www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale «La transizione energetica dal ciclo Rankine al turbogas: Il caso Enel»

Tutor universitario: Prof. Arianna Berto

Laureando: *Marco Maso*

Padova, 12/09/2024

OBIETTIVI DEL LAVORO

www.dii.unipd.it

L'elaborato si propone lo scopo di analizzare la transizione energica che orienta il suo percorso verso la decarbonizzazione, prendendo come caso di studio la Centrale termoelettrica «Andrea Palladio» di Fusina (VE).

I punti trattati:

- La descrizione e le varie differenze dei cicli termodinamici Rankine e Brayton – Joule.
- Vantaggi del ciclo combinato turbogas.

Centrale "Palladio" di Fusina (VE)

CICLO RANKINE

www.dii.unipd.it

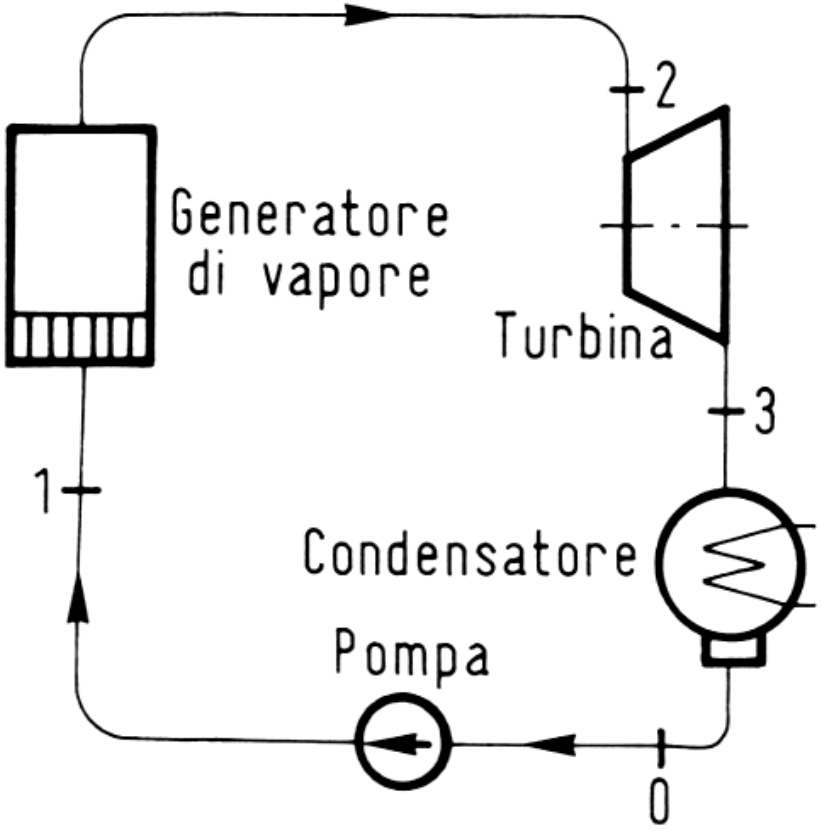
- Il ciclo Rankine è la rappresentazione del processo termodinamico utilizzato nelle centrali termoelettriche per la produzione di energia elettrica.
- La sua evoluzione e ottimizzazione hanno portato allo sviluppo di impianti sempre più efficienti, come i cicli combinati, che integrano turbine a gas e a vapore per massimizzare il rendimento energetico.

Generatore di Calore: riscalda e vaporizza il fluido di lavoro, fornendo il calore positivo del ciclo.

Turbina: espande il vapore producendo lavoro meccanico utile.

Condensatore: condensa il vapore scaricato dalla turbina, asportando calore.

Pompa: riporta il fluido alla pressione di ingresso del generatore di calore.



