



Ricerca di Sistema elettrico

Design della sezione EGR di una micro-turbina Turbec T100

G. Messina, R. Lo Presti, M. Nobili,

Design della sezione EGR di una micro-turbina Turbec T100

G. Messina, R. Lo Presti, M. Nobili,

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: TECNOLOGIE E METODOLOGIE 'LOW CARBON' E EDIFICI AD ENERGIA QUASI ZERO

Progetto: TECNOLOGIE E METODOLOGIE 'LOW CARBON' E EDIFICI AD ENERGIA QUASI ZERO (NZEB)

Obiettivo: a.1 – Cicli turbogas EGR

Responsabile del Progetto: Dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 IMPLEMENTAZIONE DELL'ASSETTO EGR SULL'IMPIANTO AGATUR.....	6
2.1 CONFIGURAZIONE DELLA LINEA DI RICIRCOLO	7
2.2 TEE DI ESTRAZIONE DEL FLUIDO EGR	8
2.3 GAS DAMPER.....	9
2.4 GAS COOLER.....	10
2.5 BLOWER.....	11
2.6 DIFFUSORE.....	14
2.7 IMPLEMENTAZIONE E TEST DEL SISTEMA DI CONTROLLO	15
3 CONCLUSIONI	17
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	17

Sommario

L'implementazione dell'assetto EGR sulla turbina a gas dell'impianto AGATUR costituisce il salto tecnologico verso la realizzazione di un prototipo. Nell'assetto EGR-emulato sviluppato nel corso dell'attuale piano triennale, il fluido di lavoro viene artificialmente creato in un dispositivo esterno al limite di batteria della turbina a gas. L'obiettivo nel caso in questione consiste invece nel realizzare un processo integrato con la turbina a gas, in grado di autosostenersi e di modificare significativamente l'inviluppo operativo della macchina in configurazione standard.

Dal punto di vista del sistema di controllo, la realizzazione di un prototipo richiede l'implementazione di un sistema, anche in questo caso, in grado di autosostenersi, con l'obiettivo spingere al massimo l'automazione e ridurre al minimo l'intervento dell'operatore o, in altri termini, che consenta di gestire e colmare il salto concettuale tra il sistema di controllo distribuito (DCS), tipico degli impianti, e la Engine Control Unit (ECU) tipica dei motori. Ciò implica la necessità di un hardware versatile e compatto in grado di interfacciarsi con un linguaggio di programmazione adatto all'implementazione di algoritmi di controllo più complessi. A ciò si aggiunge la necessità di dover dialogare efficacemente con il sistema di controllo a bordo della turbina a gas, che dovrà essere "stimolato" per ottenere reazioni coerenti con il nuovo assetto operativo.

Il fine ultimo dell'attività di ricerca consiste nel migliorare la performance della turbina a gas ai carichi parziali, incrementando l'efficienza e riducendo le emissioni. La strategia alla base di questi obiettivi prevede il condizionamento del fluido aspirato dalla macchina, modificandone la temperatura, la composizione e, indirettamente, la portata, al variare del regime operativo.

Le attività svolte in questo trimestre hanno consentito di giungere alla configurazione definitiva della linea di ricircolo, individuando la sequenza dei componenti necessari al condizionamento termico del fluido ricircolato e alla modulazione della portata. Per ognuno dei componenti è stato individuato e definito il dominio operativo. Con riferimento al sistema di controllo, è stato identificato e acquisito l'hardware ed è stata implementata e testata "a caldo" la configurazione di base del sistema, nelle sue componenti hardware e software. Le attività fin qui svolte hanno pertanto concretizzato le condizioni per la futura realizzazione di un prototipo di turbina a gas in assetto EGR.

1 Introduzione

L'implementazione dell'assetto EGR sulla turbina a gas dell'impianto AGATUR costituisce il salto tecnologico verso la realizzazione di un prototipo. Nell'assetto EGR-emulato sviluppato nel corso dell'attuale piano triennale, il fluido di lavoro viene artificiosamente creato in un dispositivo esterno al limite di batteria della turbina a gas. L'obiettivo nel caso in questione consiste invece nel realizzare un processo integrato con la turbina a gas, in grado di autosostenersi e di modificare significativamente l'involuppo operativo della macchina in configurazione standard. Le modifiche a cui sarà soggetta la turbina a gas saranno sia a livello impiantistico sia a livello del sistema di controllo.

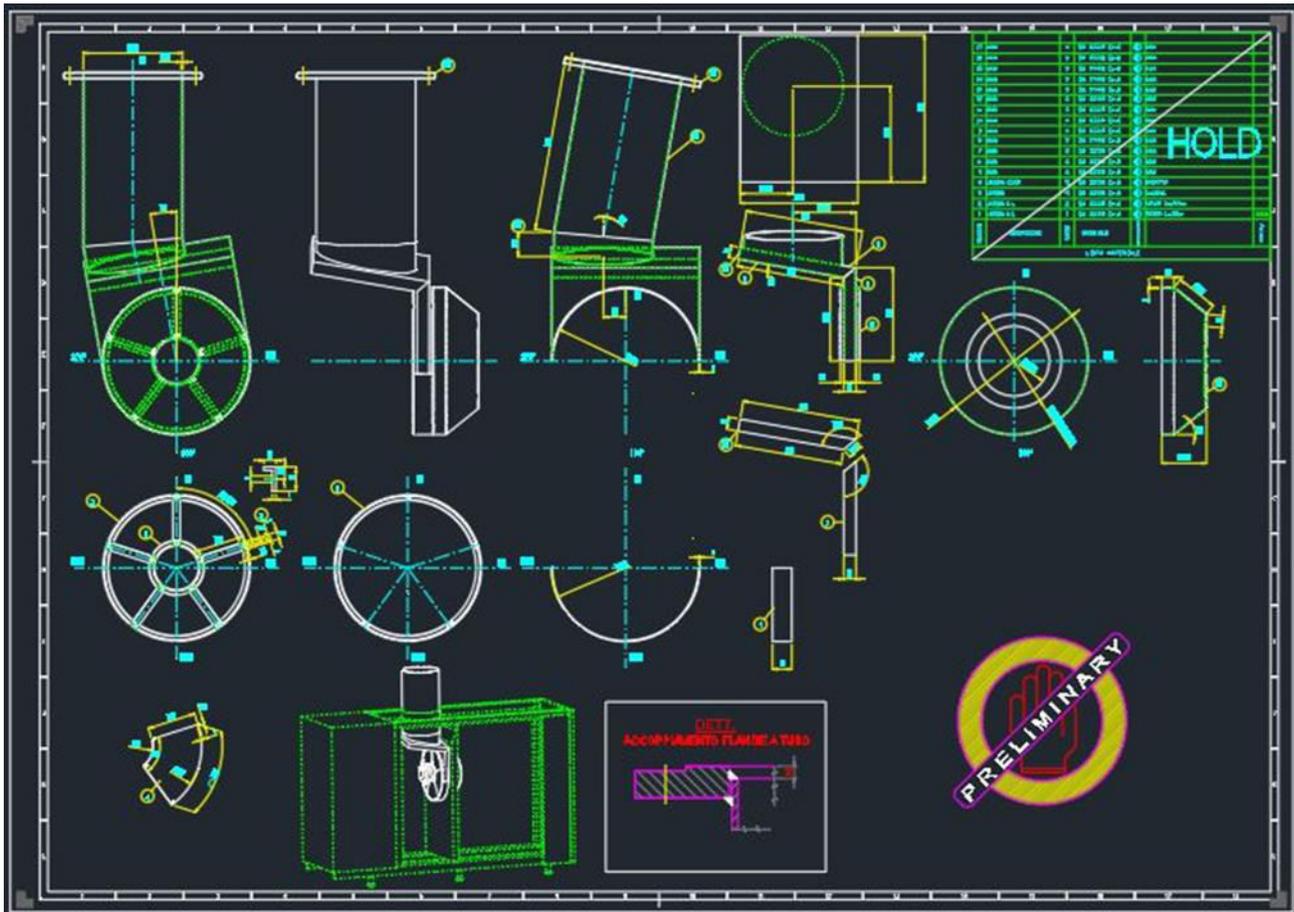


Figura 1. Design preliminare del collettore di aspirazione della turbina a gas per l'esercizio in assetto EGR.

