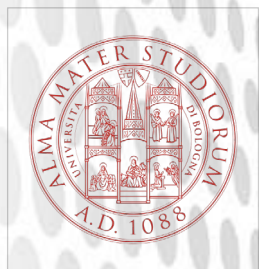


Ricerca di Sistema elettrico



Reverse engineering di componenti di microturbine e
simulazione dei benefici attesi dall'impiego del materiale
ceramico sviluppato (LA4.3)

Prof. Fabrizio Ponti, Prof. Vittorio Ravaglioli, Ing. Giacomo Silvagni, Prof.
Enrico Corti Prof Davide Moro, Ing. Alessandro Brusa



Reverse engineering di componenti di microturbine e simulazione dei benefici attesi dall'impiego del materiale ceramico sviluppato (LA 4.3)

DEFINIZIONE DEL MODELLO CAD DELLA GIRANTE DI UNA MICROTURBINA, QUANTIFICAZIONE DEL BENEFICIO PRESTAZIONALE OTTENIBILE REALIZZANDO UNA MICROTURBINA CON GIRANTE IN MATERIALE CERAMICO E PROGETTAZIONE DI UN BANCO PROVA PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI (LA 4.3)

F. Ponti, V. Ravaglioli, G. Silvagni, E. Corti, D. Moro, A. Brusa (Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: *1.4 Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: 4.3

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia, ENEA

Responsabile del Work Package: Francesca Mazzanti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Mese inizio previsto: gennaio 2023 (mese 13/36)

Mese inizio effettivo: gennaio 2023 (mese 13/36)

Mese fine previsto: dicembre 2024 (mese 36/36)

Mese fine effettivo: dicembre 2024 (mese 36/36)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Reverse engineering di componenti di microturbine e simulazione dei benefici attesi dall'impiego del materiale ceramico sviluppato"

Indice

1	Risultati attesi	7
1.1	Ricostruzione della geometria CAD 3D in formato STL di una girante reale che equipaggia un gruppo MTG	7
1.2	Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG	7
1.3	Quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG	7
1.4	Progettazione e realizzazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali	7
2	Risultati ottenuti.....	8
2.1	Ricostruzione della geometria CAD 3D in formato STL di una girante reale che equipaggia un gruppo MTG	8
2.2	Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG	8
2.3	Quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG	8
2.4	Progettazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali	9
3	Prodotti attesi	10
3.1	Geometria CAD 3D in formato STL di una girante turbina reale che equipaggia un gruppo MTG.....	10
3.2	Codice sorgente in ambiente Matlab/Simulink di un gruppo MTG	10
3.3	Report tecnico-scientifico per la quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG	10
3.4	Progettazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali ...	11
4	Prodotti sviluppati	12
4.1	Modello CAD 3D in formato STL di una girante turbina reale per tecniche di AM	12
4.2	Modello dinamico in ambiente Matlab/Simulink di un gruppo MTG.....	12
4.3	Report tecnico-scientifico per la quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG	12
4.4	Progetto del sistema di testing per attività sperimentali su MTG commerciali	13
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	14
6	Sintesi delle attività svolte	15
6.2	Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG	15
6.3	Report dell'attività di simulazione e quantificazione del beneficio prestazionale legato all'utilizzo di una MTG in materiale ceramico rispetto ad una equipaggiata con girante in materiali tradizionali	16

6.4	Schema e progetto per il layout del sistema di testing da utilizzare in future attività sperimentali su gruppi MTG	16
7	Dettaglio delle attività svolte.....	17
7.1	Modello CAD della girante adattato alla stampa 3D	17
7.1.1	Analisi dei requisiti e scelta della microturbina	17
7.1.2	Reverse engineering girante turbina.....	17
7.2	Analisi agli elementi finiti per l'identificazione del limite di rottura della girante della turbina stampata in materiale ceramico	20
7.3	Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG	23
7.3.1	Modellazione e validazione sperimentale della prestazione dei componenti selezionati.....	23
7.3.2	Implementazione della camera di combustione nel modello di MTG	27
7.3.3	Implementazione dello scambiatore di recupero nel modello di MTG.....	28
7.3.4	Implementazione dello scambiatore cogenerativo nel modello di MTG	31
7.4	Report dell'attività di simulazione e quantificazione del beneficio prestazionale legato all'utilizzo di una MTG in materiale ceramico rispetto ad una equipaggiata con girante in materiali tradizionali	32
7.5	Schema e progetto per il layout del sistema di testing da utilizzare in future attività sperimentali sulla MTG.....	37
8	Riferimenti Bibliografici.....	41
9	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	42
10	Pubblicazioni scientifiche.....	43
11	Eventi di disseminazione	43

Indice delle figure

Figura 1 - Rotore del gruppo turbocompressore scelto per lo studio	17
Figura 2 - Scanner ottico 3D VIVID 9i/VI-9i (KONICA MINOLTA).....	18
Figura 3 - Risultato della scansione effettuata su un singolo canale palare	18
Figura 4 - Unione delle scansioni con una geometria test ricostruita del disco della girante ..	19
Figura 5 - Nuvola di punti corrispondente all'intera geometria.....	19
Figura 6 - Turbina in materiale metallico (a), ricostruzione 3D girante turbina come output del processo di reverse engineering (b), girante turbina in ABS ottenuta per AM (c).....	20
Figura 7 - Generazione della mesh per simulazioni FEM.....	21
Figura 8 - Esempio di valutazione del coefficiente di sicurezza attraverso l'analisi agli elementi finiti	21
Figura 9 - Confronto delle proprietà meccaniche a rottura dei diversi materiali analizzati: a) confronto con lega Alloy 713; b) e c) confronto fra diversi materiali ceramici.....	22
Figura 10 - Confronto di prestazione meccanica per i diversi materiali analizzati soggetti a medesime condizioni operative.....	23
Figura 11 - Regime di rotazione di rottura di diversi materiali al variare delle condizioni operative di pressione e temperatura di esercizio	23
Figura 12 - Efficienze di compressore (a) e turbina (b)	24
Figura 13 - Installazione del gruppo Turbocompressore selezionato presso la sala prove dell'Università di Bologna, sede di Forlì.....	24
Figura 14 - Schema del turbogruppo (modello MTG semplificato).....	24
Figura 15 - Modello Simulink del turbogruppo (Modello MTG semplificato).....	25
Figura 16 - Mappatura del lavoro compressore, utilizzata nel modello dinamico del turbocompressore	26
Figura 17 - Confronto fra i dati sperimentali e risultato delle simulazioni ottenute con diversi approcci in condizioni transitorie	26
Figura 18 - Temperatura massima ottenibile in camera di combustione ricavata dall'utilizzo del software CEArun.....	27
Figura 19 - Modello di camera di combustione implementato basato su mappe ottenute dal software CEArun.....	28
Figura 20 - Schema di MTG standard	28
Figura 21 - Schema di MTG rigenerativo	29
Figura 22 - Confronto fra i diagrammi di scambio termico di scambiatori di calore con flusso in equi-corrente (a) e contro-corrente (b).....	29
Figura 23 - Scambiatore BOSAL P5-100	30
Figura 24 - Curva caratteristica scambiatore BOSAL P5-100: caduta di pressione in funzione delle portate circolanti.....	30

Figura 25 - Curva caratteristica scambiatore BOSAL P5-100: efficienza di scambio termico in funzione delle portate circolanti.....	31
Figura 26 - Schema di MTG cogenerativo	32
Figura 27 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2	33
Figura 28 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.25.....	33
Figura 29 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.5.....	34
Figura 30 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 1.5.....	35
Figura 31 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 1.75	35
Figura 32 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.....	36
Figura 33 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.25	36
Figura 34 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.5	37
Figura 35 - Sistema MTG commerciale identificato ed acquistato nell'ambito della LA 4.3	38
Figura 36 - Layout semplificato del banco prova per piccoli MTG	39
Figura 37 - Layout definitivo del banco prova per piccoli MTG.....	39
Figura 38 - Layout definitivo del banco prova per piccoli MTG, particolare: cuscinetti pneumatici e leveraggio per la quantificazione dell'effetto utile (spinta).....	39
Figura 39 - Sistema di acquisizione e controllo del banco di prova per sistemi MTG	40
Figura 40 - Software di controllo dei dispositivi e delle funzioni che equipaggeranno il banco di prova	40

1 Risultati attesi

I principali risultati attesi della LA 4.3, così come da capitolato vigente previsto per il WP4 "Additive manufacturing di materiali ceramici avanzati per incrementare l'efficienza di sistemi di produzione di energia", sono i seguenti:

- 1.1 *Ricostruzione della geometria CAD 3D in formato STL di una girante reale che equipaggia un gruppo MTG*
- 1.2 *Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG*
- 1.3 *Quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG*
- 1.4 *Progettazione e realizzazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali*

2 Risultati ottenuti

I principali risultati ottenuti della LA 4.3 sono riportati di seguito.

2.1 Ricostruzione della geometria CAD 3D in formato STL di una girante reale che equipaggia un gruppo MTG

Come input per il processo di realizzazione del dimostratore di girante turbina mediante AM oggetto delle LA 4.1 e 4.2, il gruppo di ricerca ha condotto un'attività volta alla generazione di un modello CAD tridimensionale di una turbina per MTG. In questa fase, la scelta del componente da ricostruire è stata guidata dalle caratteristiche peculiari della tecnica di AM scelta e degli strumenti presenti in ENEA per la realizzazione del dimostratore.

La girante è stata ricostruita digitalmente tramite tecniche di reverse engineering, utilizzando contestualmente scansioni ottiche e misurazioni dirette del componente reale. Il processo di ricostruzione ha prodotto una geometria del componente reale (turbina) fedele, in termini di dimensioni, accuratezza e formato del file (STL), ed allineata ai requisiti per la messa a punto del processo di additive manufacturing scelto.

Il presente risultato è stato raggiunto completamente.

2.2 Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG

Nel corso della prima fase in cui si è svolta la LA 4.3, il gruppo di lavoro si è focalizzato sullo sviluppo di un modello dinamico zero-dimensionale digitale di una microturbina a gas (MTG) di potenza ridotta per applicazioni residenziali o in piccole industrie (<10kW).

In questa prima fase, l'attività di modellazione è stata finalizzata all'ottenimento di un modello fisico semplificato, basato su dati sperimentali reali, acquisiti attraverso attività sperimentali, e mappe digitalizzate fornite dal costruttore dei componenti (turbina e compressore) operanti nel gruppo MTG identificato. È stata quindi verificata l'aderenza dei risultati delle simulazioni con i dati reali di funzionamento della MTG, in particolare in termini di prestazioni e rendimento. La validazione del modello sviluppato ha confermato la robustezza della metodologia di modellazione e dello strumento sviluppato, costituendo la base per le future considerazioni e sviluppi effettuati nel prosieguo del progetto.

Il presente risultato è stato raggiunto completamente.

2.3 Quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG

L'attività di ricerca svolta nella prima fase di operatività della LA 4.3 ha permesso di ottenere uno strumento affidabile e rappresentativo per la quantificazione delle prestazioni di gruppi MTG. Grazie al modello sviluppato e messo a punto, è stato quindi possibile effettuare un'attività di valutazione del beneficio ottenibile, in termini di rendimento elettrico generato da un incremento delle temperature di esercizio, per diverse configurazioni di gruppi MTG

(semplice, rigenerativo e cogenerativo), come conseguenza dell'applicazione di una turbina realizzata in materiale ceramico. Con l'obiettivo di collocare quantitativamente i risultati ottenuti da questa analisi all'interno del piano di Ricerca del Sistema Elettrico, sono stati analizzati diversi scenari mettendo a confronto il materiale ceramico innovativo, messo a punto all'interno delle LA 4.1 e 4.2, con materiali metallici convenzionali e materiali ceramici innovativi esistenti, documentati dalla letteratura tecnica. I valori di temperatura massima raggiungibile da ciascun materiale sono stati ottenuti grazie alla stima del carico di rottura dei vari materiali attraverso simulazioni strutturali agli elementi finiti (FEM) della girante soggetta a sollecitazioni (carichi e vincoli) compatibili con quelle presenti nelle applicazioni reali.

I risultati ottenuti da queste analisi hanno permesso di quantificare il beneficio ottenibile dall'adozione di un materiale ceramico innovativo, sia in termini assoluti che relativi, rispetto a materiali metallici convenzionali e materiali ceramici innovativi, documentati dalla letteratura tecnica.

Il presente risultato è stato raggiunto completamente.

2.4 Progettazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali

Parallelamente all'attività di modellazione, gruppo di lavoro ha condotto la progettazione di un banco di prova per piccoli gruppi MTG. Il banco di prova è stato progettato considerando come device under test una piccola MTG commerciale, precedentemente identificata attraverso un'indagine di mercato condotta dal gruppo di ricerca. Il gruppo MTG è stato selezionato, e successivamente acquisito, sulla base delle specifiche dimensionali massime dei componenti stampabili per AM, utilizzando gli strumenti acquisiti nelle LA 4.1 e 4.2.

La piattaforma di test sviluppata nella LA 4.3, che sarà equipaggiata con tutti i sistemi e gli accessori (sensori/attuatori/sistemi di acquisizione e controllo) necessari per l'acquisizione ed il controllo dei parametri operativi e per il corretto funzionamento del gruppo MTG, potrà essere installata presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna.

La realizzazione di un banco di prova permetterà di dotarsi di uno strumento versatile, in grado di verificare le prestazioni dei prototipi futuri o l'effetto di modifiche applicate a sistemi esistenti attraverso misurazioni puntuali ed accurate, nonché la calibrazione di modelli predittivi del funzionamento di MTG e dei singoli componenti interni (compressore, camera di combustione, turbina).

Il presente risultato è stato raggiunto completamente.

3 Prodotti attesi

I principali prodotti attesi della LA 4.3 come da capitolato, sono i seguenti:

3.1 *Geometria CAD 3D in formato STL di una girante turbina reale che equipaggia un gruppo MTG*

L'attività prevede la realizzazione di un modello CAD 3D in formato STL della girante di una turbina di un gruppo MTG reale di dimensioni compatibili con le caratteristiche peculiari della tecnica di AM scelta e degli strumenti presenti in ENEA per la realizzazione del dimostratore.