FASI DEL CICLO RANKINE REALE E IDEALE

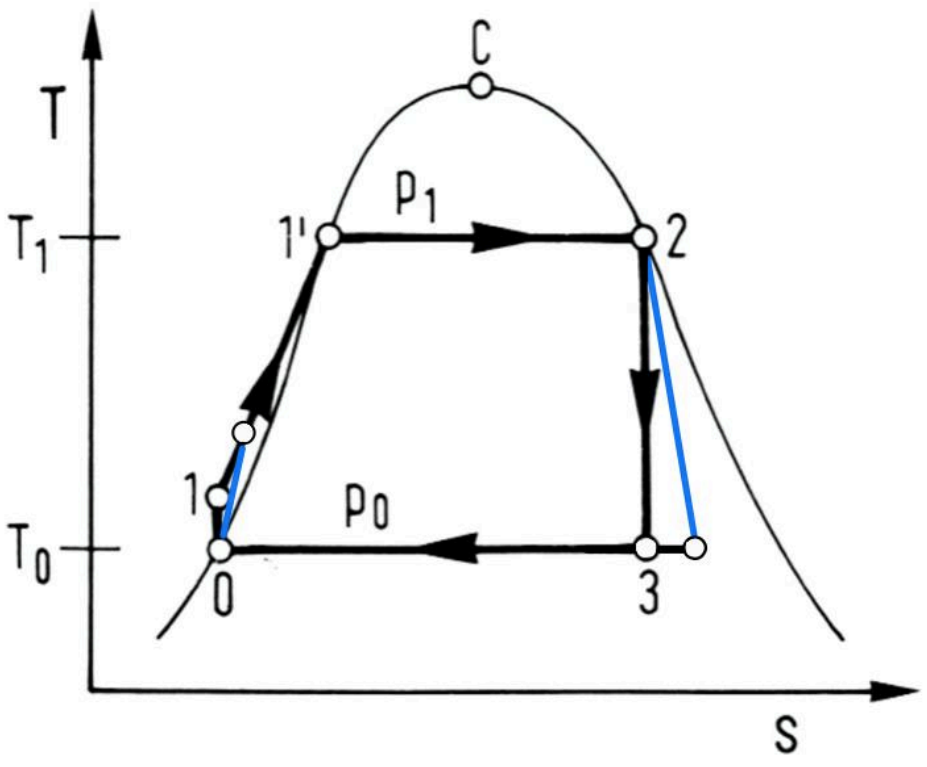
www.dii.unipd.it

1 **Compressione Adiabatica**: il fluido viene compresso dalla pompa in modo isoentropico (0-1).

2 **Riscaldamento Isobaro**: il fluido viene riscaldato a pressione costante fino alla vaporizzazione (1-2).

3 **Espansione Adiabatica**: il vapore si espande nella turbina producendo lavoro (2-3).

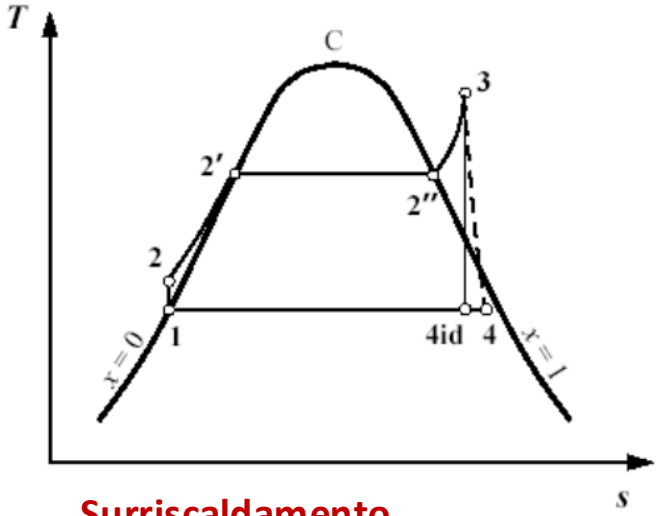
4 **Condensazione Isobara**: il vapore viene condensato a pressione costante (3-0).



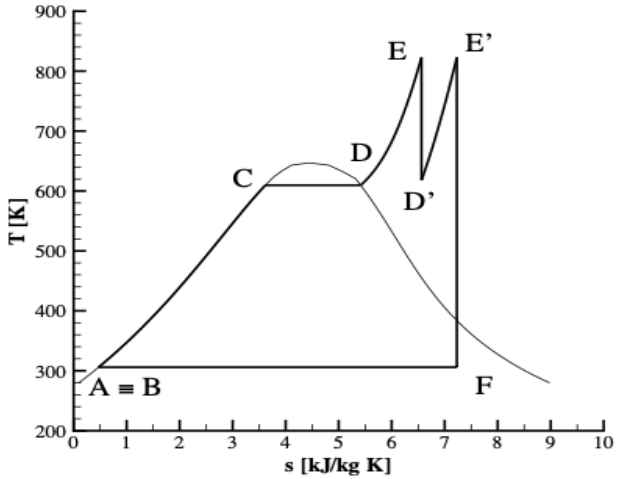
CICLO RANKINE REALE E OTTIMIZZAZIONI

www.dii.unipd.it

Per aumentare l'efficienza del ciclo Rankine il vapore prima di essere immesso nella turbina subisce dei surriscaldamenti nella caldaia. Tale ciclo, noto come ciclo di Hirn, permette di ottenere maggiore lavoro utile e ridurre l'umidità del vapore allo scarico della turbina limitando le erosioni alla palettatura. Il risurriscaldamento consiste nel surriscaldare nuovamente il vapore che ha parzialmente lavorato in turbina per poi essere riemesso nella turbina stessa a completare l'espansione