Le modifiche impiantistiche implicano la realizzazione di un ramo di collegamento tra lo scarico e l'aspirazione della turbina a gas, nel quale devono trovare posto tutti i componenti necessari al condizionamento del fluido che dovrà miscelarsi con l'aria ambiente aspirata dalla macchina. Il primo vincolo di progettazione è dato dall'esigenza di installare tutti i componenti necessari alla modulazione della portata e al condizionamento termico del fluido sul ramo di ricircolo che, nota la compattezza delle micro-turbine (μ TG), pone problemi non banali nella realizzazione di componenti compatti in grado di soddisfare contemporaneamente sia i vincoli di ingombro sia i vincoli di performance. A ciò si aggiungono i vincoli strutturali, anche questi di non banale soluzione nel caso in questione, considerata la numerosità delle linee di piping e di componenti già presenti sull'impianto AGATUR.

Dal punto di vista del sistema di controllo, la realizzazione di un prototipo richiede l'implementazione di un sistema, anche in questo caso, in grado di autosostenersi, con l'obiettivo spingere al massimo l'automazione e ridurre al minimo l'intervento dell'operatore o, in altri termini, che consenta di gestire e colmare il salto concettuale tra il sistema di controllo distribuito (DCS), tipico degli impianti, e la Engine

Control Unit (ECU) tipica dei motori. Ciò implica la necessità di un hardware versatile e compatto in grado di interfacciarsi con un linguaggio di programmazione adatto all'implementazione di algoritmi di controllo più complessi. A ciò si aggiunge la necessità di dover dialogare efficacemente con il sistema di controllo a bordo della turbina a gas, che dovrà essere "stimolato" per ottenere reazioni coerenti con il nuovo assetto operativo.

Le attività di design svolte in questo ultimo trimestre del piano triennale rappresentano un fondamentale supporto al processo decisionale necessario a raggiungere la configurazione progettuale definitiva.

2 Implementazione dell'assetto EGR sull'impianto AGATUR

L'implementazione dell'assetto EGR sull'impianto AGATUR prevede il passaggio dalla configurazione attuale (figura 2) sviluppata nel corso del piano triennale, dove il fluido di lavoro viene artificialmente creato in un dispositivo esterno al limite di batteria della turbina a gas, alla realizzazione di un processo integrato con la turbina a gas (figura 3), in grado di autosostenersi e di modificare significativamente l'involuppo operativo della macchina in configurazione standard.

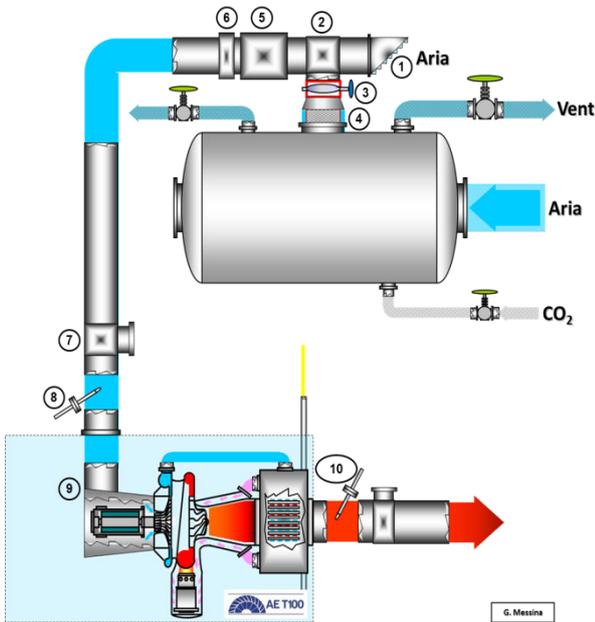


Figura 2. L'impianto AGATUR nell'attuale assetto EGR-emulato.

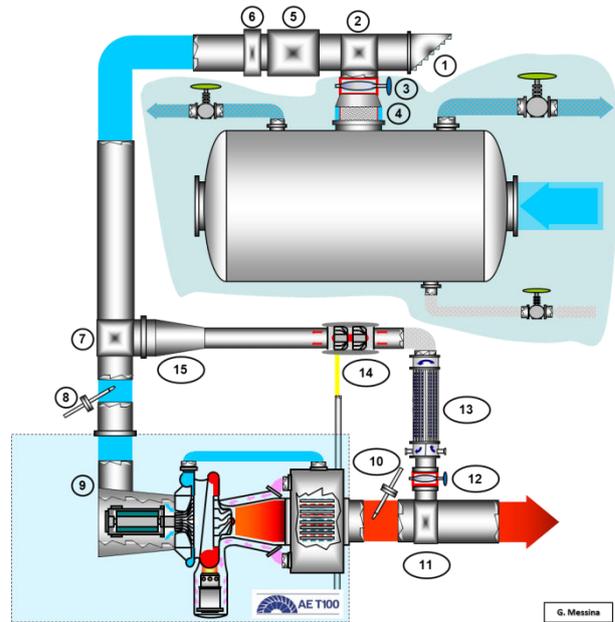


Figura 3. L'impianto AGATUR in assetto EGR. La zona ombreggiata sarà esclusa dal processo.

L'obiettivo che si vuole perseguire consiste nel migliorare la performance della turbina a gas ai carichi parziali, incrementando l'efficienza e riducendo le emissioni. La strategia alla base di questi obiettivi prevede il condizionamento del fluido aspirato dalla macchina, modificandone la temperatura, la composizione e, indirettamente, la portata, al variare del regime operativo. Nello specifico, il sistema di controllo in sinergia con la componentistica installata controllerà simultaneamente sia la portata massica sia la temperatura del gas ricircolato nel loop EGR, seguendo una curva di funzionamento tendente a incrementare la temperatura e il contenuto di CO₂ del fluido aspirato, secondo una legge di proporzionalità inversa non necessariamente lineare (figure 5, 6 e 7). Ad oggi la curva di funzionamento è stata ricavata da un'estesa campagna di simulazioni numeriche statiche e tempovarianti, realizzate con il simulatore della Turbec T100 implementato nelle precedenti annualità. I dati ricavati dalle simulazioni tempovarianti, che in questa fase sostituiscono gli omologhi ottenibili dai rilievi sperimentali, sono stati elaborati fornendo una serie di stati dimensionali al variare della potenza della turbina a gas in assetto EGR. Gli stati dimensionali ricavati costituiscono il dominio di funzionamento dei componenti della linea di ricircolo.

2.1 Configurazione della linea di ricircolo

La linea di ricircolo dei gas di scarico è finalizzata all'estrazione, alla regolazione e al condizionamento di parte della portata fluida prelevata allo scarico della turbina a gas per convogliarla verso l'aspirazione della macchina. La portata fluida estratta varia quantitativamente e qualitativamente al variare del regime della turbina a gas, con portate e temperature variabili in funzione dell'obiettivo operativo che si vuole raggiungere. Nelle pagine seguenti verranno descritte nel dettaglio le sezioni e i componenti della linea di ricircolo secondo la numerazione di Figura 3, con specifico riferimento ai componenti la cui numerazione è compresa tra 11 e 15¹.