3.2 *Codice sorgente in ambiente Matlab/Simulink di un gruppo MTG*

L'attività prevede la realizzazione di un modello dinamico in ambiente Matlab/Simulink e di tutti i codici necessari alla simulazione del comportamento dinamico di un gruppo MTG in condizioni operative reali.

3.3 *Report tecnico-scientifico per la quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG*

L'attività prevede la realizzazione di un report tecnico-scientifico contenente i risultati delle attività della LA 4.3 rispetto al beneficio ottenibile in termini di rendimento elettrico ed altri parametri operativi di interesse, generato da un incremento delle temperature di esercizio per diverse configurazioni di gruppi MTG. All'interno del report sono riportati i seguenti output:

- *Risultati dell'attività di simulazione dell'effetto di un aumento di temperatura in camera di combustione per un sistema MTG semplice;*
- *Risultati dell'attività di simulazione dell'effetto di un aumento di temperatura in camera di combustione per un sistema MTG rigenerativo;*
- *Risultati dell'attività di simulazione dell'effetto di un aumento di temperatura in camera di combustione per un sistema MTG cogenerativo;*
- *Risultati dell'analisi strutturale agli elementi finiti FEM in condizioni operative tipiche del funzionamento dei gruppi MTG, per i diversi materiali analizzati: metallici di riferimento (INCONEL 738, ALLOY 713) e materiali ceramici (ENEA nelle varie formulazioni AM e MC, Kyocera SN281, Kyocera SN282, Kyocera SN252).*

3.4 Progettazione di un banco di prova per attività sperimentali su MTG commerciali

L'attività prevede la progettazione di un banco prova per il test di gruppi MTG di piccola taglia e l'acquisizione di un piccolo gruppo MTG. L'attività può essere verificata attraverso l'analisi dei disegni 3D e della reportistica prodotta relativa ai componenti scelti per la realizzazione del banco di test, oltre ovviamente all'acquisito della MTG selezionata, necessaria alla futura validazione dell'impianto sperimentale progettato in questa LA 4.3.

4 Prodotti sviluppati

Di seguito sono riportati i principali prodotti ottenuti dalla LA 4.3, corrispondenti ai prodotti attesi da capitolato e in alcuni casi con risultati superiori a quanto previsto:

4.1 Modello CAD 3D in formato STL di una girante turbina reale per tecniche di AM

Le attività della LA 4.3 hanno prodotto un modello tridimensionale CAD della turbina selezionata all'interno della LA stessa. La geometria è stata ricostruita combinando scansioni ottiche e misurazioni dirette del componente fisico. La geometria ricostruita è stata poi utilizzata sia per validare la fattibilità del processo di AM messo a punto nelle LA 4.1 e 4.2, sia come input per le analisi strutturali agli elementi finiti (FEM) utilizzate per la definizione dei limiti operativi dei vari materiali analizzati (metallici e ceramici) in termini di tensioni ammissibili al variare dei parametri operativi principali di un MTG quali: pressioni, temperature e velocità di rotazione.

4.2 Modello dinamico in ambiente Matlab/Simulink di un gruppo MTG

Nell'ambito della LA 4.3, è stato sviluppato un modello di simulazione dinamico, in ambiente Matlab/Simulink, in grado di valutare le prestazioni di sistemi MTG, composto dalla combinazione di modelli di turbina, camera di combustione, compressore, scambiatore di recupero e di cogenerazione. Il modello ha permesso di valutare la condizione di funzionamento ottimale, in termini di compromesso fra energia raccolta ed efficienza complessiva del sistema in diverse configurazioni (MTG semplice, rigenerativo e cogenerativo), sia nel caso di turbina in materiale convenzionale (metallico) che nel caso di turbina in materiale ceramico. In tutti i casi considerati, la condizione operativa limite (massima temperatura raggiungibile a monte turbina) è stata stabilita sulla base dei risultati dell'analisi FEM.

4.3 Report tecnico-scientifico per la quantificazione del beneficio atteso dall'adozione di una girante in materiale ceramico in un gruppo MTG

I modelli di simulazione sviluppati all'interno della LA 4.3 hanno permesso di quantificare il guadagno di prestazione ottenibile dalla sostituzione del materiale costruttivo della girante della turbina, con un materiale ceramico, al variare delle condizioni operative e di diverse configurazioni del gruppo MTG. Questi risultati sono stati raccolti all'interno di un report tecnico-scientifico volto all'identificazione dell'effetto dei principali parametri operativi dei MTG rispetto agli indici di prestazione ed efficienza caratterizzanti e del beneficio ottenibile dall'adozione di un materiale ceramico innovativo in questa tipologia di impianto di produzione di energia. Tutte le informazioni raccolte hanno permesso di effettuare confronti di prestazioni ed efficienze fra varie configurazioni di MTG e di materiali considerati. Contestualmente, è stato possibile identificare una condizione di ottimo globale, compatibile con i limiti meccanici di ciascun materiale considerato e funzionale all'ottenimento degli obiettivi posti all'interno del piano di ricerca del sistema elettrico.

4.4 Progetto del sistema di testing per attività sperimentali su MTG commerciali

Nell'ottica di svolgere attività future di validazione sperimentale di soluzioni e prototipi ottenuti nell'ambito di questo progetto, le attività della LA 4.3 hanno portato alla realizzazione del progetto di un banco di prova per piccoli sistemi MTG. Questa attività ha consentito di finalizzare la progettazione di un sistema di test, dotato di tutti i sistemi di controllo e monitoraggio dei parametri operativi delle MTG come: misure di pressione, temperatura, portata di combustibile, portata d'aria. Questo sistema permetterà di misurare direttamente le principali grandezze fisiche durante il funzionamento di un gruppo MTG e quantificarne le prestazioni attraverso attività sperimentali dirette, nonché ottenere informazioni cruciali per la messa a punto e la validazione di futuri modelli di simulazione. Per consentire l'applicazione e la verifica sperimentale delle soluzioni identificate nelle LA 4.1 e 4.2, il banco di prova è stato dimensionato per ospitare un piccolo sistema MTG, preventivamente identificato ed acquisito all'interno di questa LA, con dimensioni compatibili con i metodi e gli strumenti messi a punto all'interno del WP4.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

La presente LA 4.3 non ha richiesto scostamenti tecnici/economici rispetto a quanto preventivato e non sono state riscontrate criticità in riferimento al piano dei rischi presentato.

6 Sintesi delle attività svolte

Di seguito è riportata una sintesi delle attività svolte e dei risultati ottenuti in relazione ai risultati attesi all'interno della LA 4.3:

6.1 *Modello CAD della girante adattato alla stampa 3D*

Questa attività ha portato alla realizzazione del modello tridimensionale della girante turbina, effettuata attraverso l'utilizzo di metodologie di reverse engineering mediante misurazioni dirette e scansioni ottiche, effettuate utilizzando uno scanner 3D VIVID 9i/VI-9i (KONICA MINOLTA), presente presso i laboratori del Dipartimento di ingegneria industriale dell'università di Bologna, sede di Forlì. Il processo di scansione ottica ha consentito di ottenere la nuvola di punti discreta corrispondente alla geometria. Questo dato grezzo è stato successivamente elaborato attraverso specifici software di post processing, portando alla ricostruzione della geometria completa del componente (girante turbina). La coerenza dimensionale della geometria ricostruita digitalmente in formato STL, formato dati necessario per la messa a punto del processo di AM e per la realizzazione del dimostratore, è stata verificata attraverso la misurazione diretta del componente reale.

La geometria ottenuta attraverso il processo di reverse engineering è stata poi utilizzata come input per un'analisi agli elementi finiti (FEM), svolta nella LA 4.3 e finalizzata all'ottenimento dei limiti operativi dei vari materiali analizzati (metallici e ceramici). Le condizioni di sollecitazione e vincolo, applicate alle simulazioni FEM, sono state determinate in modo coerente con le condizioni operative possibili per i gruppi MTG in termini di: pressioni di esercizio, temperature e numero di giri.

6.2 *Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG*

L'attività di sviluppo di un modello di simulazione dinamico di un gruppo MTG si è articolata in diverse fasi, aumentando progressivamente il livello di complessità del modello. L'integrazione di modelli digitali di turbina e compressore, un modello di camera di combustione ed un modello di scambiatore di recupero ha permesso di ottenere un modello dinamico rappresentativo del funzionamento del reale funzionamento di un gruppo MTG. Inoltre, per aumentare il grado di aderenza del modello al layout reale dei gruppi MTG, è stata inserita una macchina elettrica in grado di raccogliere energia elettrica sull'asse di rotazione del turbocompressore, sfruttando la differenza di potenza generata dalla turbina e di potenza richiesta dal compressore. Da ultimo, è stato anche introdotto uno scambiatore cogenerativo per massimizzare l'entità dello sfruttamento dell'energia termica residua presente nei gas di scarico del gruppo MTG.

Grazie all'utilizzo di una configurazione flessibile, questo modello ha permesso di effettuare valutazioni quantitative sull'andamento dei parametri di funzionamento principali (temperature, pressioni, portate, rendimenti, potenze) di un MTG durante il suo normale funzionamento e di osservare gli scostamenti di tali grandezze al variare delle condizioni operative.

6.3 Report dell'attività di simulazione e quantificazione del beneficio prestazionale legato all'utilizzo di una MTG in materiale ceramico rispetto ad una equipaggiata con girante in materiali tradizionali

Utilizzando il modello dinamico di MTG sviluppato all'interno della LA 4.3, sono state condotte numerose simulazioni volte a studiare il comportamento del gruppo MTG al variare delle condizioni operative (rapporto di compressione, carico, numero di giri, grado di rigenerazione, percentuale di cogenerazione) considerando i limiti operativi dettati dalla presenza di una girante turbina realizzata in diversi materiali: materiali metallici convenzionali e ceramici.

I risultati di queste simulazioni dinamiche, combinate con le limitazioni definite dall'analisi agli elementi finiti per i diversi materiali considerati, hanno permesso di generare un report in grado di quantificare il guadagno di prestazione derivante dall'uso di una girante realizzata utilizzando il materiale ceramico sviluppato nelle LA 4.1 e LA 4.2, rispetto all'utilizzo di materiali metallici standard. Inoltre, all'interno del report sono state analizzate configurazioni alternative di MTG ipotizzando una turbina realizzata in materiali ceramici esistenti e formulati per utilizzi analoghi, documentati dalla letteratura scientifica. Questi confronti hanno permesso di osservare analogie e differenze dell'utilizzo del materiale innovativo ottenuto come output delle attività del WP4 rispetto a materiali ceramici esistenti (SiN) e di quantificarne l'impatto anche rispetto a materiali simili.

6.4 Schema e progetto per il layout del sistema di testing da utilizzare in future attività sperimentali su gruppi MTG

All'interno della LA 4.3, è stato realizzato il progetto di un banco prova completo per gruppi MTG di piccola taglia, che verrà realizzato in futuro e potrà essere utilizzato per attività sperimentali che abbiano come oggetto macchine per la produzione di energia simili a quella analizzata in questo studio. La progettazione ha coinvolto due aree principali: meccanica ed elettronica. La parte di progettazione meccanica ha avuto come obiettivo l'ottenimento di un design funzionale per il testing in sicurezza di piccoli MTG disponibili in commercio. Per fare ciò, è stata selezionata ed acquisita una piccola MTG dimensionalmente compatibile con gli strumenti e le tecniche di AM messe a punto nelle LA 4.1 e LA 4.2. Utilizzando come input le dimensioni e gli ingombri di questo componente, è stato finalizzato un disegno CAD 3D contenente il supporto meccanico, la piattaforma per il collegamento meccanico del MTG durante il test e tutti gli accessori funzionali al corretto funzionamento del sistema.

Parallelamente, è stata condotta la fase di progettazione elettronica del sistema di test. L'analisi del sistema fisico MTG e delle esigenze in termini di accuratezza di misurazione, necessarie per l'ottenimento di valori affidabili per future valutazioni quantitative sui parametri di funzionamento, hanno permesso di identificare il numero e la tipologia dei vari sensori ed attuatori necessari. Il risultato ottenuto è un progetto completo di un sistema di test per MTG commerciali di piccola taglia, sufficientemente versatile da poter essere utilizzato anche con diverse configurazioni e taglie di MTG.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Modello CAD della girante adattato alla stampa 3D

7.1.1 Analisi dei requisiti e scelta della microturbina

La prima parte della LA 4.3 si è focalizzata sull'analisi dei requisiti del sistema MTG da utilizzare nell'ambito dello studio. Trattandosi di una applicazione finalizzata allo studio di soluzioni per il sistema elettrico nazionale, la taglia del sistema attesa deve essere tale da permettere di produrre una potenza complessiva di alcuni kW, in modo da poter alimentare una serie di utenze di natura domestica. Oltre a questo requisito, le caratteristiche del processo di AM oggetto delle LA 4.1 e 4.2 ne fissava la massima dimensione dei componenti realizzabili a circa 30 mm di diametro.

A seguito di un'analisi approfondita dei componenti presenti sul mercato, la scelta è ricaduta su un turbo compressore di derivazione automobilistica, Figura 1, con diametro della turbina pari a 34 mm in cui la turbina rispetta le dimensioni massime imposte dal processo. La scelta di un turbocompressore di derivazione automobilistica è stata anche fatta per sfruttare la possibilità di validare il modello dinamico sviluppato nei laboratori del gruppo di ricerca, presenti presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna, sede di Forlì.