Surriscaldamento



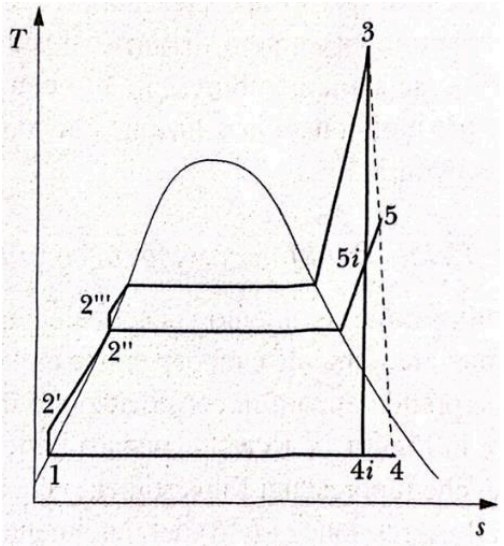
Risurriscaldamento

- ✓ **Ciclo Base**: efficienza limitata, problemi di umidità vapore in turbina.
- ✓ **Surriscaldamento**: maggiore lavoro, minore umidità vapore allo scarico.
- ✓ **Risurriscaldamento**: ulteriore aumento di efficienza e potenza.

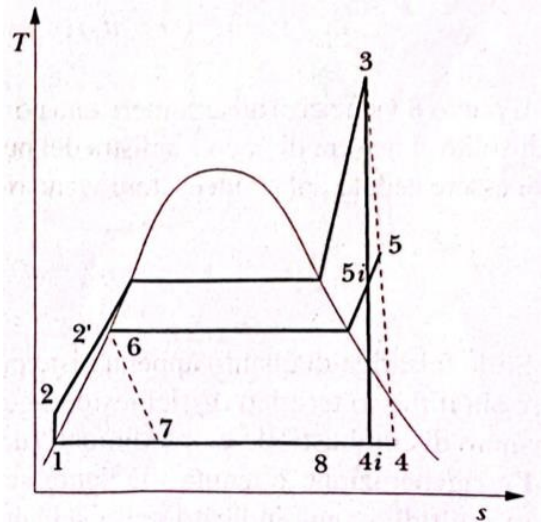
RIGENERAZIONE NEL CICLO RAKINE

www.dii.unipd.it

La rigenerazione termica è un'ulteriore tecnica per migliorare l'efficienza del ciclo Rankine. Consiste nello spillare porzioni di vapore dalla turbina per preriscaldare l'acqua di alimento caldaia Questo processo riduce il calore che la caldaia deve fornire all'acqua. Esistono due tipi principali di scambiatori rigenerativi: **a miscelamento e a superficie**. I primi offrono un migliore scambio termico ma richiedono più pompe, mentre quelli a superficie sono più compatti.



Scambiatore a miscela



Scambiatore a superficie

1 **Estrazione Vapore**

Prelievo di vapore (spillamento) dalla turbina a varie pressioni.

2 **Preriscaldamento**

L'acqua di alimento viene riscaldata negli scambiatori rigenerativi.

3 **Reimmissione**

L'acqua preriscaldata ritorna al generatore di vapore.

IL CICLO BRAYTON – JOULE

www.dii.unipd.it

Il ciclo Brayton-Joule è la rappresentazione grafica del principio di funzionamento delle turbine a gas. Consiste in una compressione dell'aria, seguita da combustione isobara e successiva espansione in turbina. Opera con temperature medie più elevate sia in ingresso che in uscita.

1 **Compressione**

L'aria viene compressa nel compressore.

2 **Combustione**

Il combustibile viene bruciato con l'aria compressa nella camera di combustione (combustore).

3 **Espansione**

I gas caldi si espandono nella turbina producendo lavoro.

4 **Scarico**

I gas esausti vengono espulsi nell'atmosfera o utilizzati in un ciclo combinato.