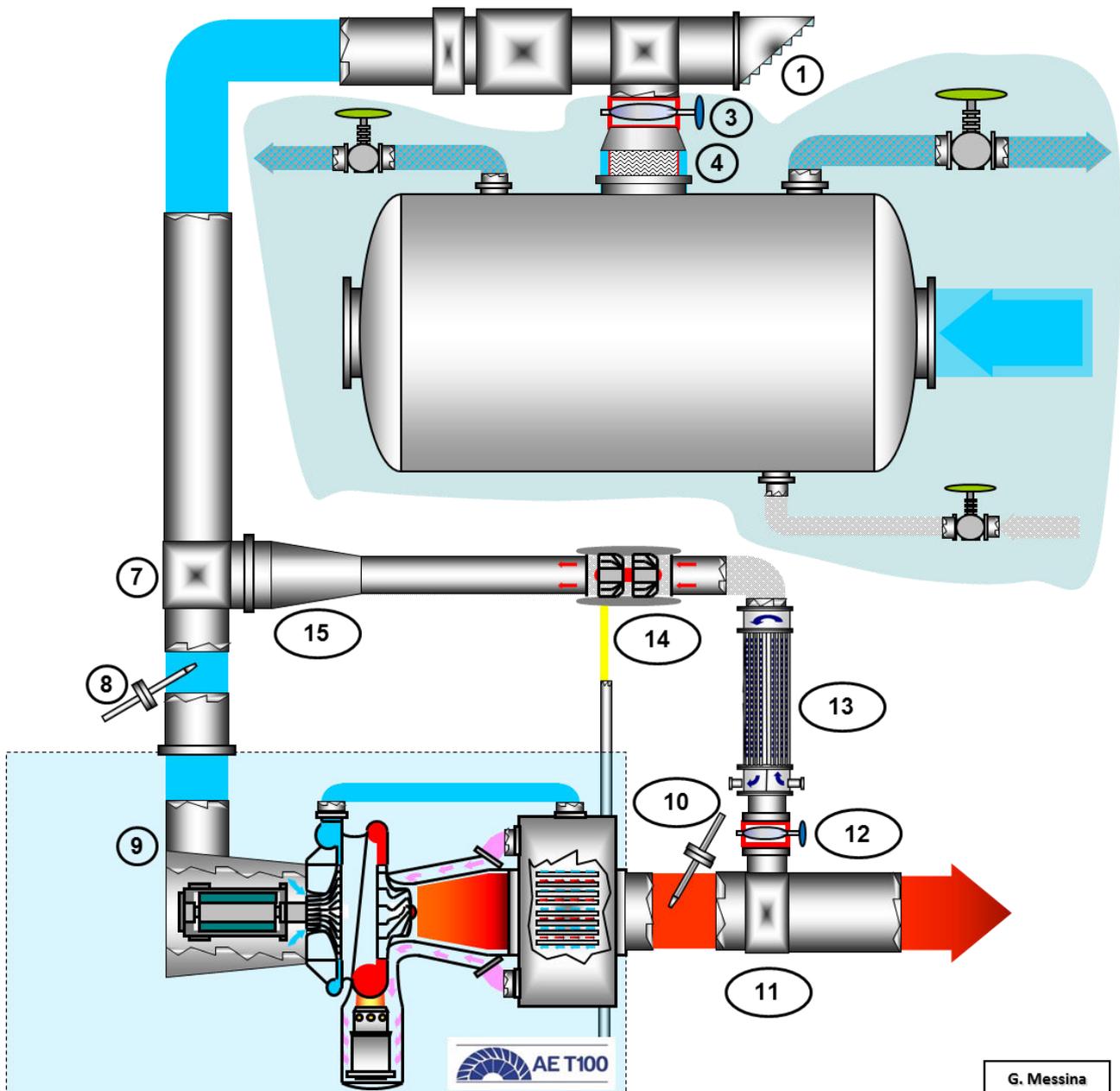


Figura 4. Layout dell'impianto AGATUR in assetto EGR. I componenti da 11 a 15 comporranno il loop EGR. I componenti inclusi nell'area ombreggiata saranno esclusi dal processo.

¹ In [1] è contenuta la descrizione di dettaglio dei componenti da 1 a 10.

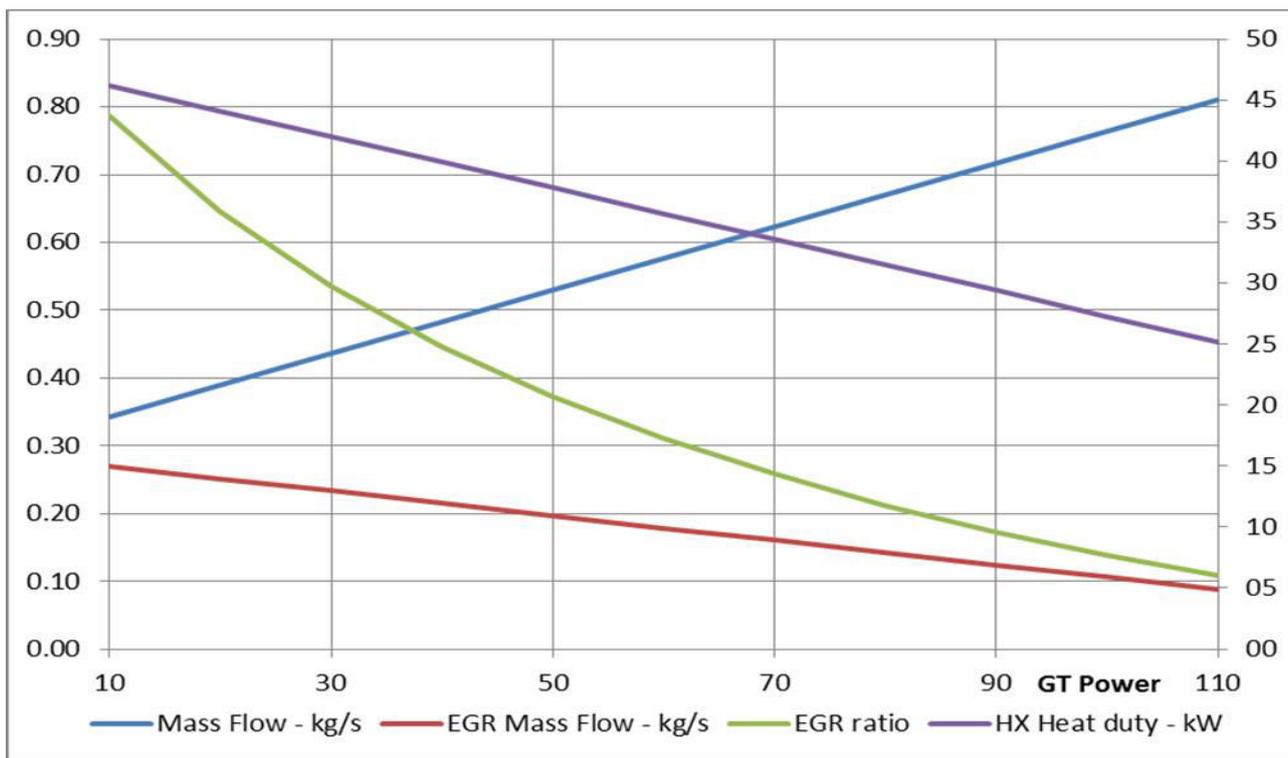


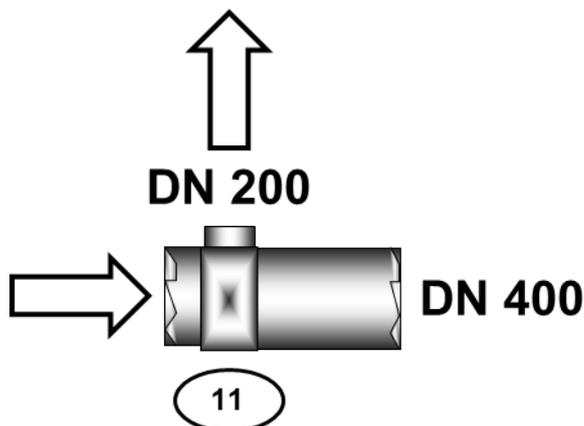
Figura 5. Andamento di alcune grandezze di rilievo al variare della potenza elettrica della μ TG in assetto EGR.