Figura 1 - Rotore del gruppo turbocompressore scelto per lo studio

7.1.2 Reverse engineering girante turbina

Questa fase dell'attività ha riguardato la realizzazione del modello tridimensionale della turbina, effettuata attraverso l'utilizzo dello scanner ottico 3D VIVID 9i/VI-9i (KONICA MINOLTA), Figura 2, presente presso i laboratori UNIBO. Per massimizzare la qualità della scansione, dopo aver effettuato il piazzamento e la scelta dell'ottica, le superfici oggetto della scansione sono state opportunamente preparate attraverso opportuna pulizia, opacizzazione e, in qualche caso anche verniciatura. La scansione ha permesso di costruire una nuvola di punti rappresentativa della geometria di un canale parlare della turbina, Figura 3.



Figura 2 - Scanner ottico 3D VIVID 9i/VI-9i (KONICA MINOLTA)

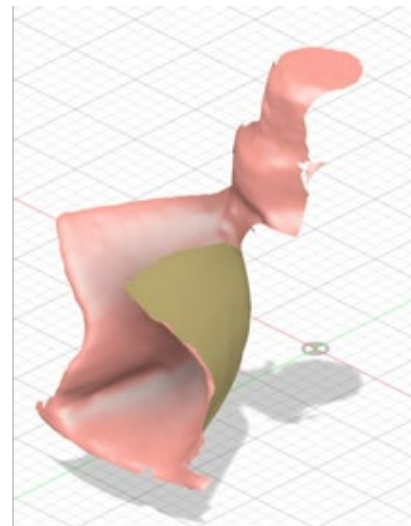
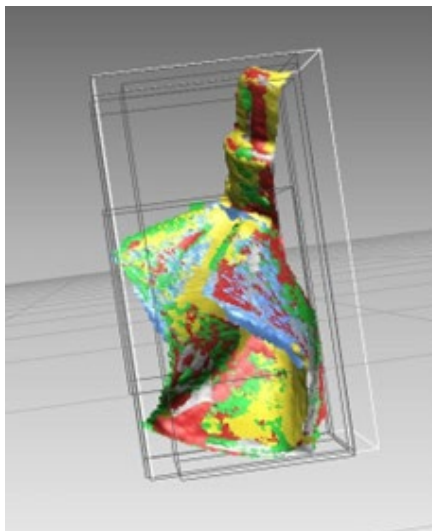


Figura 3 - Risultato della scansione effettuata su un singolo canale palare

Al fine di ottenere una ricostruzione completa della turbina, tutte le scansioni effettuate hanno richiesto operazioni di preprocessing delle immagini, quali:

- **Pulizia della scansione**
- **Allineamento delle scansioni**

Al fine di verificare l'aderenza delle scansioni con le dimensioni reali del componente, è stata realizzata una geometria test (disco della girante) a cui è stato sovrapposto il risultato della

ricostruzione di una scansione del singolo canale palare, Figura 4. La geometria completa è stata quindi ottenuta replicando un singolo canale parlare più volte fino ad ottenere il rotore completo. La geometria completa, visibile in Figura 5, è stata poi corretta utilizzando il software "polygon editing" di KONICA MINOLTA e con il software Rapidform effettuando le seguenti operazioni di post processing:

- **Tonalizzazione**
- **Analisi e pulizia**
- **Registrazione**
- **Unione mesh**
- **Chiusura fori**
- **Decimazione mesh**

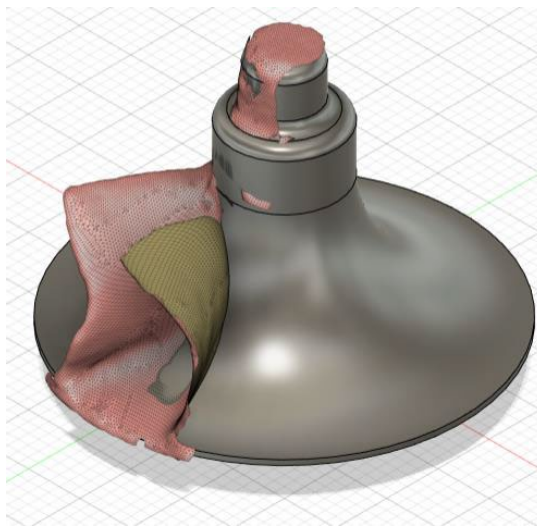


Figura 4 - Unione delle scansioni con una geometria test ricostruita del disco della girante

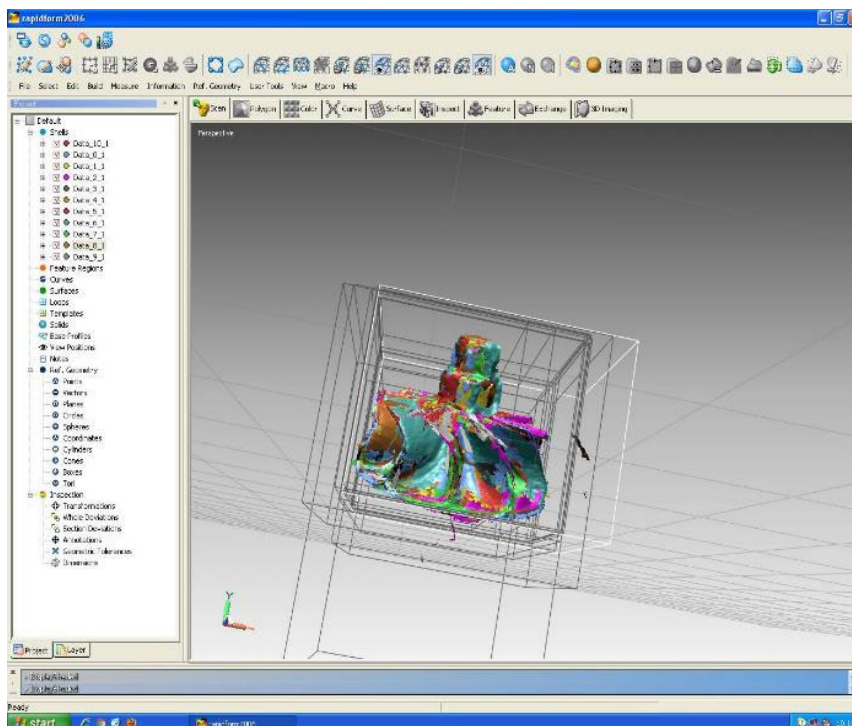


Figura 5 - Nuvola di punti corrispondente all'intera geometria

Il risultato finale ottenuto è stato considerato soddisfacente, poiché tutte le quote della geometria (diametro, spessore, larghezza del canale palare, etc ...) sono state risultate essere allineate alle misure dirette effettuate sul componente fisico. La compatibilità fra il CAD 3D e un processo di AM è stata verificata realizzando una copia fedele della turbina in ABS utilizzando una stampante low cost, presente in UNIBO, Figura 6.

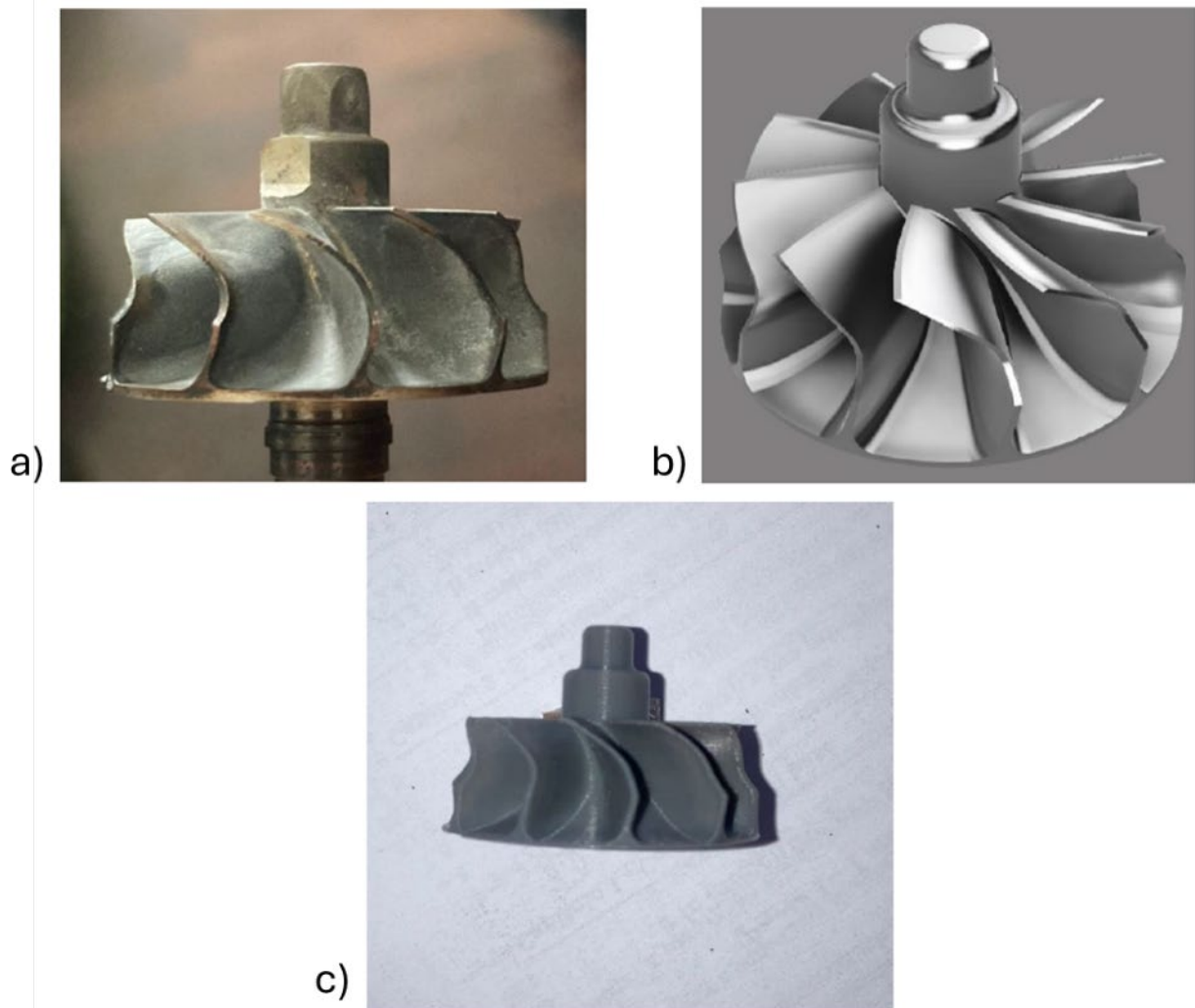


Figura 6 - Turbina in materiale metallico (a), ricostruzione 3D girante turbina come output del processo di reverse engineering (b), girante turbina in ABS ottenuta per AM (c)

7.2 Analisi agli elementi finiti per l'identificazione del limite di rottura della girante della turbina stampata in materiale ceramico

Grazie alla geometria digitalizzata della turbina, è stato possibile effettuare un'analisi agli elementi finiti (FEM), utilizzando il software commerciale Ansys Workbench, in grado di simulare le condizioni di carico e vincolo che il componente si troverà a dover sopportare durante il suo funzionamento. La Figura 7 mostra il risultato ottenuto a valle della generazione della mesh in Ansys. Gli obiettivi dell'analisi strutturale FEM condotta nella LA 4.3 hanno riguardato l'identificazione delle condizioni operative definite come "ammissibili", ossia

caratterizzate da un coefficiente di sicurezza complessivo convenzionalmente definito come soglia essere pari o superiore a 2, e quelle definite come “non ammissibili”, e contestualmente le sezioni nelle quali le massime sollecitazioni hanno luogo.

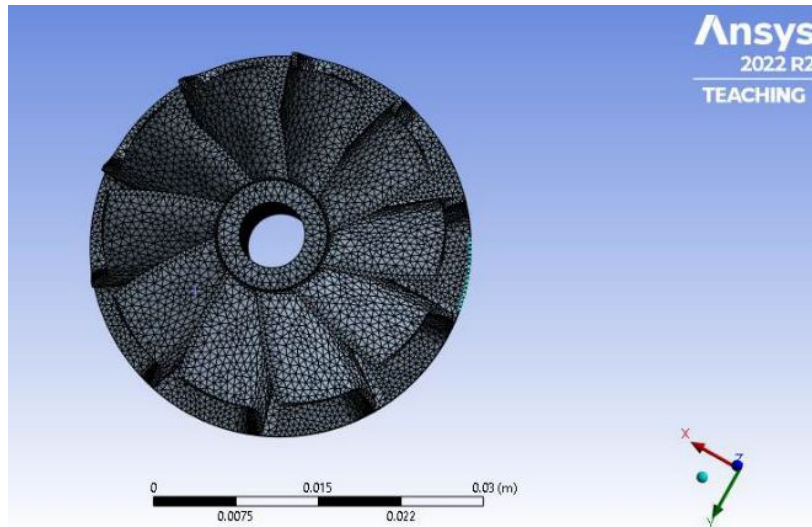


Figura 7 - Generazione della mesh per simulazioni FEM

Di seguito vengono riportate tutte le condizioni operative investigate in simulazione:

- **Velocità di rotazione [krpm]:** 150 - 175 - 200 - 225 - 250 - 275
- **Temperatura ingresso turbina [°C]:** 600 - 700 - 800 - 900 - 1000 - 1100 - 1200
- **Pressione ingresso turbina [bar]:** 1.5 - 2 - 3 - 4

Per ogni condizione operativa, i risultati delle simulazioni hanno consentito di quantificare il coefficiente di sicurezza complessivo del componente riportato, a titolo di esempio, in Figura 8.