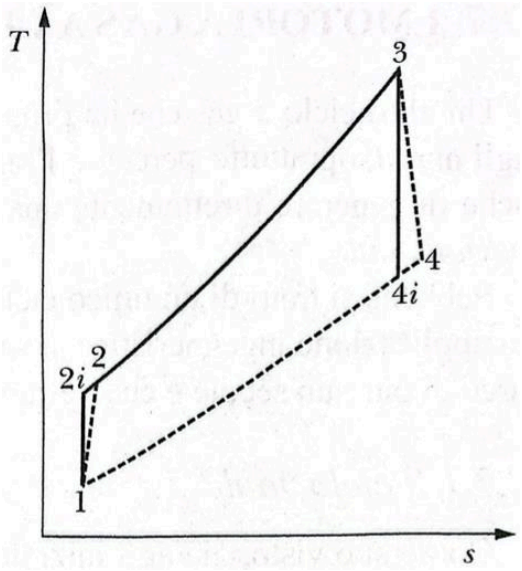


Diagramma termodinamico del ciclo Brayton-Joule sul piano T-s

IMPIANTI A TURBOGAS

www.dii.unipd.it

- Utilizzano il ciclo Brayton-Joule per la produzione di energia elettrica;
- Caratterizzati da una rapida messa in servizio e flessibilità operativa, rendendoli ideali per gestire i picchi di domanda;
- È importante il loro impiego in combinazione con impianti a vapore nei cicli combinati.

Rapida risposta: avviamento veloce per coprire picchi di domanda richiesti dalla rete elettrica .

Flessibilità: adattabilità a diverse condizioni operative

Innovazioni: tecnologie avanzate per migliorare le prestazioni possibilità di generare vapore.

CICLO COMBINATO GAS-VAPORE

www.dii.unipd.it

1. **Integrazione di due cicli**: il ciclo combinato unisce un ciclo Brayton-Joule (turbina a gas) con un ciclo Rankine (turbina a vapore).

2. **Recupero del calore**: i gas di scarico della turbina a gas vengono utilizzati per generare vapore in un generatore di vapore a recupero (HRSG).

3. **Alta efficienza**: l'integrazione dei due cicli permette di raggiungere rendimenti superiori al 60%, molto più alti dei cicli singoli.