2.2 TEE di estrazione del fluido EGR

Il TEE di estrazione del fluido EGR agisce quale adduttore dei gas esausti prelevati allo scarico della turbina a gas verso la linea di ricircolo. Il componente sarà inserito modificando la tubazione di scarico della turbina a gas, che sarà dotata di nuovi organi di supporto per sostenere il peso aggiuntivo dei componenti della linea di ricircolo.

Tabella 1. Dati di riferimento del TEE di estrazione del fluido EGR.

Fluido	Portata massica (kg/s) min - max	Temperatura (°C) min - max	Pressione (bar-a) min - max	Potenza (kW) min - max	Coibentazione
Inlet Ramo DN 400					Sì Protezione da contatto
Exhaust gas	0.35 - 0.80	200 - 350	1.00 - 1.10	N.D.	
Outlet Ramo DN 200					
Exhaust gas	0.09 - 0.27	200 - 350	1.00 - 1.10	N.D.	



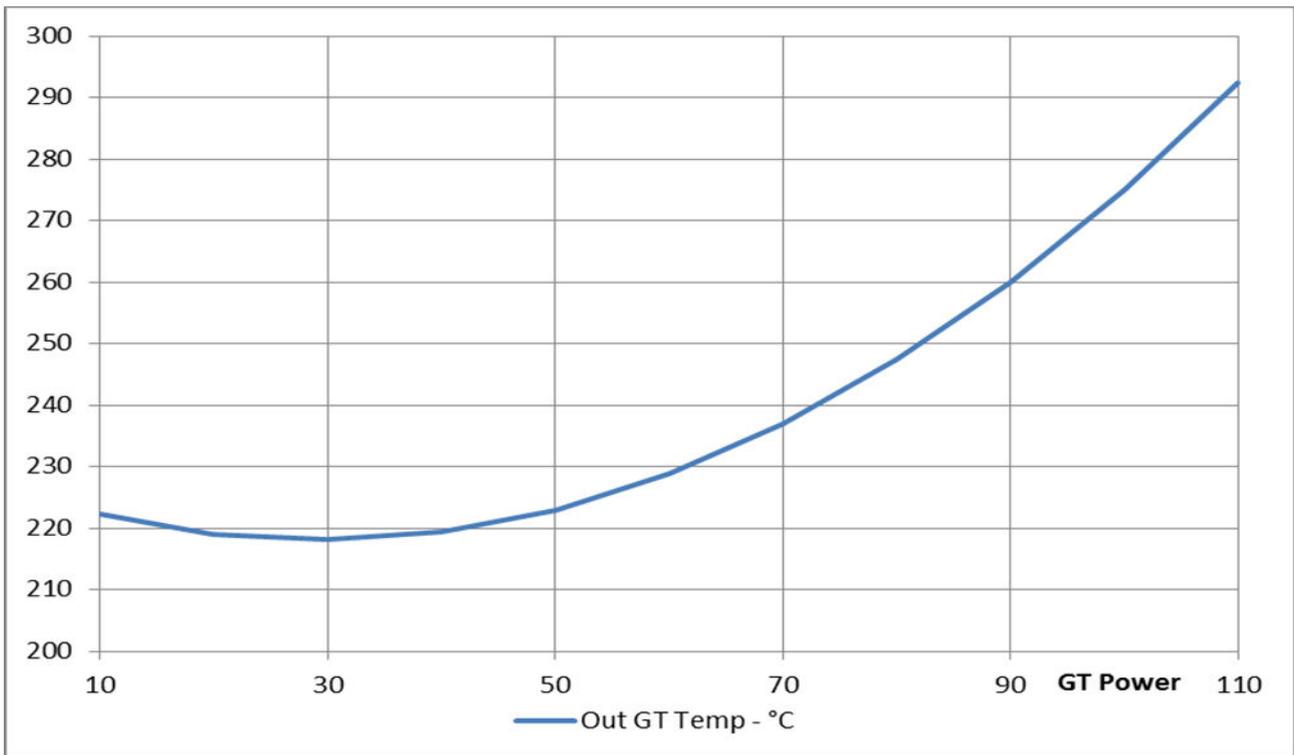


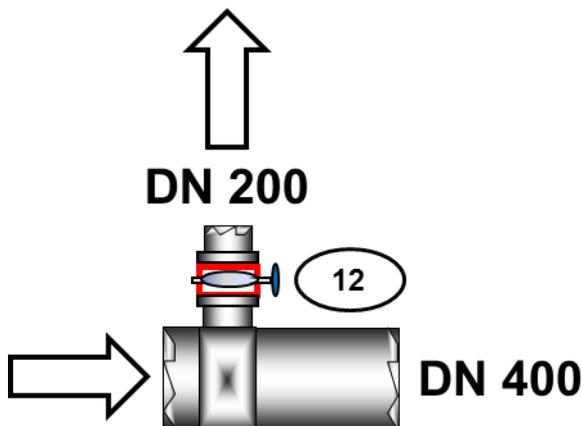
Figura 6. Temperatura degli esausti al variare della potenza elettrica della μ TG in assetto EGR.

2.3 Gas damper

Il gas damper agisce come organo di disconnessione fluidodinamica tra il condotto di scarico della turbina a gas e la linea di ricircolo. La disconnessione ha l'obiettivo di isolare la linea EGR nel caso di funzionamento della turbina a gas in assetto standard e, congiuntamente, di proteggere i componenti a valle del gas cooler in caso di avaria dello stesso durante in funzionamento in assetto EGR. L'azionamento sarà remotizzato con funzionamento tipico di una valvola ON/OFF.

Tabella 2. Dati di riferimento del gas damper.

Fluido	Portata massica (kg/s) min - max	Temperatura (°C) min - max	Pressione (bar-a) min - max	Potenza (kW) min - max	Coibentazione
Exhaust gas	0.09 - 0.27	200 - 350	1.00 - 1.10	N.D.	SI Protezione da contatto