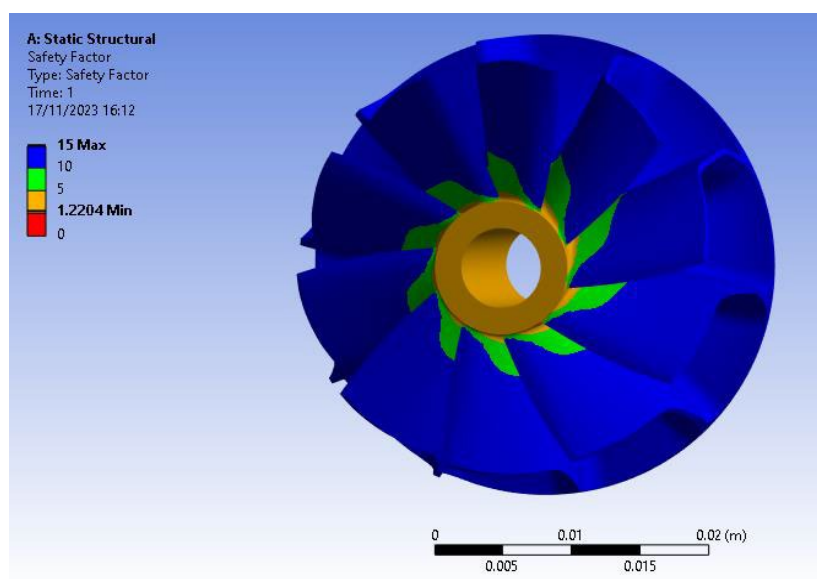


Figura 8 - Esempio di valutazione del coefficiente di sicurezza attraverso l'analisi agli elementi finiti

Attraverso l'utilizzo di questo strumento, è altresì stato possibile valutare l'effetto del materiale costitutivo del componente sulle massime condizioni di carico ammissibile.

In [1] sono riportate le informazioni relative alla resistenza di vari materiali metallici tipicamente utilizzati in componenti ad alta temperatura: Alloy 713 (preso come riferimento) e Inconel 738. Inoltre, da [2, 3] è stato possibile ricavare informazioni relative alla resistenza in temperatura di 3 formulazioni di nitruro di silicio (Kyocera SN 218, Kyocera SN 282, Kyocera SN252) da porre a confronto con le formulazioni sviluppate nelle LA 4.1 e LA 4.2: SiN-MC, formulazione per fabbricazione convenzionale; SiN-AM, formulazione per AM.

In Figura 9a è riportata una comparativa delle proprietà meccaniche a rottura dei materiali analizzati.

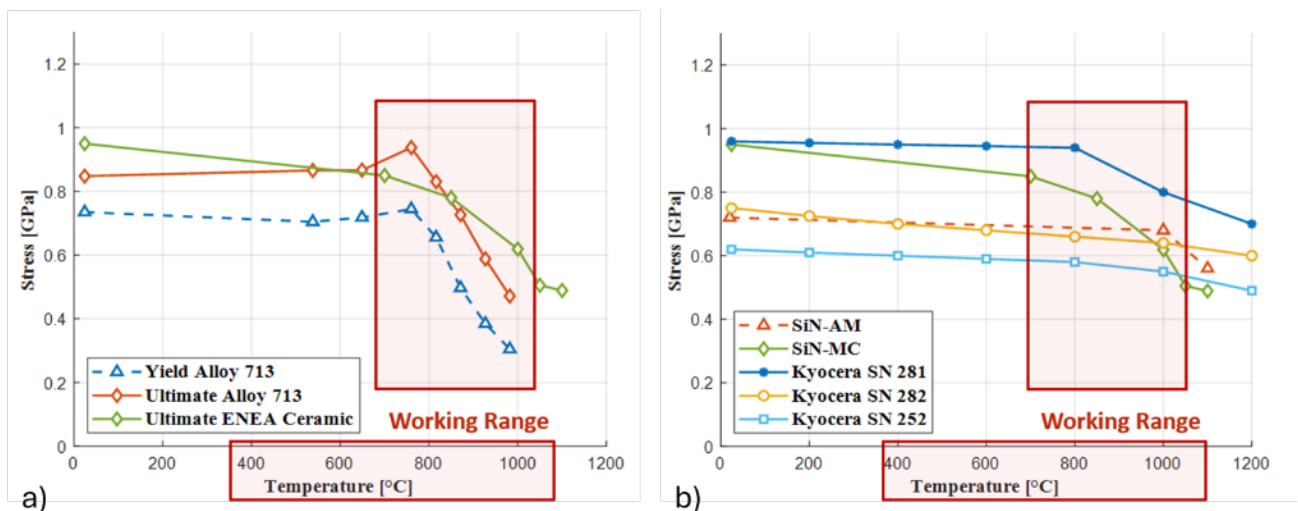


Figura 9 - Confronto delle proprietà meccaniche a rottura dei diversi materiali analizzati: a) confronto con lega Alloy 713; b) confronto fra diversi materiali ceramici

Per ottenere risultati maggiormente rappresentativi del processo produttivo finale, è stato scelto di estendere l'analisi anche a 2 materiali costruiti artificialmente decrementando SiN-MC e SiN-AM di un 20% [4], a partire dalle informazioni ricavate dall'attività di caratterizzazione sperimentale dei materiali ceramici. A titolo di esempio, in Figura 11 è riportato il confronto dei risultati di alcuni batch di simulazione effettuati con stesse condizioni operative.

Dall'analisi dei risultati contenuti in Figura 10 (output analitico) e in Figura 11 (prospetto completo), in aderenza a quanto riportato dalla letteratura tecnica, emerge chiaramente come tutte le formulazioni di nitruro di silicio considerate risultano migliorative in temperatura rispetto all'adozione di un materiale metallico convenzionale, generando un conseguente beneficio in termini di rendimento elettrico del sistema MTG.

Ref: Alloy 713 – MTG Pressure 1.5 bar

	ALLOY 713	ENEASiN-MC	ENEASiN-AM	ENEASiN-MC 80%	ENEASiN-AM 80%
600 °C	183	240 ✓	240 ✓	240 ✓	237 ✓
800 °C	179	240 ✓	240 ✓	240 ✓	235 ✓
1000 °C	97	240 ✓	240 ✓	222 ✓	234 ✓

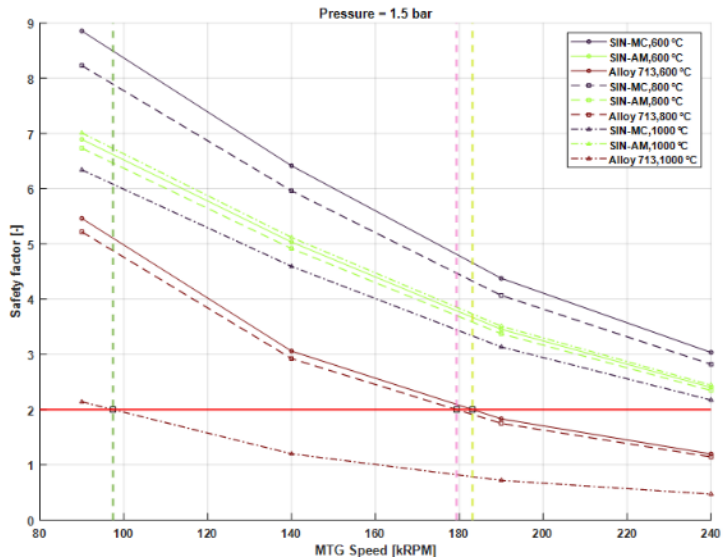


Figura 10 - Confronto di prestazione meccanica per i diversi materiali analizzati soggetti a medesime condizioni operative

MTG Pressure 1.5 bar

MTG Pressure 3 bar

MTG Pressure 4 bar

	ALLOY 713	ENEASiN-MC	ENEASiN-AM	ENEASiN-MC 80%	ENEASiN-AM 80%	ALLOY 713	ENEASiN-MC	ENEASiN-AM	ENEASiN-MC 80%	ENEASiN-AM 80%	ALLOY 713	ENEASiN-MC	ENEASiN-AM	ENEASiN-MC 80%	ENEASiN-AM 80%
600 °C	183	240	240	240	237	169	240	240	240	205	152	240	211	220	163
800 °C	179	240	240	240	235	162	240	238	232	203	143	240	195	203	162
1000 °C	97	240	240	222	234	NA	225	240	181	195	NA	193	220	128	150

Figura 11 - Regime di rotazione di rottura di diversi materiali al variare delle condizioni operative di pressione e temperatura di esercizio

7.3 Sviluppo di un modello di simulazione di un gruppo MTG

Questa attività ha riguardato lo sviluppo di un modello virtuale, in ambiente Matlab/Simulink, di una MTG rappresentativo di un sistema fisico reale. Sono stati rappresentati i comportamenti dei vari sottosistemi presenti in un gruppo MTG (compressore, camera di combustione, turbina e scambiatori di calore) e del sistema nel suo complesso, simulando diverse configurazioni di impianto quantificando così i principali indici di prestazione del sistema.

7.3.1 Modellazione e validazione sperimentale della prestazione dei componenti selezionati

Il modello è stato sviluppato incrociando le informazioni ricevute dal costruttore utilizzando le mappe di efficienza delle turbomacchine (turbina e compressore) riportate in Figura 12, con i risultati ottenuti da un'attività sperimentale, condotta in UNIBO. Considerando i limiti di affidabilità dei componenti, il rotore in materiale metallico convenzionale può operare fino ad un massimo di 220-240 krpm. Il setup sperimentale utilizzato per la verifica del modello è riportato in Figura 13.

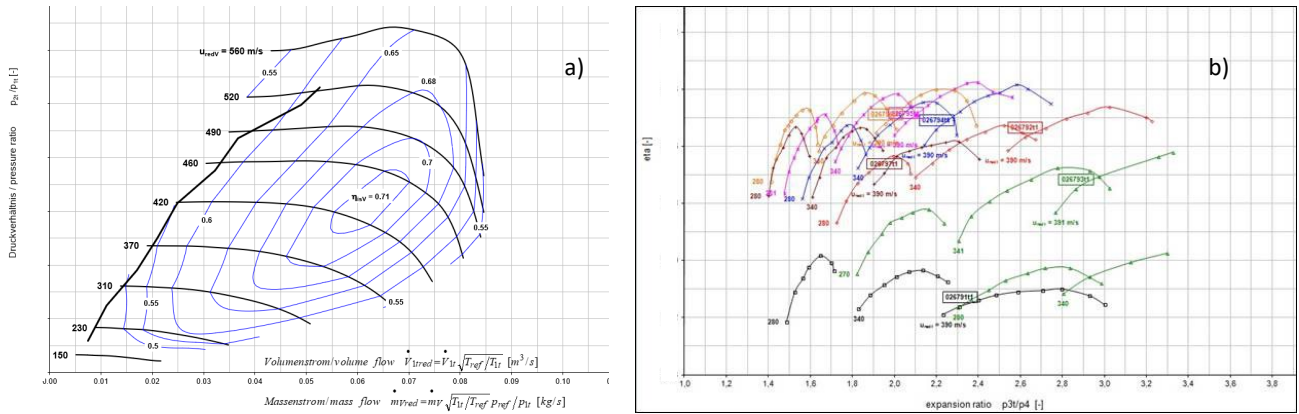


Figura 12 - Efficienze di compressore (a) e turbina (b)

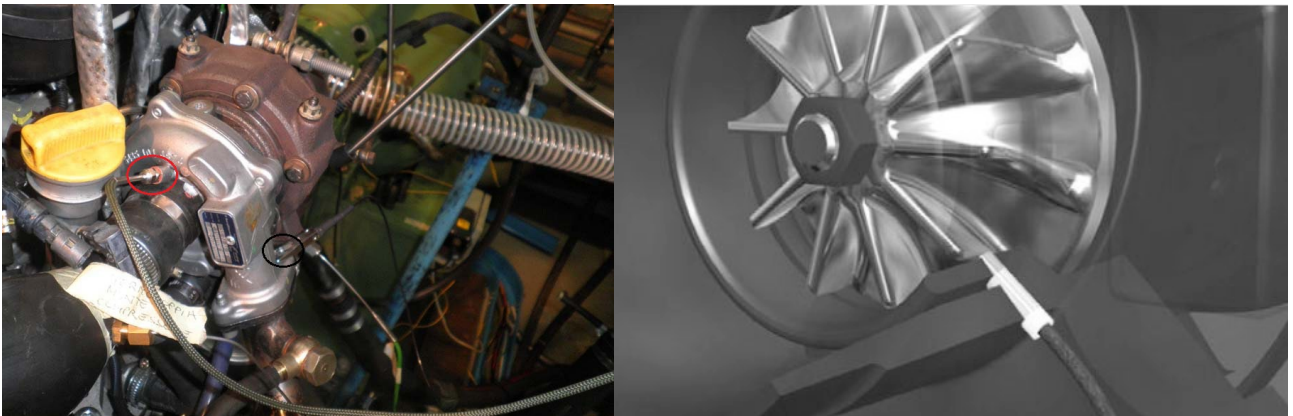


Figura 13 - Installazione del gruppo Turbocompressore selezionato presso la sala prove dell'Università di Bologna, sede di Forlì

Il modello sviluppato permette di stimare, istante per istante, il livello di potenza richiesta dal compressore ed il livello di potenza fornito dalla turbina. Per poter verificare l'aderenza con il comportamento reale del sistema, è stato scelto di sviluppare in prima battuta un modello di MTG semplificato, Figura 14, determinando la velocità di rotazione a cui il turbogruppo viene portato dall'equilibrio dinamico (bilancio di potenza).

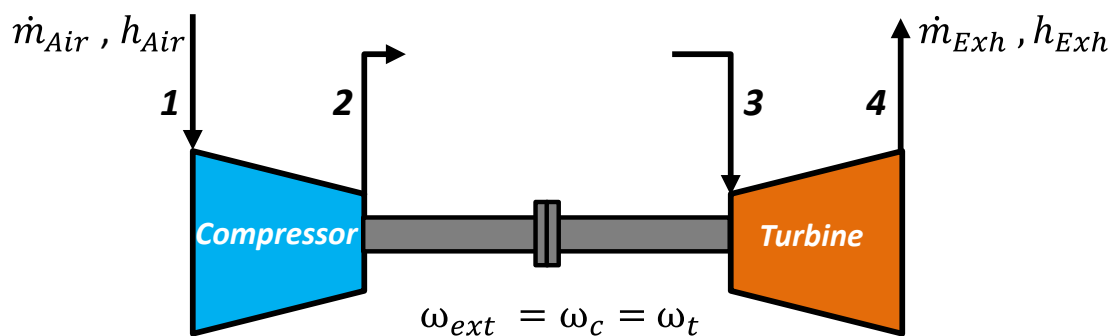


Figura 14 - Schema del turbogruppo (modello MTG semplificato)

Le potenze sono state calcolate direttamente attraverso l'Equazione 1 (potenza compressore) e l'Equazione 2 (potenza turbina), in cui le condizioni 1, 2, 3 e 4 si riferiscono agli stati termodinamici riportate in Figura 14.

$$P_c = \frac{1}{\eta_c} \dot{m}_c c_{p,c} T_{01} \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$P_T = \eta_T \dot{m}_t c_{p,t} T_{03} \left[1 - \left(\frac{p_{04}}{p_{03}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (2)$$

La Figura 15 mostra lo schema complessivo del modello dinamico sviluppato, in cui compaiono esplicitamente le connessioni fisiche fra i vari sottosistemi.