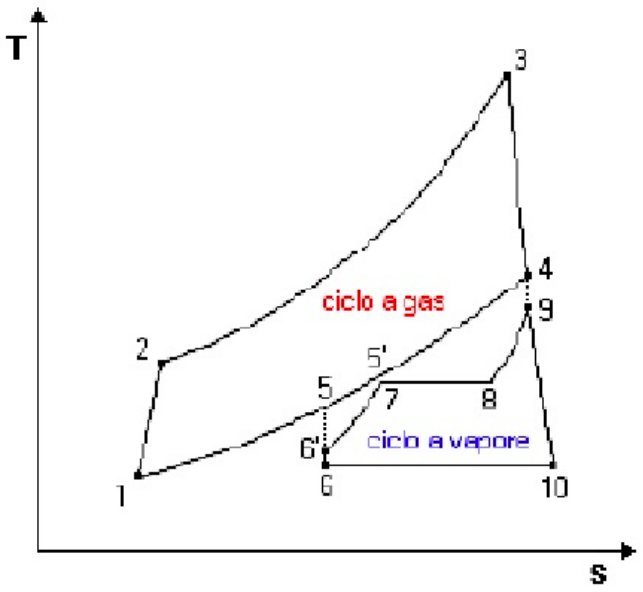


Diagramma termodinamico del ciclo combinato di una moderna sul piano T-s

IL CICLO COMBINATO

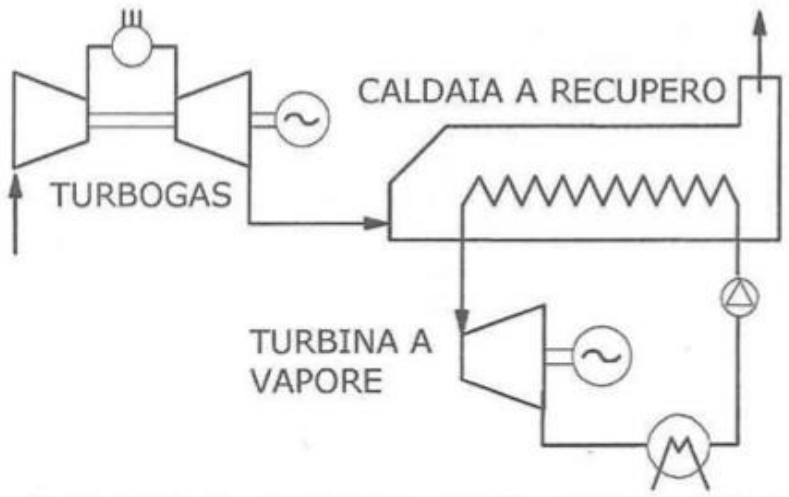
www.dii.unipd.it

- Unisce i vantaggi del ciclo Brayton-Joule e del ciclo Rankine;
- I gas di scarico della turbina a gas vengono utilizzati per generare vapore in un generatore di vapore a recupero (HRSG), alimentando una turbina a vapore;
- Permette di raggiungere efficienze superiori al 60%, sfruttando le alte temperature del ciclo a gas e le basse temperature di condensazione del ciclo a vapore.

1 **Ciclo Topping (Gas)**: produzione di energia elettrica e calore ad alta temperatura.

2 **Recupero Calore**: generazione di vapore nell'HRSG dai gas di scarico.

3 **Ciclo Bottoming (Vapore)**: ulteriore produzione di energia elettrica dal vapore generato.



Schema di impianto ciclo combinato

GENERATORE DI VAPORE A RECUPERO (HRSG)

www.dii.unipd.it

- Componente chiave del ciclo combinato;
- Recupera il calore dai gas di scarico della turbina a gas per produrre vapore;
- Opera a temperature più basse e principalmente lo scambio termico fumi e fluido di lavoro avviene per convezione e in contro corrente;
- La sua progettazione ottimizzata, uso di tubi alettati, permette di massimizzare il recupero di calore e l'efficienza complessiva del ciclo combinato.