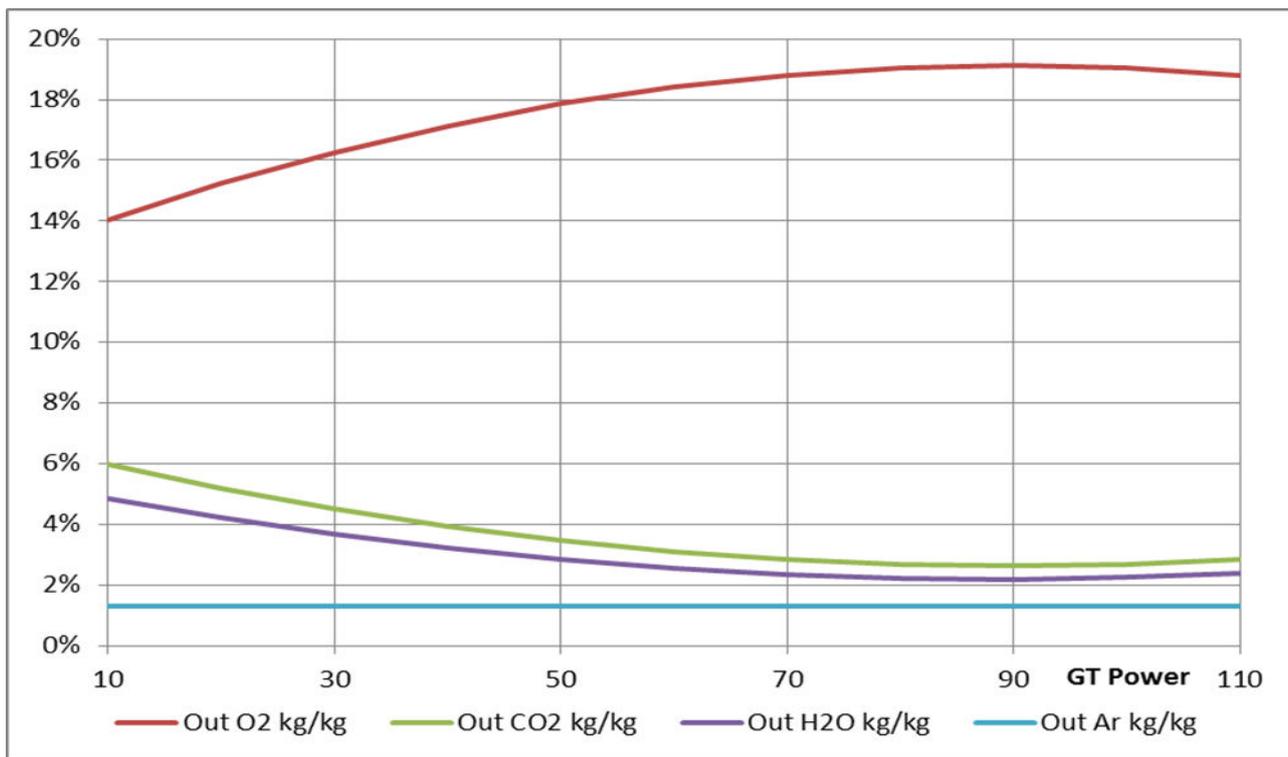


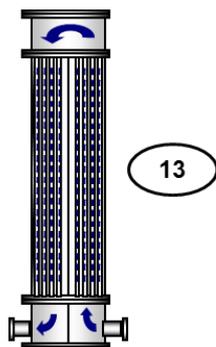
Figura 7. Composizione chimica degli esausti al variare della potenza elettrica della μ TG in assetto EGR.

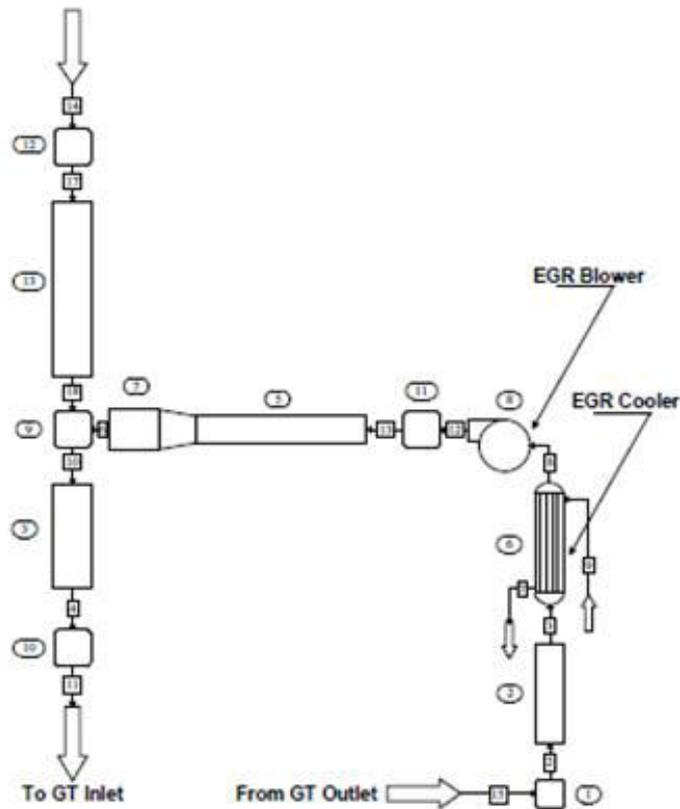
2.4 Gas cooler

Il gas cooler ha la funzione di condizionare termicamente il fluido EGR, raffreddandolo a temperature variabili con il regime di funzionamento della turbina a gas. Per incrementare la risposta dinamica e la compattezza dello scambiatore di calore è stato scelto il raffreddamento ad acqua. Il gas cooler è uno dei due componenti che influenza maggiormente la performance della turbina a gas in assetto EGR, pertanto è stato effettuato uno studio di dettaglio per il dimensionamento preliminare ed in tal modo evidenziare il carico termico dello scambiatore di calore in tutto l’involuppo operativo della macchina.

Tabella 3. Dati di riferimento del gas cooler.

Fluido	Portata massica (kg/s) min - max	Temperatura (°C) min - max	Pressione (bar-a) min - max	Potenza (kW) min - max	Coibentazione
Hot side inlet				25.00 – 50.00	SI Protezione da contatto
Exhaust gas	0.09 - 0.27	200 – 350	1.00 – 1.10		





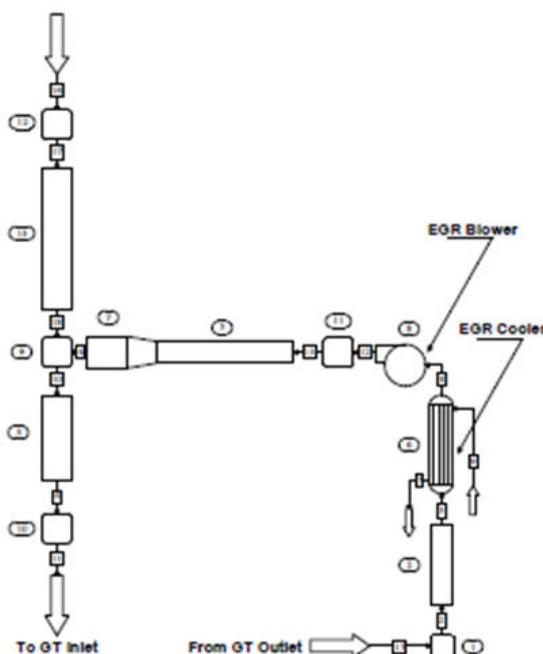
GT Power - kW	GT Mass Flow - kg/s	EGR Mass Flow - kg/s	Out GT Temp - °C	HX Heat duty - kW
10	0.343	0.270	222.4	46.2
20	0.390	0.252	219.1	44.1
30	0.437	0.234	218.1	42.0
40	0.483	0.215	219.4	39.9
50	0.530	0.197	222.9	37.8
60	0.577	0.179	228.8	35.7
70	0.623	0.161	237.0	33.6
80	0.670	0.142	247.4	31.5
90	0.717	0.124	260.1	29.4
100	0.764	0.106	275.2	27.3
110	0.810	0.088	292.5	25.2

2.5 Blower

La portata di ricircolo verrà modulata mediante il blower, che pertanto garantirà l'accoppiamento fluidodinamico tra la turbina a gas e il loop EGR. Anche in questo caso è stato effettuato uno studio di dettaglio per il dimensionamento preliminare finalizzato alla definizione del componente, che ha condotto

Tabella 4. Dati di riferimento del blower.