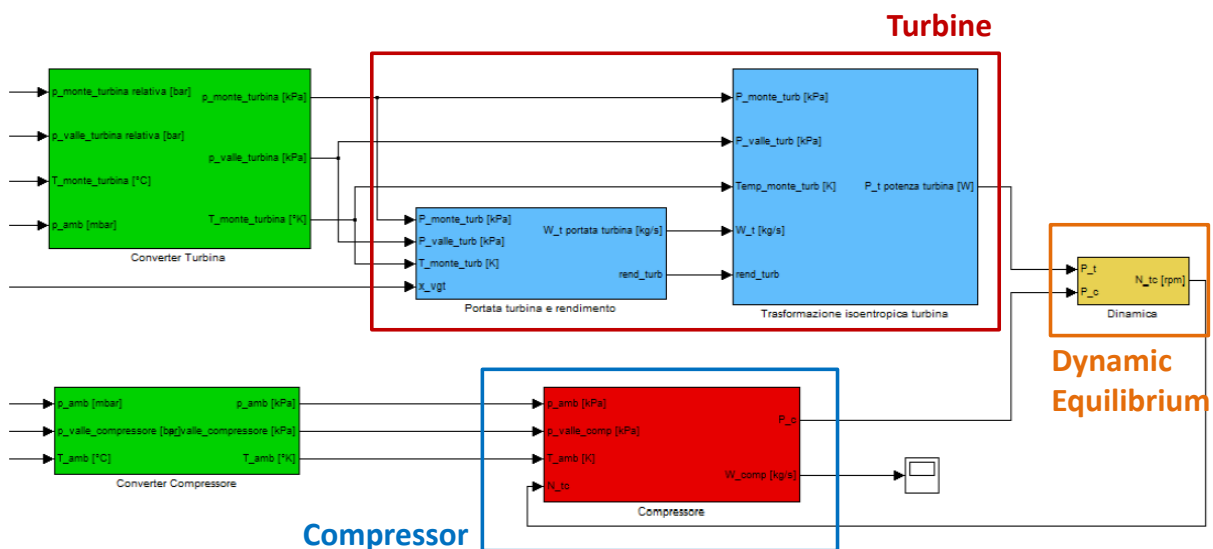


Figura 15 - Modello Simulink del turbogruppo (Modello MTG semplificato)

Una volta sviluppato un modello allineato al gruppo turbocompressore reale, la validazione del modello è stata effettuata confrontato i dati acquisiti attraverso campagne sperimentali operando sia condizioni stazionarie che transitorie.

Fra i diversi approcci di modellazione tentati, il più accurato è risultato essere l'approccio denominato "Mappa Normalizzata", che rielaborando la potenza compressore rispetto ad un parametro dimensionale (ωR), Equazione 3, consente una rappresentazione semplificata ma efficace della potenza compressore, Figura 16.

$$L_{c,norm} = \frac{\frac{1}{\eta_c} c_{p,c} T_{01} \left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\omega^2 R^2} \quad (3)$$

Come si può osservare dal confronto fra i risultati delle simulazioni ed i dati sperimentali, Figura 17, il modello implementato è in grado di rappresentare con ottima accuratezza l'andamento della velocità di rotazione anche in presenza di transitori molto rapidi.

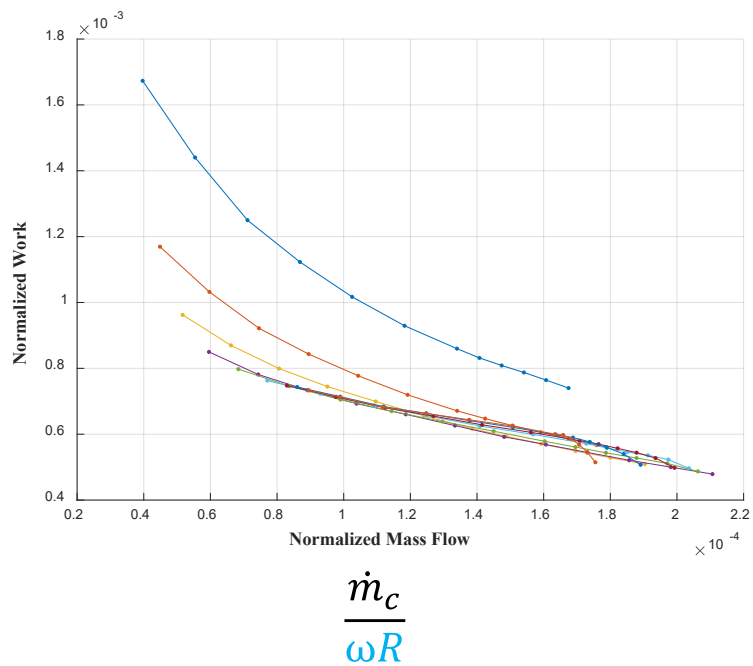


Figura 16 - Mappatura del lavoro compressore, utilizzata nel modello dinamico del turbocompressore

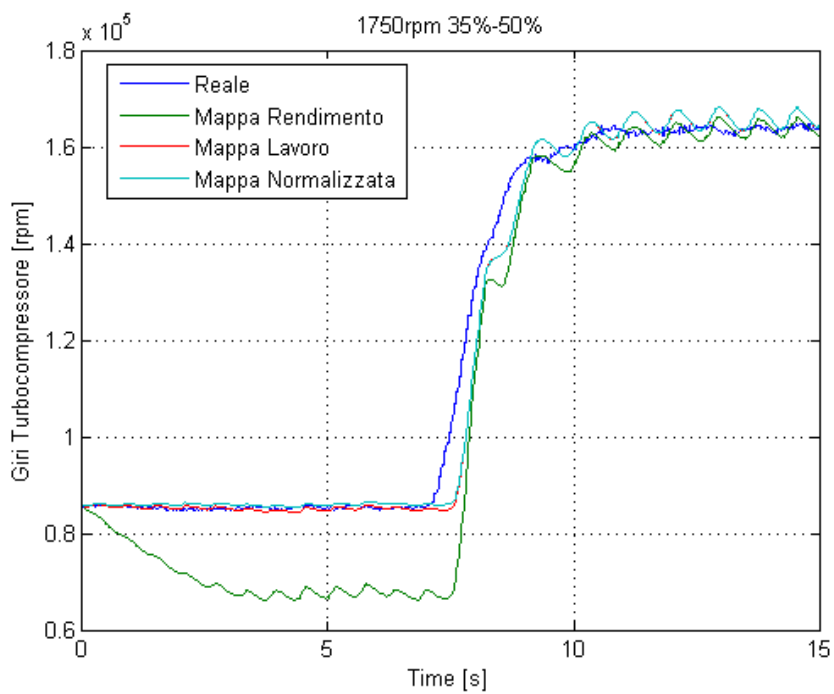


Figura 17 - Confronto fra i dati sperimentali e risultato delle simulazioni ottenute con diversi approcci in condizioni transitorie

7.3.2 Implementazione della camera di combustione nel modello di MTG

Successivamente è stato necessario introdurre nel modello la rappresentazione di una camera di combustione in grado di produrre gas potenziali ad alto contenuto entalpico. Per descrivere il funzionamento di questo elemento è stato scelto di utilizzare un approccio chimico-fisico utilizzando il software CEArun (NASA), calcolando prodotti delle reazioni di combustione all'equilibrio chimico in funzione delle proprietà dei reagenti.

Come input di questo modello di combustione vengono utilizzate le informazioni di pressione a valle del compressore, un range di lambda (rapporto di miscelazione comburente combustibile), metano (CH₄, rapporto stechiometrico di combustione è 17:1 [kg/kg]) come combustibile e la temperatura a valle del compressore, ottenuta dal modello di turbocompressore mediante una compressione attraverso l'Equazione 4:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (4)$$

È dimostrato che operare in range di lambda globale eccessivamente alto (maggiori di 5) o eccessivamente basso (<1) risulta essere svantaggioso e talvolta pericoloso per l'integrità strutturale del sistema MTG. La Figura 18 riporta la massima temperatura ottenibile in camera di combustione al variare delle condizioni dei reagenti.

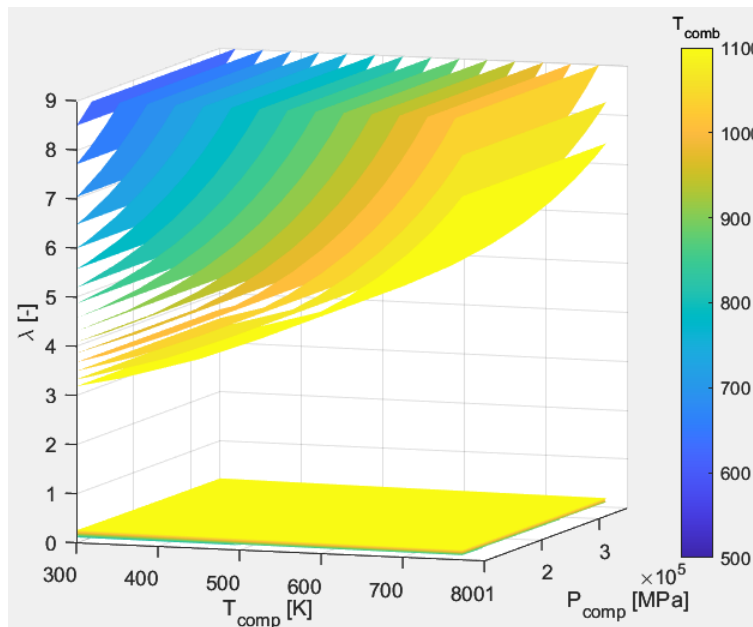


Figura 18 - Temperatura massima ottenibile in camera di combustione ricavata dall'utilizzo del software CEArun

I valori riportati in Figura 18 evidenziano, oltre che una forte dipendenza da lambda, come per un numero significativo di condizioni, le temperature di ingresso turbina (i.e. uscita camera di combustione) siano maggiori di 800°C trovando così giustificazione pratica all'utilizzo di materiali ceramici innovativi. La Figura 19 riporta il modello di camera di combustione implementato, conflueno nella generazione di un modello di MTG semplice, Figura 20.

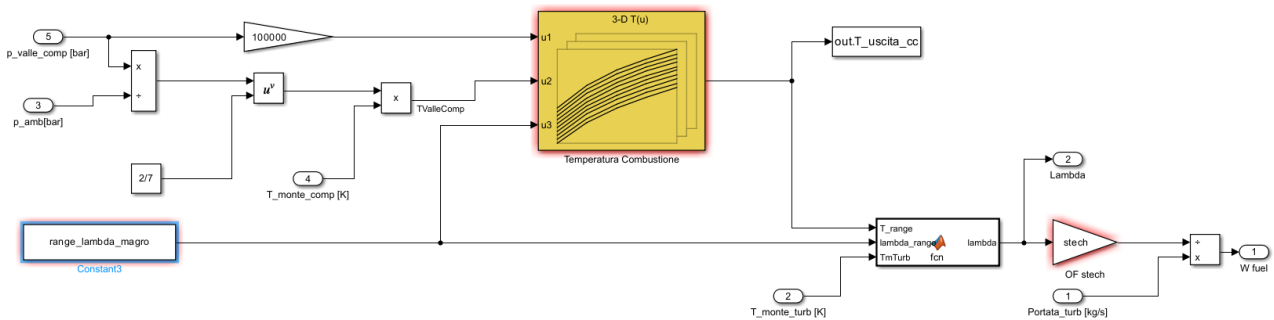


Figura 19 - Modello di camera di combustione implementato basato su mappe ottenute dal software CEArun

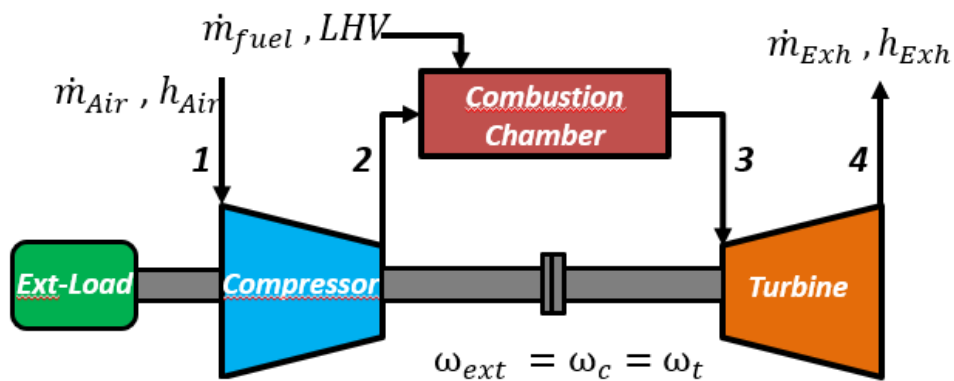


Figura 20 - Schema di MTG standard

7.3.3 Implementazione dello scambiatore di recupero nel modello di MTG

Nell'ottica di realizzare un modello di simulazione allineato alle configurazioni di MTG attualmente diffuse sul mercato, è stato necessario introdurre nel modello uno scambiatore di rigenerazione (tipiche metodologie per l'aumento del rendimento in gruppi MTG) che preriscaldi l'aria in uscita dal compressore utilizzando i gas combusti. In Figura 21 è riportato lo schema del gruppo MTG rigenerativo sviluppato, del tutto analogo ad un MTG semplice ad eccezione del recuperatore e del relativo ramo di bypass, che governa il grado di rigenerazione (RG) definito nell'Equazione 5.

