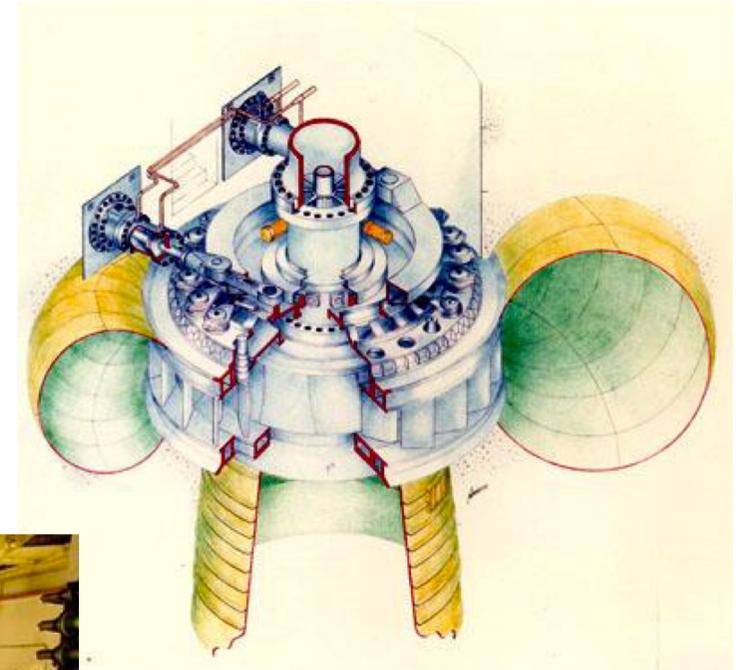
Quantity	20 units
60 Hz Frequency	10 units
50 Hz Frequency	10 units
50/60 Hz Rated power	823.6/737.0 MVA
Rated voltage	18 kV
Number of 50/60 Hz poles	66/78
Moment of inertia - GD2	320,000 t.m <sup>2</sup>
50/60 Hz Power factor	0.85/0.95
Heaviest piece - rotor	1,760 t
Weight of each 50/60 Hz unit	3,343/3,242 t



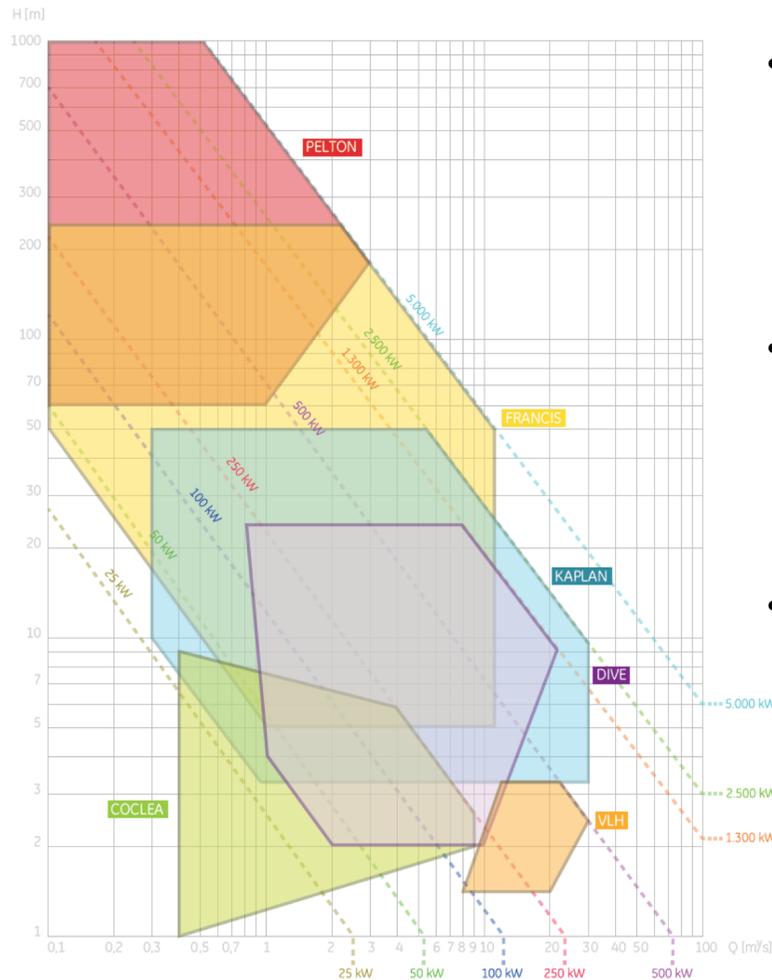
## Impianti idroelettrici – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

### Turbines

Quantity	20
Type	Francis
Unit rated power	715 MW
Project speed - 50/60 Hz	90.9/92.3 rpm
Project net head	118.4 m
Unit rated flow	645 m <sup>3</sup> /s
Heaviest indivisible piece - rotor	296 t
Weight of each unit	3,360 t



## Turbine per mini-micro idroelettrico

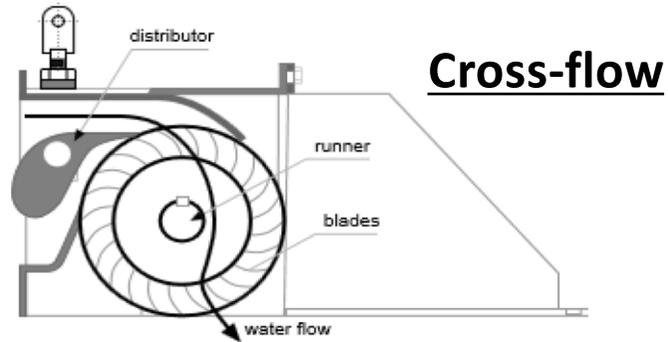


- Negli impianti mini/micro hydro vengono utilizzate sia **tecnologie tradizionali** (Pelton, Francis, Kaplan) che **tecnologie dedicate** (Dive, Coclea, VLH)
- Importante analizzare il posizionamento delle varie tecnologie nel **piano portata/salto**
- Rappresentando entrambi gli assi in scala logaritmica, si ottengono delle **rette inclinate a potenza costante** (facilità di lettura del grafico)

## Turbine per mini-micro idroelettrico



**Mini Francis**



**Turbina DIVE**



**Coclea**



**Turbina VLH**