Fluido	Portata massica (kg/s) min - max	Temperatura (°C) min - max	Pressione (bar-a) min - max	Potenza (kW) min - max	Coibentazione
Exhaust gas	0.09 - 0.27	25 – 65 @inlet	0.96 ±10% @inlet	0.50 – 2.00	Da definire



GT Power - kW	Inlet Pressure - bar	Inlet Temperature - °C	Inlet Mass Flow - kg/s	Outlet Pressure - bar	Beta	mT*0.6p ⁻¹
10	0.969	61.382	0.270	1.013	1.067	4.878E-06
20	0.969	63.186	0.262	1.013	1.068	4.481E-06
30	0.969	48.831	0.234	1.013	1.068	4.126E-06
40	0.969	42.149	0.216	1.013	1.068	3.776E-06
60	0.969	38.933	0.197	1.013	1.068	3.438E-06
80	0.969	38.892	0.179	1.013	1.068	3.110E-06
70	0.980	36.808	0.181	1.013	1.068	2.787E-06
80	0.980	34.443	0.142	1.013	1.068	2.488E-06
90	0.980	32.388	0.124	1.013	1.068	2.143E-06
100	0.980	27.721	0.108	1.013	1.068	1.816E-06
110	0.980	24.982	0.088	1.013	1.068	1.498E-06



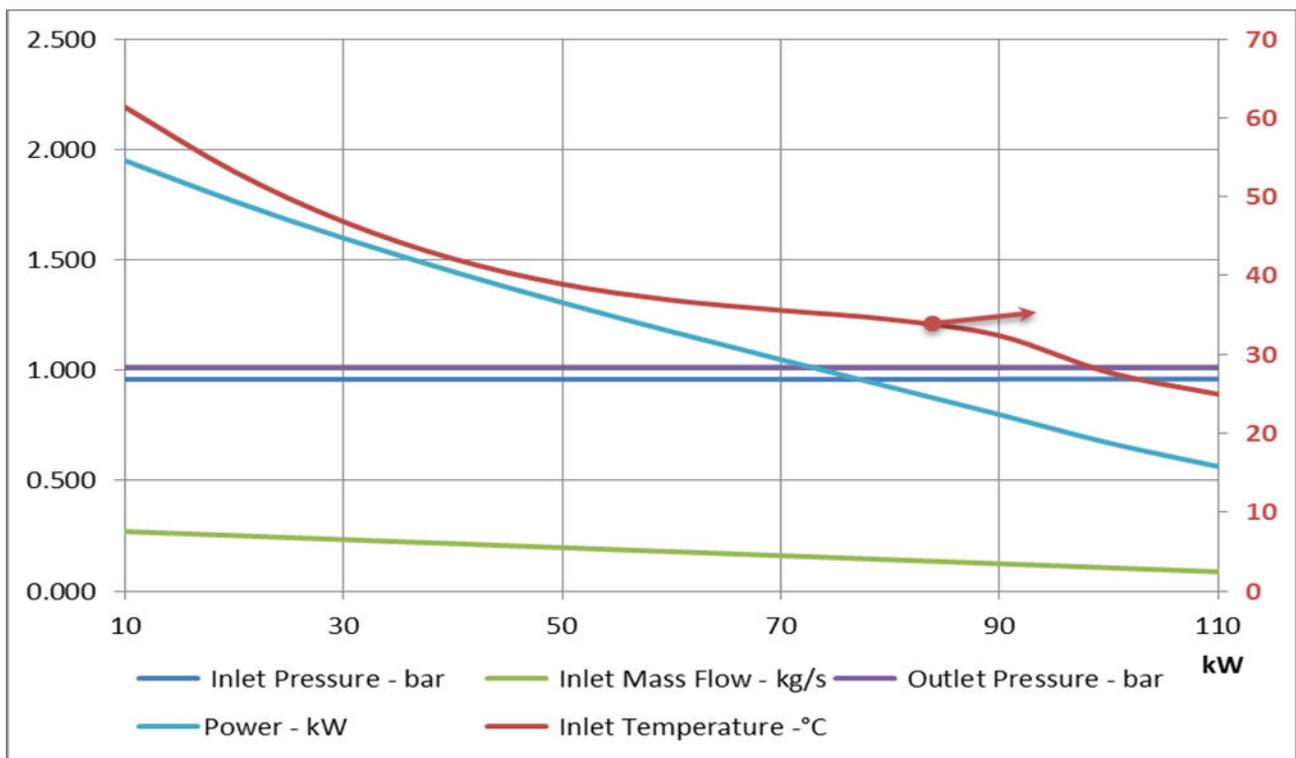


Figura 8. Andamento delle grandezze di rilievo per il dimensionamento del blower al variare della potenza della turbina a gas.

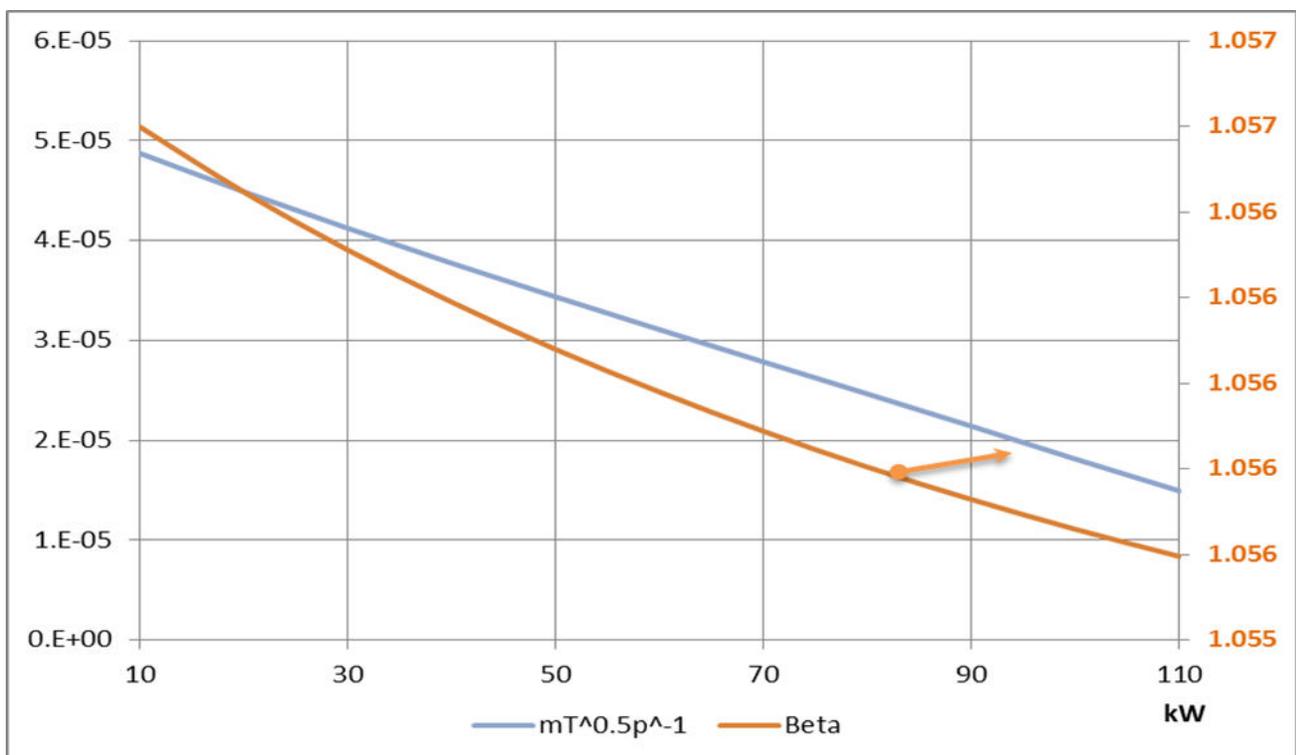


Figura 9. Portata corretta e rapporto di compressione del blower al variare della potenza della turbina a gas.

alla valutazione di un ventilatore a numero di giri variabile con uno stadio di prerotazione a geometria variabile. Ciò in considerazione dell'ampio intervallo di lavoro nella dimensione della portata corretta, determinato dalla variazione simultanea di portata massica e temperatura del fluido aspirato, a fronte di un rapporto di compressione sostanzialmente costante.