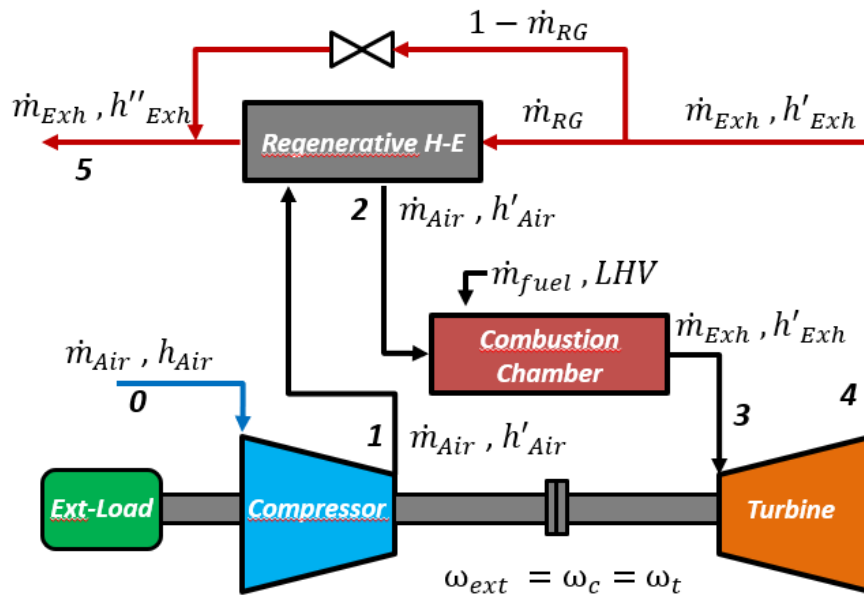


Figura 21 - Schema di MTG rigenerativo

$$RG = \frac{m_{rg}}{m_{exh}} \quad (5)$$

In analogia a quanto presente nelle applicazioni reali, è stato introdotto nel modello del sistema MTG uno scambiatore a superficie a piastre in controcorrente. Avendo due fluidi (gas esausti e aria comburente) fisicamente separati, questa soluzione consente di uniformare lo scambio termico lungo tutto il percorso interno, Figura 22, a vantaggio dell'efficienza. Sulla base di queste considerazioni, è stato identificato in letteratura uno scambiatore commerciale, BOSAL P5-100 Figura 23. Utilizzando le informazioni fornite dal costruttore [5], riportate in Figura 24 e Figura 25, è stato possibile modellare lo scambiatore ed inserirlo efficacemente nel modello di simulazione del MTG rigenerativo.

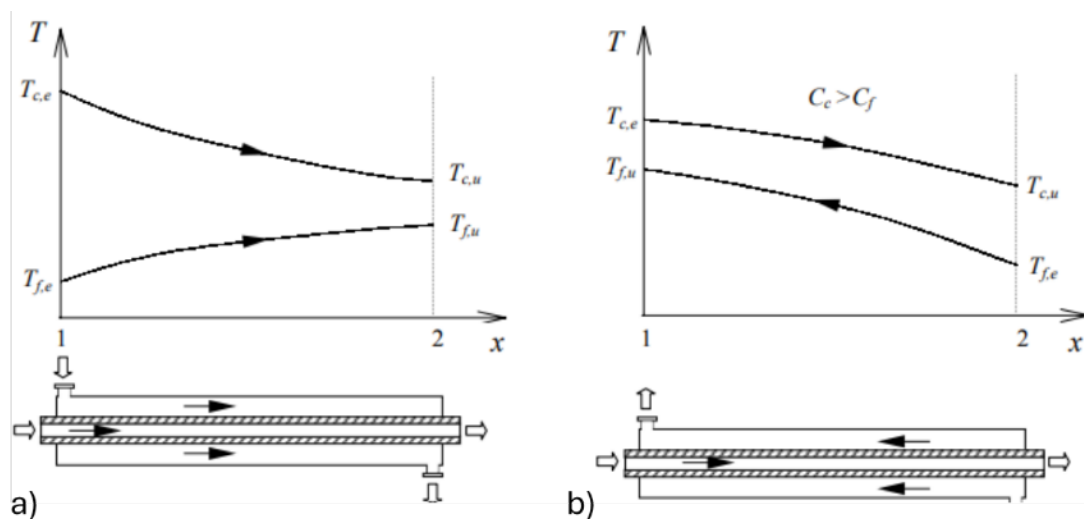


Figura 22 - Confronto fra i diagrammi di scambio termico di scambiatori di calore con flusso in equi-corrente (a) e contro-corrente (b)



Figura 23 - Scambiatore BOSAL P5-100

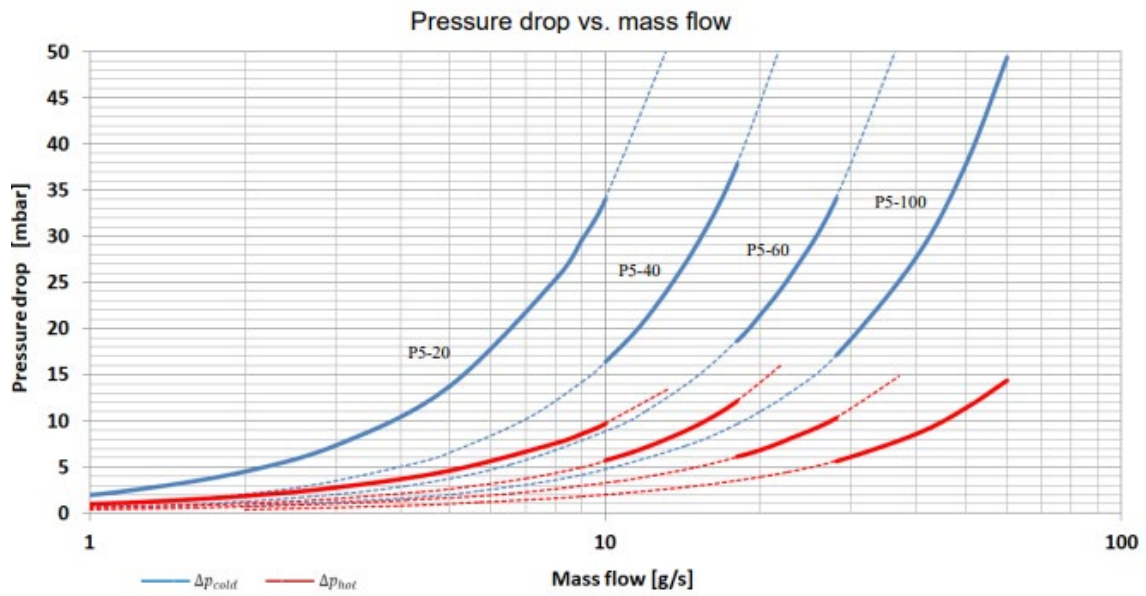


Figura 24 - Curva caratteristica scambiatore BOSAL P5-100: caduta di pressione in funzione delle portate circolanti

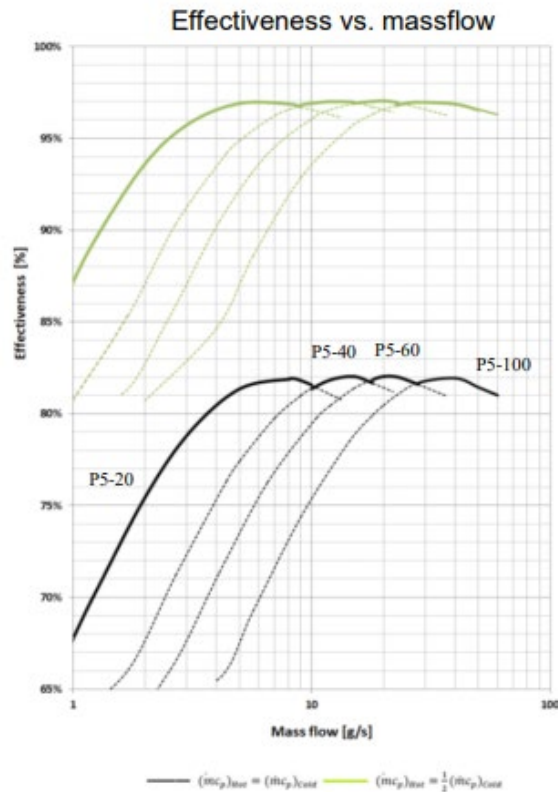


Figura 25 - Curva caratteristica scambiatore BOSAL P5-100: efficienza di scambio termico in funzione delle portate circolanti

7.3.4 Implementazione dello scambiatore cogenerativo nel modello di MTG

L'ultimo componente oggetto della modellazione del gruppo MTG è stato quindi lo scambiatore cogenerativo (considerando come fluido vettore acqua) e la sua integrazione nel modello esistente, Figura 26. La possibilità di gestione del grado di rigenerazione consente di modulare il livello di cogenerazione, rendendo il modello più generico. In virtù della semplicità di implementazione e dell'aderenza ai requisiti impiantistici, è stato inserito all'interno del modello esistente un secondo scambiatore BOSAL P5-100 sul ramo di cogenerazione.

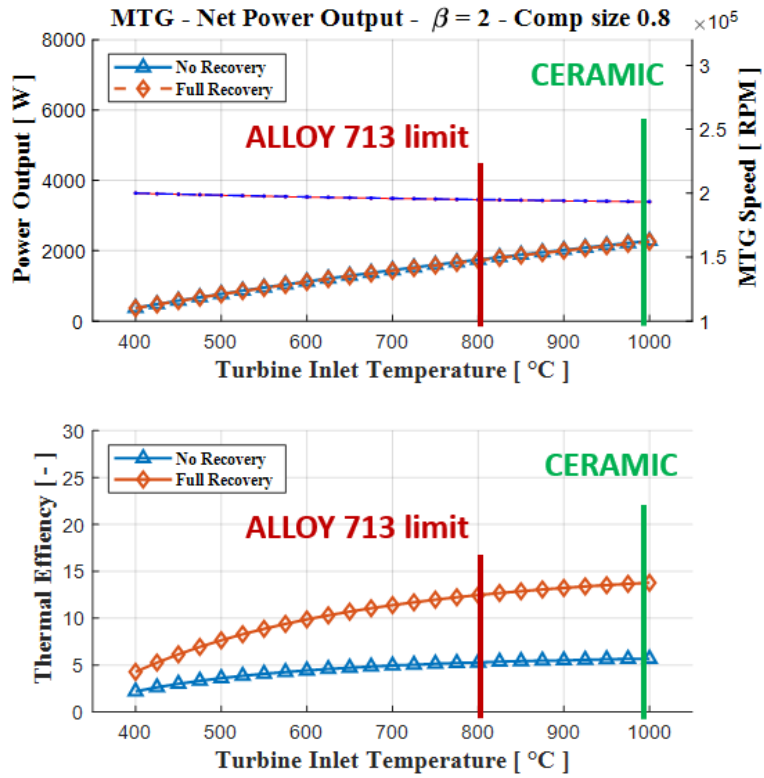


Figura 27 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2

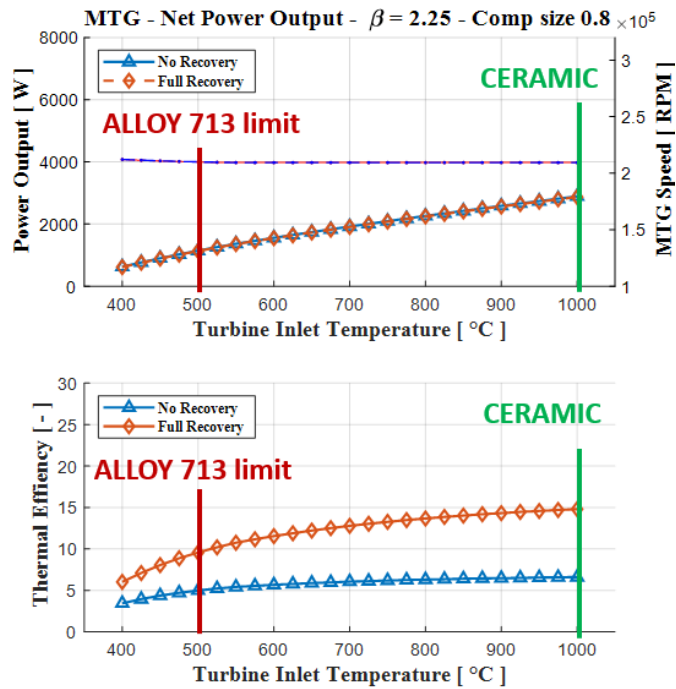


Figura 28 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.25

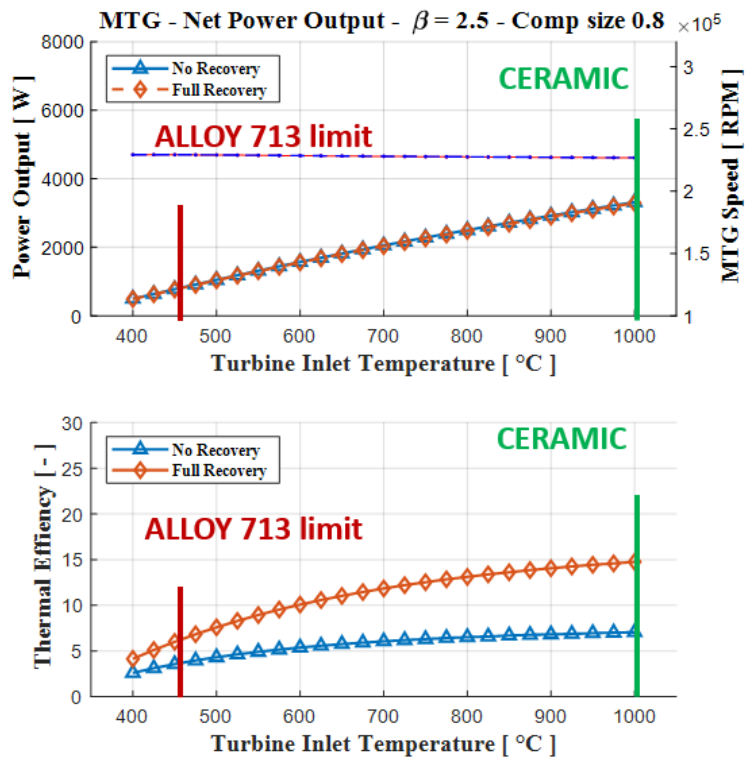


Figura 29 - Analisi di prestazione per gruppo MTG semplice (RG=0%) e rigenerativo (RG=100%) al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.5

L'analisi delle prestazioni del gruppo MTG cogenerativo (RG=100%), ha riguardato 2 scenari: massimo sfruttamento del cascame termico residuo (No MTG Tout limit), temperatura di uscita dei gas di scarico pari a 100°C. Questa seconda configurazione è stata presa in considerazione per valutare l'impatto delle limitazioni generate dal fenomeno della rugiada acida (condensazione di gas di scarico contenenti zolfo all'interno dell'impianto). I risultati delle analisi comparative sono riportate in Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Dalle analisi risulta evidente il beneficio dell'incremento di temperatura nel passaggio a materiali ceramici rispetto a tradizionali materiali metallici (Alloy 713). È emerso inoltre che, considerando le limitazioni causate dal fenomeno della rugiada acida, l'incremento di temperatura di utilizzo risulta in prima battuta essere penalizzante. Tuttavia, queste valutazioni sono fortemente influenzate dalla tipologia e dall'efficienza dello scambiatore cogenerativo considerato.