1. Scambio termico efficiente: disposizione in controcorrente per massimizzare il recupero di calore.

2. Struttura compatta: utilizzo di tubi alettati per aumentare la superficie di scambio.

3. Flessibilità operativa: capacità di adattarsi a diverso condizioni di carico della turbina a gas.

4. Multilivello: possibilità di generare vapore a diverse pressioni per ottimizzare l'efficienza.

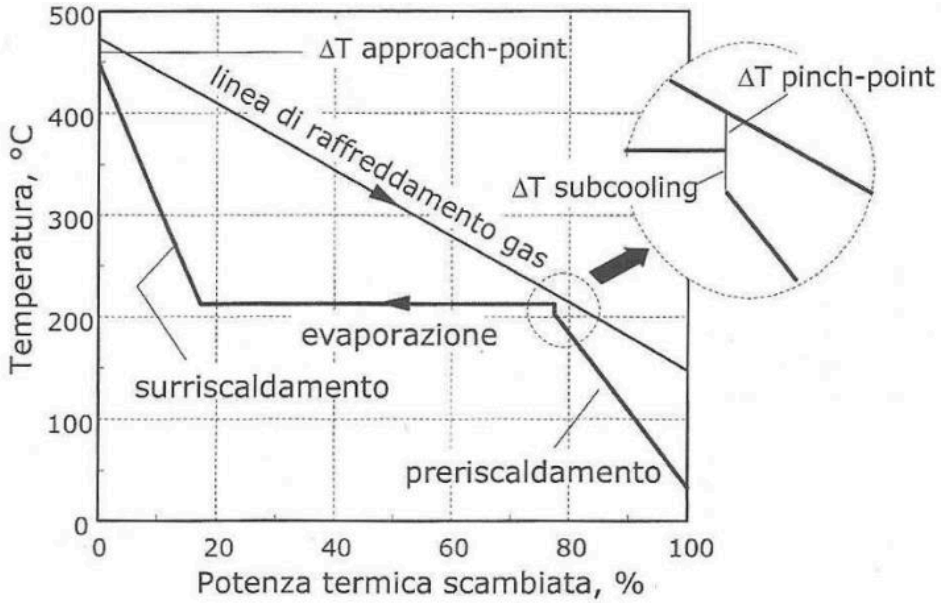


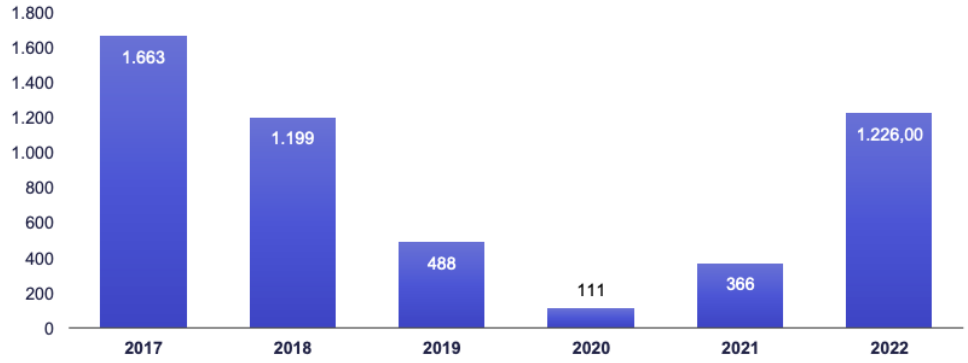
Diagramma del recupero termico in una caldaia a recupero monolivello

CONFRONTO TRA IL CICLO RANKINE E IL CICLO COMBINATO TURBOGAS

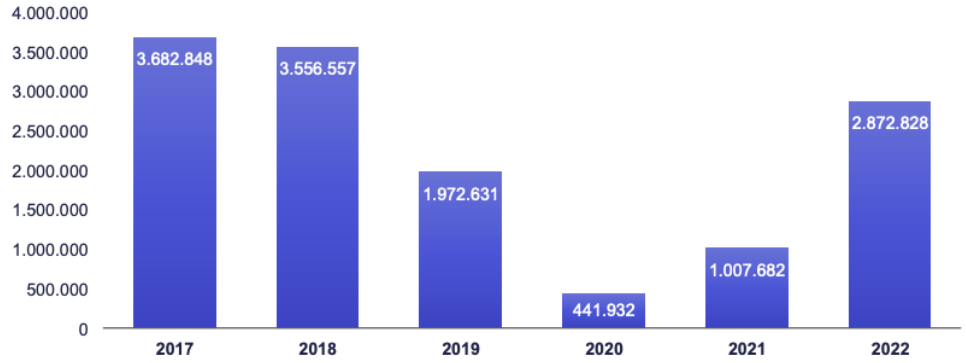
www.dii.unipd.it

CICLO RANKINE

- ✓ Biossido di zolfo: SO_2;
- ✓ Ossidi di azoto: NO_X;
- ✓ Polveri;
- ✓ Monossido di carbonio: CO;
- ✓ Anidride carbonica: CO_2.



Emissioni di ossidi di azoto (dati in t)



Emissioni di anidride carbonica (dati in t)

VANTAGGI DEL CICLO COMBINATO TURBOGAS

www.dii.unipd.it

- ✓ **Bassi costi di investimento e produzione** rispetto al ciclo Rankine;
- ✓ **Ottime caratteristiche termodinamiche**, anche per impianti di dimensioni minori;
- ✓ **Migliore efficienza** grazie all'uso di gas naturale, che permette di rilasciare fumi a temperature più basse;
- ✓ **Semplicità dell'impianto**, con componenti standardizzati e tempi di consegna brevi;
- ✓ **Tempi di avviamento rapidi**, con 2/3 della potenza erogata in circa 30 minuti;
- ✓ **Eccellenti prestazioni ambientali**, con emissioni ridotte di polveri e ossidi di azoto gestibili tramite tecniche appropriate.

Limiti medi orari emissioni

- ✓ Ossidi di azoto NO_X: 10 mg/Nm3, calcolati su base secca con un contenuto di ossigeno del 15%;
- ✓ Monossido di carbonio CO: 30 mg/Nm3, calcolati su base secca con un contenuto di ossigeno del 15%;
- ✓ Ammoniaca NH_3: 5 mg/Nm3, calcolati su base secca con un contenuto di ossigeno del 15%.

CONCLUSIONI

www.dii.unipd.it

PRESTAZIONI CICLO COMBINATO	
Potenza lorda	837.3 MW
Consumo specifico lordo	5751.0 kJ/kWh
Consumo specifico netto	5902 kJ/kWh
Potenza ausiliari	21.5 MW
Potenza netta	Gestione 815.9 MW

- ✓ Il ciclo combinato turbogas risulta più efficiente e con minore impatto ambientale;
- ✓ Adatto alla transizione energetica, ma con limitazioni legate a infrastrutture e investimenti iniziali elevati;
- ✓ Necessità di ottimizzare costi e integrare nuove tecnologie per migliorare ulteriormente efficienza e sostenibilità;
- ✓ La ricerca suggerisce prospettive promettenti per lo sviluppo delle centrali termoelettriche future.