2.6 Diffusore

Il diffusore agisce da elemento di raccordo tra la linea di ricircolo di diametro nominale pari a 200 mm e la linea di aspirazione della turbina a gas, di diametro nominale pari a 400 mm. Il diffusore conico ha l'obiettivo di ridurre al minimo le perdite di carico dovute alla variazione di sezione e di recuperare parte del carico cinetico del fluido EGR. La definizione dell'angolo di convergenza del diffusore conico, in corso di valutazione, considerata la lunghezza vincolata del ramo di ricircolo, dovrà essere compatibile con l'ingombro di tutti i componenti presenti sulla linea.

Fluido	Portata massica (kg/s) min - max	Temperatura (°C) min - max	Pressione (bar-a) min - max	Angolo di divergenza min - max	Coibentazione
Exhaust gas	0.09 - 0.27	30 - 70 @inlet	1.00 ±10% @inlet	7° - 9° Da definire per verifica ingombro.	SI Protezione da contatto

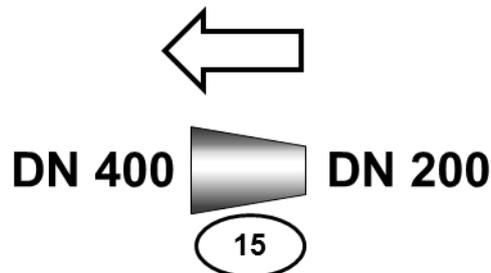


Figura 10. Sezione di collegamento tra il loop EGR e l'aspirazione della turbina a gas.

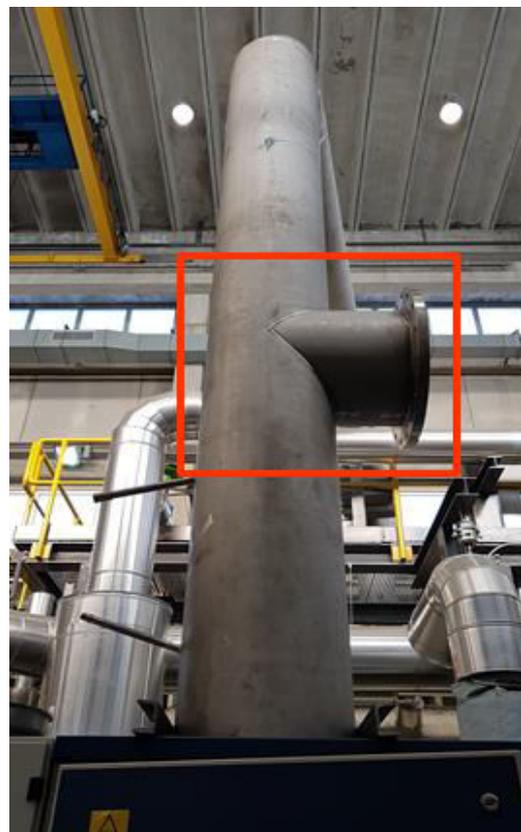


Figura 11. Dettaglio del TEE di collegamento tra il loop EGR e l'aspirazione della turbina a gas.

2.7 Implementazione e test del sistema di controllo

Il software del sistema di controllo è stato realizzato in ambiente LabVIEW e implementato in un Programmable Automation Controller (PAC) CompactRIO (cRIO) 9035. Il sistema realizzato è stato interfacciato con il sistema di controllo a bordo macchina mediante protocollo Modbus. La comunicazione tramite protocollo Modbus è bidirezionale, quindi è possibile:

- modificare le variabili abilitate alla scrittura, ovvero tutti i SETpoint e i comandi di Start e Stop;
- acquisire in tempo reale le grandezze elaborate dal PLC della turbina a gas rendendole disponibili, tramite connessione internet, per la visualizzazione, l'elaborazione e l'archiviazione.

L'archiviazione dei dati è gestita tramite Pen Drive USB che costituisce a tutti gli effetti un archivio mobile con i file dati giornalieri e i file di log generati dallo stesso software implementato sul cRIO .

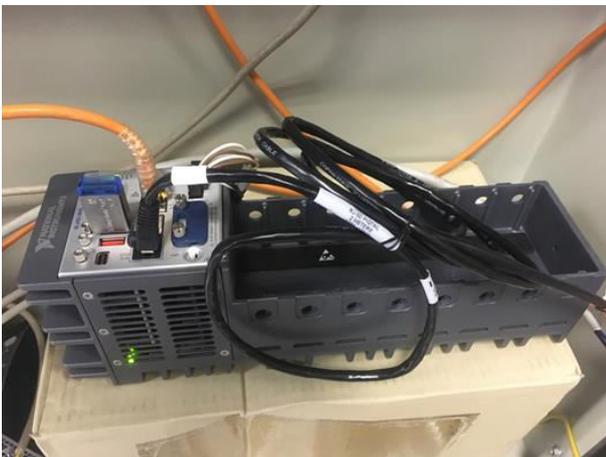


Figura 12. Il cRIO 9035 installato e collegato via Modbus al PLC della turbina a gas.

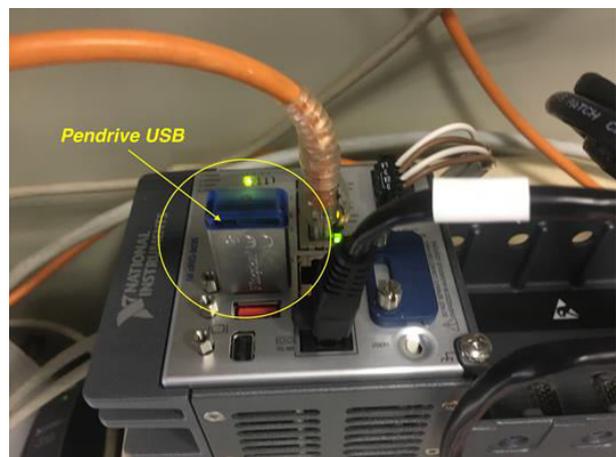


Figura 13. La Pen Drive USB installata a bordo del cRIO per l'archiviazione dei dati di esercizio.

E' stata realizzata un'interfaccia grafica (GUI) in ambiente LabVIEW che consente all'operatore di gestire e visualizzare tutti i parametri elaborati dal cRIO o, in altri termini, di gestire in remoto la turbina a gas. Nello specifico, i valori delle grandezze resi disponibili dal software cRIO-9035, vengono presentati in forma grafica e/o numerica ed elaborati dal software consentendo all'operatore di interagire con tutte le funzionalità della μ TG Turbec T100. La struttura dell'interfaccia grafica è composta da due sezioni:

- 1) Synoptic Tab (figura 14)
- 2) Dashboard Tab (figura 15).

La Synoptic Tab rende disponibile all'operatore il layout della turbina a gas con l'associazione di ogni singola grandezza al punto di misura a bordo macchina.

La Dashboard consente un approccio di sintesi nella visualizzazione dei dati, enfatizzando le grandezze di maggiore rilevanza.

In questa fase è stato implementato il controllo di base della turbina a gas, che consente l'esercizio della macchina in assetto standard. Lo sviluppo del software di controllo e dell'interfaccia prevede un'implementazione modulare, con funzionalità che possono essere attivate o disattivate in funzione dell'assetto operativo della turbina a gas. Tale approccio consentirà la "portabilità" del software e dell'hardware di controllo su entrambe le turbine a gas in dotazione all'ENEA, consentendo di integrare organicamente in un unico sistema le funzionalità e gli obiettivi ai quali le due macchine sono destinate. I test "a caldo" effettuati con la turbina a gas in running hanno dimostrato la piena operatività del sistema e la validità dell'approccio implementativo (figura 16).