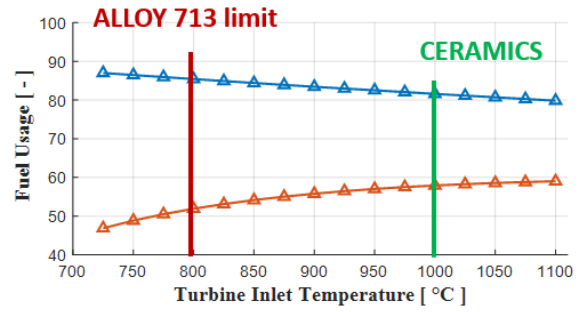
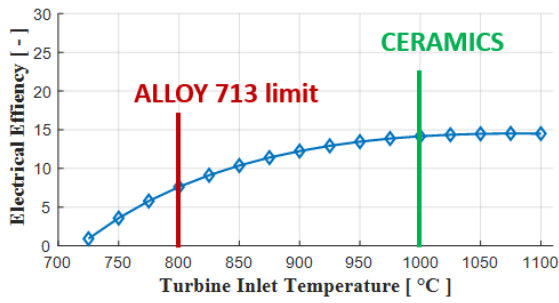
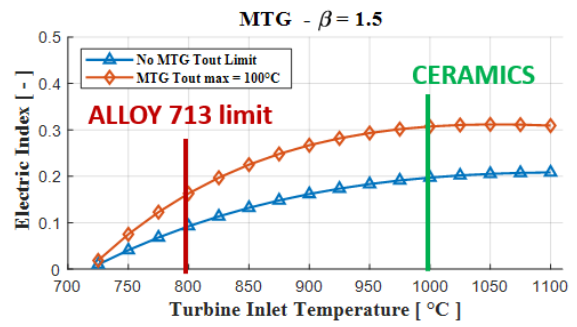
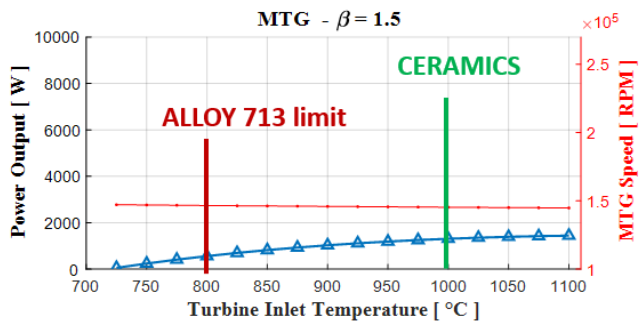


Figura 30 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 1.5

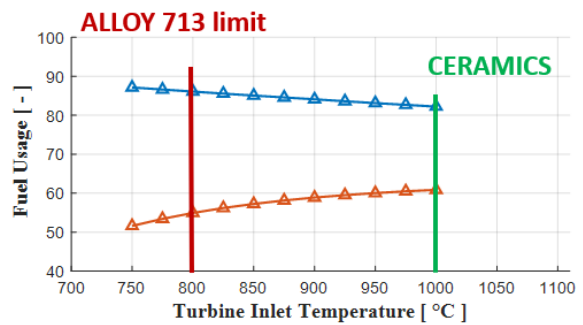
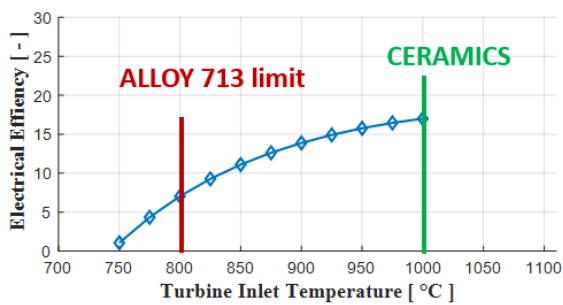
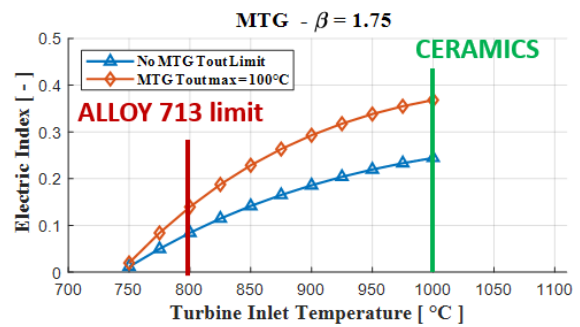
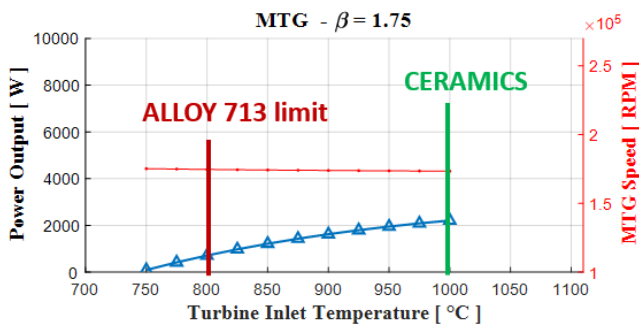


Figura 31 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 1.75

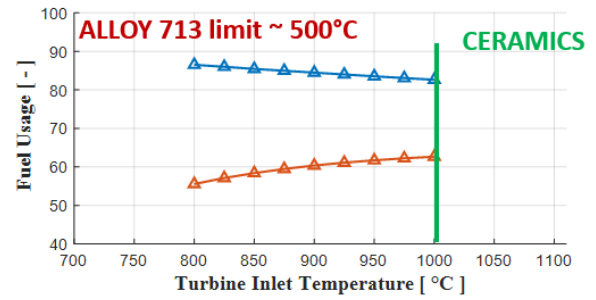
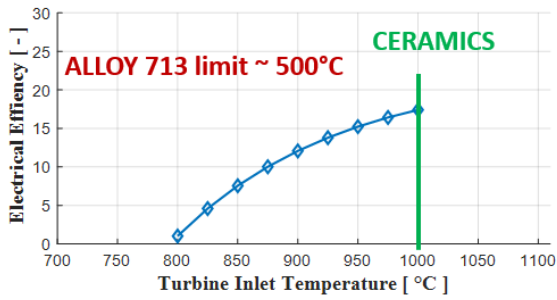
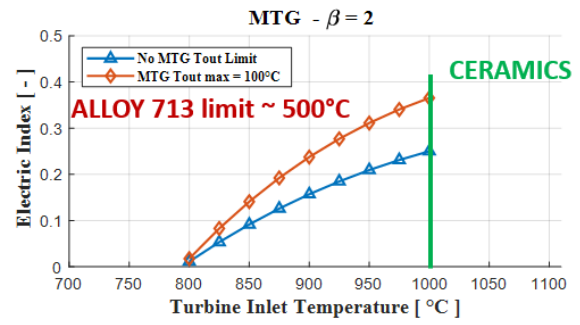
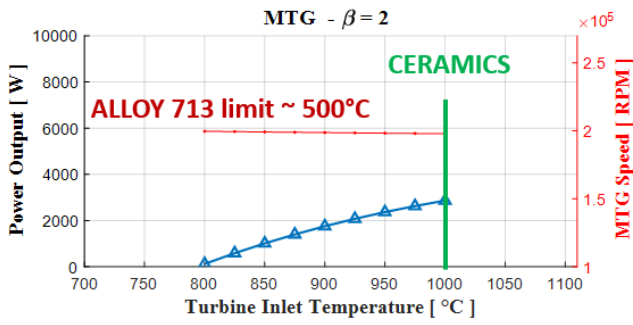


Figura 32 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2

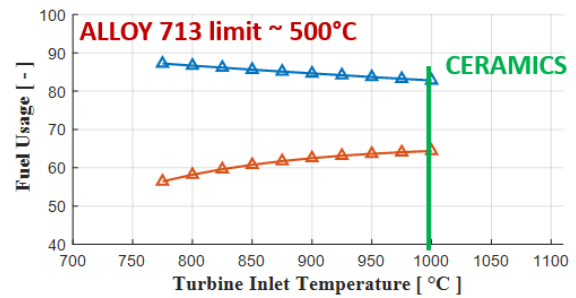
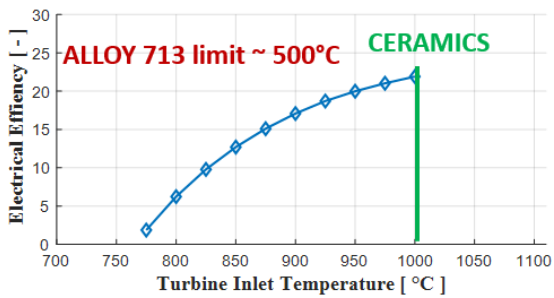
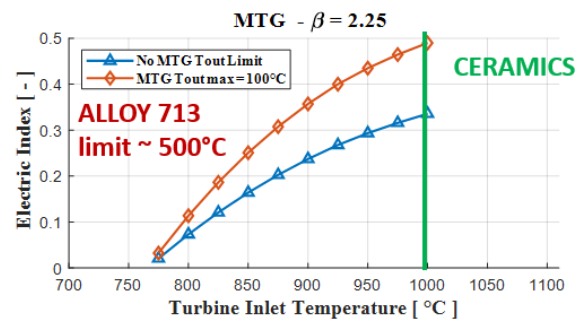
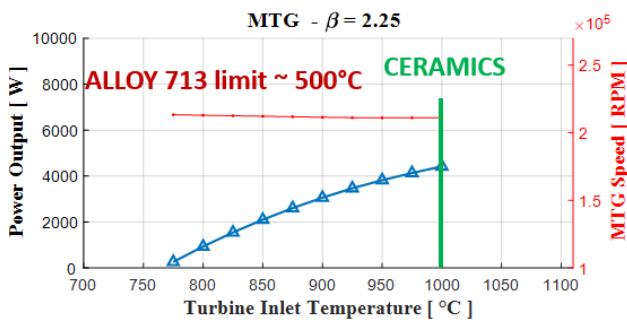


Figura 33 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.25

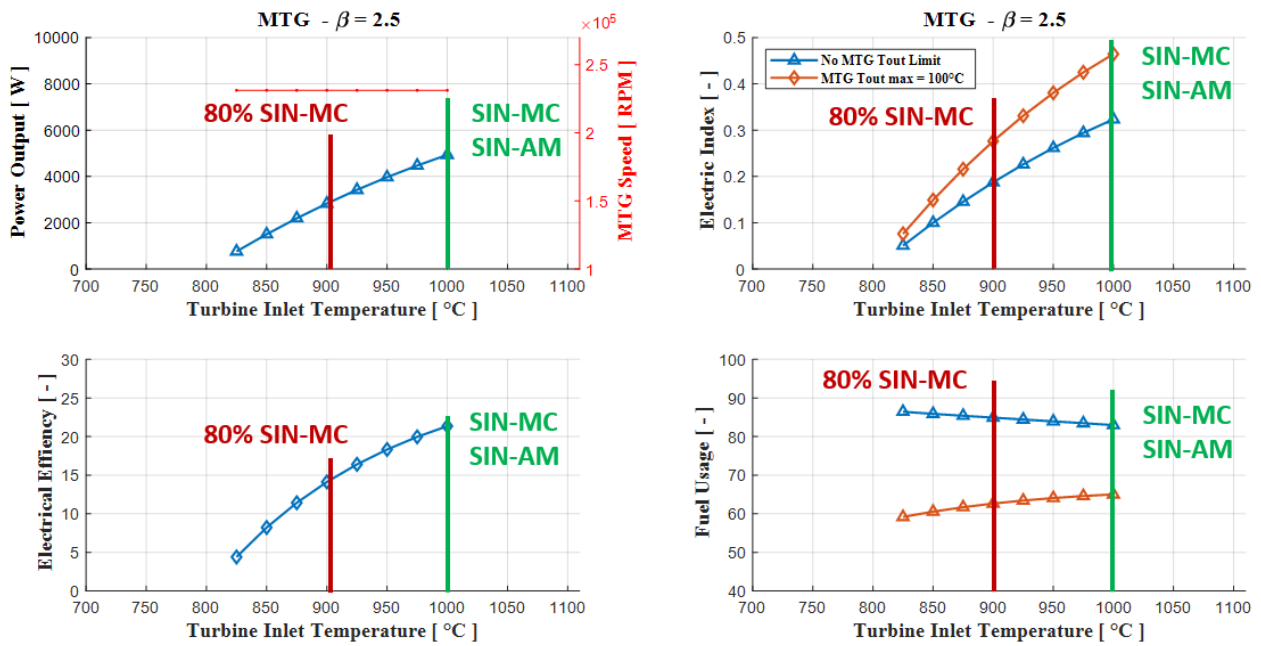


Figura 34 - Analisi di prestazione per gruppo MTG cogenerativo al variare della temperatura in ingresso turbina e rapporto di compressione 2.5

7.5 Schema e progetto per il layout del sistema di testing da utilizzare in future attività sperimentali sulla MTG

Questa attività ha riguardato la selezione di un piccolo MTG e la progettazione di un banco di prova per piccoli sistemi MTG. Il sistema MTG, un MTG JetCat P20SX per applicazioni aeronautiche riportato in Figura 35, è stato selezionato considerando come criteri principali di scelta le limitazioni dimensionali del processo di AM oggetto del WP4, la semplicità costruttiva e il basso costo. Successivamente l'MTG è stato acquisito dal gruppo di lavoro.

Dopo aver acquisito il sistema MTG, il gruppo di lavoro si è focalizzato sulla progettazione del banco di prova. I tecnici del sistema di test sono stati determinati dalle geometrie dei componenti, dalle peculiarità del sistema MTG e dalle esigenze in termini di accuratezza di misurazione di tutti i parametri operativi di queste tipologie di sistemi.

JetCat P20 SX



Pressure ratio	1,5
Mass flow (kg/s)	0,05
Consumption Full load (ml/min)	90
Weight [g]	350
Dimensions of the diameter (mm)	60
Length (mm)	171
Exhaust gas temperature (°C)	480-690
Max rpm (1/min)	245000
Exhaust gas velocity (km/h)	1674
Exhaust gas power output (kW)	5,6
SFC @ maxRpm (kg/Nh)	0,188

Figura 35 - Sistema MTG commerciale identificato ed acquistato nell'ambito della LA 4.3

Avendo selezionato un MTG di derivazione aeronautica, la misurazione efficace dell'effetto utile (spinta) fondamentale per una corretta valutazione delle prestazioni, è risultata essere l'aspetto più delicato della progettazione. Si è quindi optato per realizzare una soluzione a bassissimo coefficiente di attrito composta da una piattaforma di sostegno su guide pneumatiche in pressoché assenza di attrito. Successivamente, si è reso necessario progettare un leveraggio per la conversione della forza sull'asse verticale, ad insistere sul sistema di misurazione (cella di carico ad elevata precisione). La Figura 36 mostra la prima versione del progetto del banco di prova, mentre la Figura 37 riporta il layout definitivo del banco contenente tutti gli accessori per il corretto funzionamento.

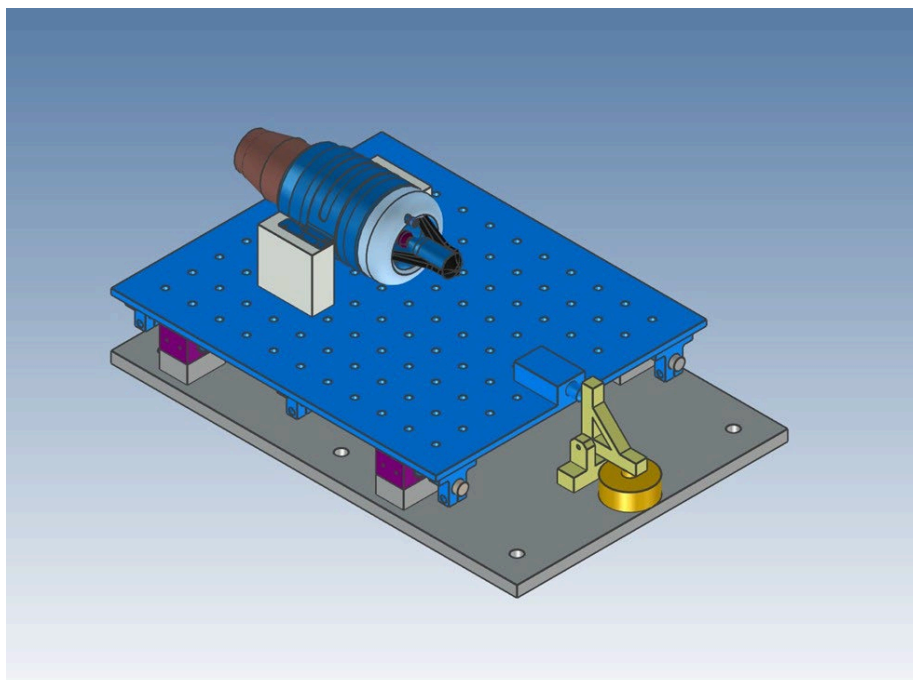


Figura 36 - Layout semplificato del banco prova per piccoli MTG

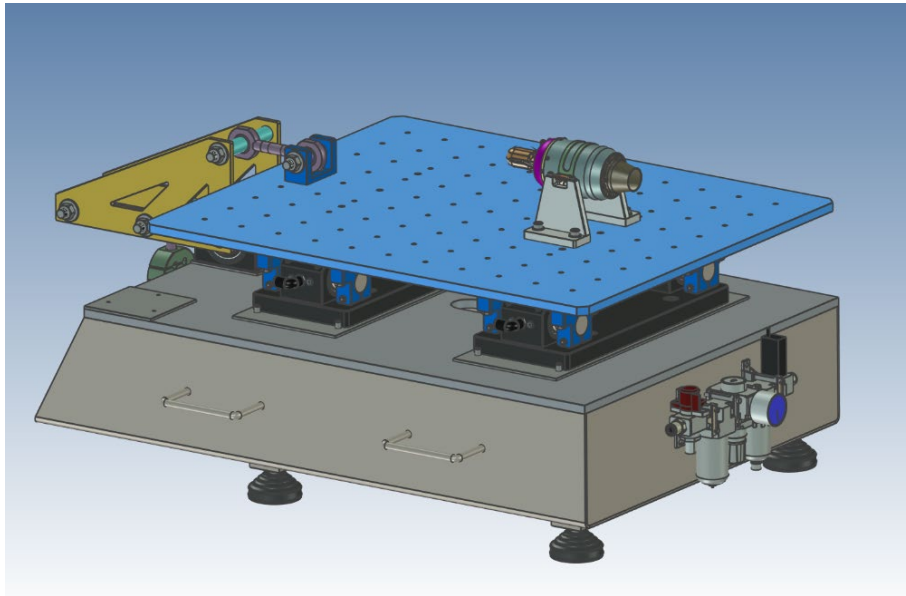


Figura 37 - Layout definitivo del banco prova per piccoli MTG

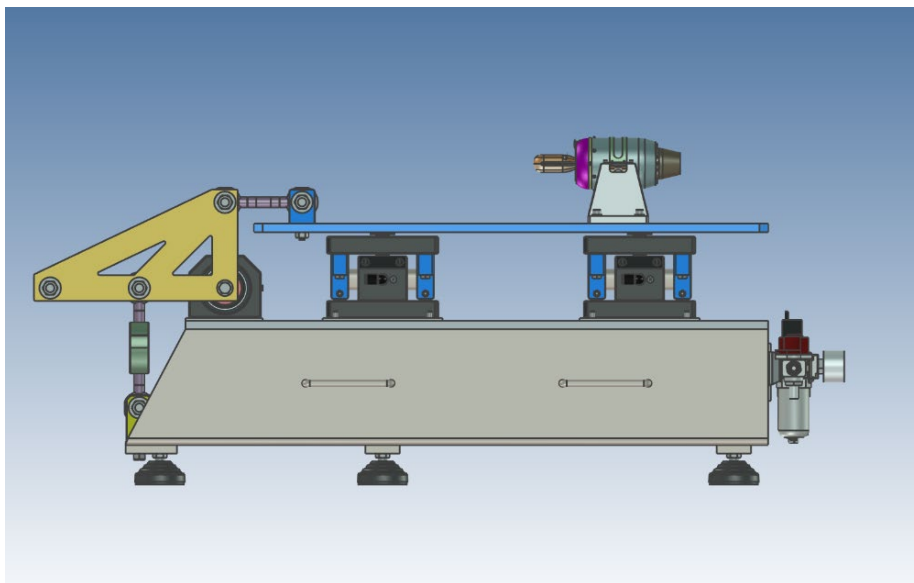


Figura 38 - Layout definitivo del banco prova per piccoli MTG, particolare: cuscinetti pneumatici e leveraggio per la quantificazione dell'effetto utile (spinta)

Infine, sono stati identificati tutti i sensori ed il sistema di acquisizione necessari ad equipaggiare il banco di prova. La Figura 39 mostra il sistema di controllo identificato, National Instruments DAQ USB 6000. Attraverso il software di programmazione Labview, è stato inoltre possibile progettare il sistema di controllo dei dispositivi e delle funzioni che equipaggeranno il banco di prova, Figura 40.



Figura 39 - Sistema di acquisizione e controllo del banco di prova per sistemi MTG

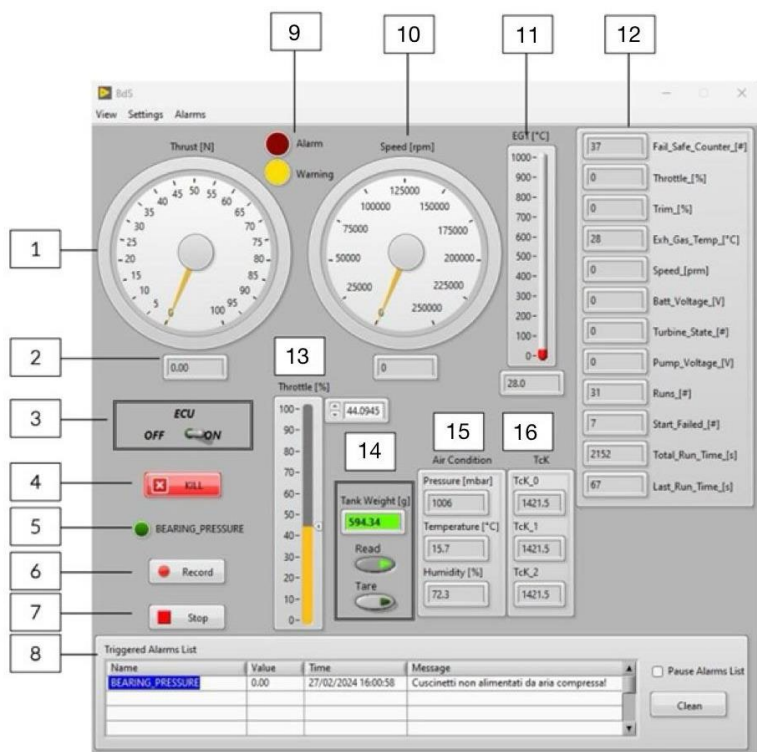


Figura 40 - Software di controllo dei dispositivi e delle funzioni che equipaggeranno il banco di prova

8 Riferimenti Bibliografici

- [1] - Pierce, Haynes, Hughes, Graves, Maziasz, Muralidharan, Shyam, Wang, England, Claus, "High temperature materials for heavy duty diesel engines: Historical and future trends", Progress in Materials Science, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.10.004>
- [2] - de Faoite, D., Browne, D.J., Chang-Díaz, F.R. et al. A review of the processing, composition, and temperature-dependent mechanical and thermal properties of dielectric technical ceramics. *J Mater Sci* **47**, 4211–4235 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6140-1>
- [3] -Sakaguchi, S., Murayama, N., Kodama, Y. et al. The Piosson's ratio of engineering ceramics at elevated temperature. *J Mater Sci Lett* **10**, 282–284 (1991). <https://doi.org/10.1007/BF00735658>
- [4] - Cramer, Ionescu, Graczyk-Zajac, Nelson, Katoh, Haslam, Wondraczek, Aguirre, LeBlanc, Wang, Masoudi, Tegeler, Riedel, Colombo, Minary-Jolandan, "Additive manufacturing of ceramic materials for energy applications: Road map and opportunities", Journal of the European Ceramic Society, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.01.058>
- [5]- <https://www.bosal.com/en/energy>

9 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA 4.3 non è stato necessario utilizzare consulenze.

10 Pubblicazioni scientifiche

Lo sviluppo del modello dinamico di simulazione del gruppo MTG sviluppato nell'ambito della LA 4.3 e l'attività di reverse engineering della girante turbina sono state oggetto di 4 tesi di laurea dal titolo:

Bombardi A., **"Sviluppo del modello virtuale di una microturbina di derivazione automobilistica"**, Relatore: Prof. Ravaglioli V., Correlatore: Ing. Silvagni G., Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Università di Bologna

Bighi T., **"Reverse engineering di una turbina centripeta"**, Relatore: Prof. Ravaglioli V., Correlatore: Ing. Silvagni G., Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università di Bologna

Banello O., **"Simulazioni preliminari per la conversione di un motore turboalbero aeronautico al funzionamento ad idrogeno"**, Relatore: Prof. Ravaglioli V., Correlatore: Ing. Silvagni G., Fadigati L., Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, Università di Bologna

Perra U. **"Development of a model to describe the performance of a hydrogen-fueled turboshaft engine"**, Relatore: Prof. Ravaglioli V., Correlatore: Ing. Silvagni G., Magnani M., Tesi di Laurea Magistrale in Aerospace Engineering, Università di Bologna

Inoltre, i risultati dell'attività di modellazione sono stati utilizzati come base per la realizzazione della seguente pubblicazione scientifica:

Magnani M, Silvagni G, Ravaglioli V, Ponti F., **"0-D Dynamic Performance Simulation of Hydrogen-Fueled Turboshaft Engine"**. *Aerospace*. 2024; 11(10):816. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100816>

Per massimizzare la visibilità del contenuto della pubblicazione, è stato scelto di renderla Open Access.

11 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione eventualmente scaturiti dall'attività svolta