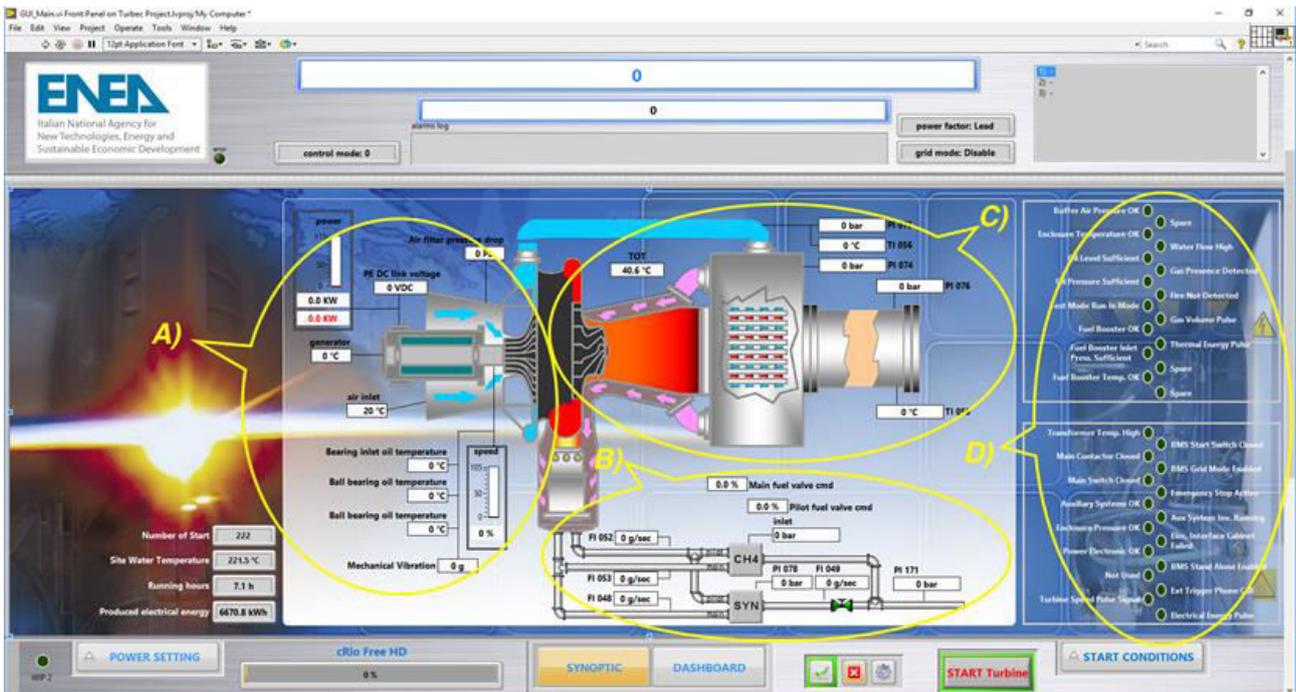


Figura 14. Synoptic Tab. Area A: variabili del generatore elettrico. Area B: variabili del sistema di alimentazione. Area C: variabili del ciclo termodinamico. Area D: allarmi.



Figura 15. Dashboard Tab. Area A: indicatori principali (RPM, Power e TOT). Area B: indicatori bearings. Area C: indicatori generatore elettrico. Area D: indicatori sistema di alimentazione del combustibile. Area E: indicatori esausti turbina. Area F: Set-points.

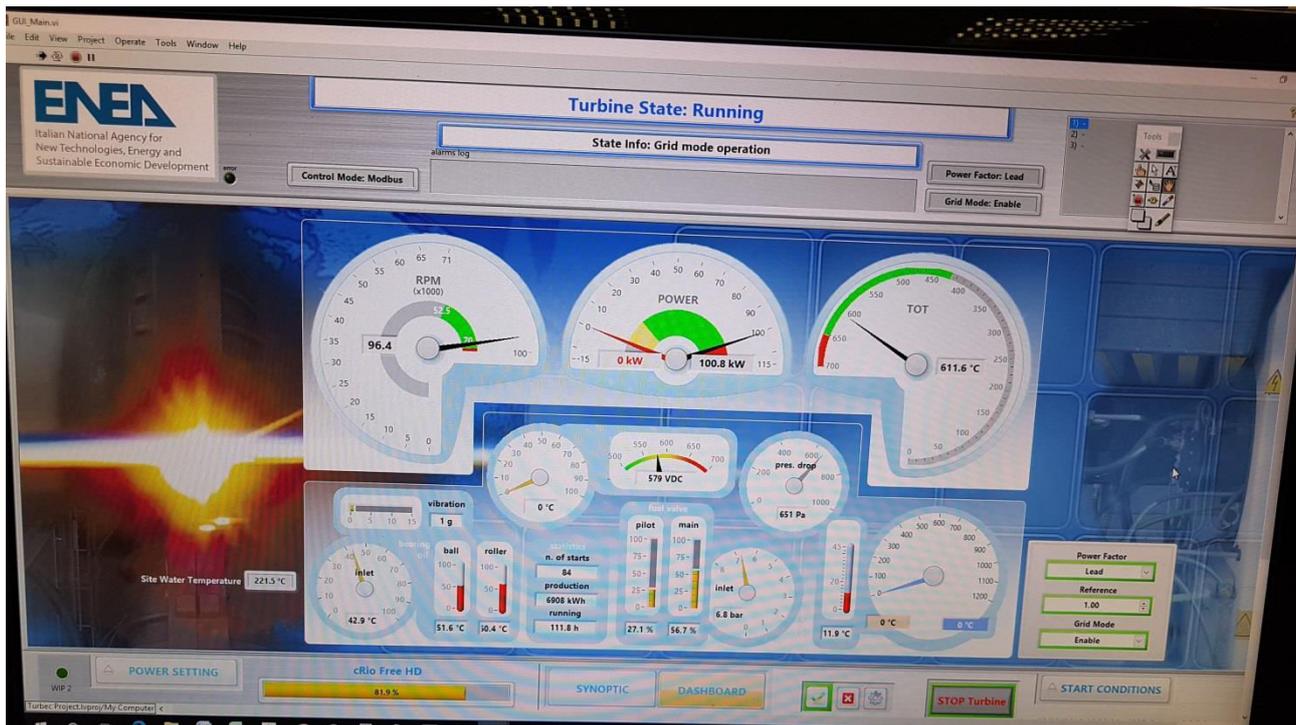


Figura 16. Vista della Dashboard Tab durante uno dei test “a caldo” del sistema di controllo implementato in cRIO.

3 Conclusioni

Il passaggio dalla configurazione EGR emulata alla configurazione integrata implica la progettazione preliminare e di dettaglio dei dispositivi e del piping di collegamento che comporranno il ramo di ricircolo, della carpenteria metallica di supporto, nonché l’implementazione di un sistema di controllo esterno per la gestione della linea di ricircolo. Le attività svolte in questo trimestre hanno consentito di giungere alla configurazione definitiva della linea di ricircolo, individuando la sequenza dei componenti necessari al condizionamento termico del fluido ricircolato e alla modulazione della portata. Per ognuno dei componenti è stato individuato e definito il dominio operativo. Con riferimento al sistema di controllo, è stato identificato e acquisito l’hardware ed è stata implementata e testata “a caldo” la configurazione di base del sistema, nelle sue componenti hardware e software. Le attività fin qui svolte hanno pertanto concretizzato le condizioni per la futura realizzazione di un prototipo di turbina a gas in assetto EGR.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] G.Messina et Al., “Attività di sviluppo dell’assetto EGR in una micro-turbina a gas Turbec T100”, Report RdS/PAR2015/178, 2017