

Ricerca di Sistema elettrico



Definizione Preliminare di una Strategia di Combustione Fuel-Flexible per Microturbina (LA3.6)

A. Di Nardo, G. Calchetti, E. Giacomazzi, D. Cecere, G. Troiani,
G. Messina, G. Guidarelli, N. Arcidiacono, C. Stringola,
E. Giulietti, M. Marrocco

DEFINIZIONE PRELIMINARE DI UNA STRATEGIA DI COMBUSTIONE FUEL-FLEXIBLE PER MICROTURBINA
(LA3.6)

A. Di Nardo, G. Calchetti, E. Giacomazzi, D. Cecere, G. Troiani, G. Messina, G. Guidarelli, N. Arcidiacono, C. Stringola, E. Giulietti, M. Marrocco (ENEA)

Giugno 2023

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: Progetto Integrato Tecnologie dell'idrogeno

Linea di attività: LA3.6

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Eugenio Giacomazzi, ENEA

Mese inizio previsto: 1 (gennaio 2022)

Mese inizio effettivo: 1 (gennaio 2022)

Mese fine previsto: 12 (dicembre 2022)

Mese fine effettivo: 12 (dicembre 2022)

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	3
4	PRODOTTI SVILUPPATI	3
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	4
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	4
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	4
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	7
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	7
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	8

1 Risultati attesi

L'obiettivo di questa LA è quello di identificare una tecnologia di combustione fuel-flexible per turbine a gas e definire una prima geometria di base del bruciatore per mezzo di simulazioni numeriche RANS. Il dispositivo definito dovrà poi essere migliorato, integrato con il sistema di alimentazione ed il liner nella LA3.7.

Il piano di lavoro prevede, in una prima fase, di esaminare le tecnologie di combustione attualmente battute per lo sviluppo di combustori fuel-flexible per turbine a gas, potenzialmente in grado di operare con miscele di gas naturale e idrogeno nel range 0-100% di H₂ e con limitate emissioni di NO_x, e di selezionarne almeno una, od alcune integrabili. In una seconda fase, prevede di definire, per mezzo di simulazioni numeriche RANS, una tipologia di bruciatore associata alla tecnologia di combustione precedentemente identificata, implementabile sulla microturbina TURBEC T100 dell'impianto AGATUR. La scelta è basata sull'ottimizzazione del mescolamento dei reagenti e sulla riduzione dei rischi di ritorno di fiamma (flashback), studiando casi con 0%, 50% e 100% di H₂.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono perfettamente in linea con quelli attesi. Gli elementi di verifica del lavoro svolto sono la sottomissione del report R3.6 che descrive il raggiungimento dei seguenti risultati: 1. selezione della strategia di combustione; 2. prima configurazione del bruciatore simulata con solo metano e con una miscela ad almeno il 50% di H₂ (è stata anche eseguita una prima simulazione al 100% H₂).

Le specifiche attività svolte nella LA3.6 sono di interesse per lo sviluppo di combustori fuel-flexible (miscele di gas naturale e idrogeno); tale tema è attualmente al centro dell'attenzione nel settore delle turbine a gas e quindi i risultati ottenuti possono potenzialmente avere ricadute applicative in industrie nazionali quali Baker Hughes e Ansaldo Energia. Il fatto che si lavori sulla TURBEC T100, di ANSALDO, aggiunge opportunità di collaborazione ai canali diretti già attivi con il produttore, interessato ai risultati del progetto e ad ulteriori sviluppi. Il beneficio per il sistema elettrico nazionale e i suoi utenti è evidente dall'insieme delle attività previste sull'alimentazione flessibile delle turbine a gas. Le soluzioni tecnologiche individuate nella LA3.6, e che saranno ulteriormente sviluppate nelle altre LA previste, sono volte all'aumento della flessibilità delle microturbine e turbine di taglia maggiore nell'operare con miscele gas naturale-idrogeno con un contenuto di idrogeno ampio e variabile: vanno dunque a contribuire direttamente all'utilizzo sostenibile dell'idrogeno nel settore della generazione termoelettrica, ed indirettamente alla sicurezza e stabilità del sistema elettrico italiano, con gli obiettivi di abbatterne le emissioni e di favorire la diffusione delle rinnovabili.

3 Prodotti attesi

Nella LA3.6 non sono previsti prodotti software/hardware. L'unico prodotto della ricerca previsto è il Rapporto tecnico R3.6 "Selezione di una Tecnologia di Combustione Fuel-Flexible e Relativa Geometria Preliminare" sulla selezione della tecnologia di combustione fuel-flexible per la microturbina TURBEC T100 dell'impianto AGATUR, tra le varie potenzialmente disponibili per turbine a gas, e sullo sviluppo della associata geometria del bruciatore per mezzo di simulazioni numeriche.

4 Prodotti sviluppati

Coerentemente con quanto previsto, non sono stati sviluppati prodotti hardware/software nella LA3.6.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si rilevano né scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo, né criticità (rischio previsto nullo).

6 Sintesi delle attività svolte

In una prima fase è stato esaminato lo stato dell'arte delle tecnologie di combustione per turbine a gas, in particolare dal punto di vista dell'aumento della fuel-flexibility.

Successivamente, è stata individuata una strategia di combustione in grado di operare in un ampio range di miscele gas naturale/idrogeno. La soluzione individuata prevede due bruciatori indipendenti di tipo premiscelato magro (DLE), rispettivamente per bassi ed alti contenuti di H_2 , con un sistema di selezione bruciatore e parzializzazione dell'aria. È stata identificata una prima configurazione geometrica dei bruciatori con simulazioni numeriche di tipo RANS focalizzate alla caratterizzazione del mescolamento tra i reagenti. Le simulazioni hanno permesso di ottimizzare la geometria, sperimentando, di volta in volta, per via numerica, le modifiche geometriche rese necessarie dall'insorgere di problemi di mescolamento. Con le attività successive sarà meglio identificato il massimo e minimo di H_2 che regolerà l'attivazione dei due bruciatori.

7 Dettaglio delle attività svolte

Si rinvia al rapporto tecnico completo della LA3.6 per maggiori dettagli: "Selezione di una Tecnologia di Combustione Fuel-Flexible e Relativa Geometria Preliminare".

Stato dell'arte sulle tecnologie di combustione per turbine a gas

Per combattere il cambiamento climatico provocato dall'uomo, è necessario decarbonizzare tutti i settori che producono anidride carbonica. Nel 2019, le emissioni globali di CO_2 da combustibili fossili ammontavano a 33 Gt, con il 41% proveniente dal settore della generazione di potenza, e il resto dai settori dei trasporti e dell'industria. Le turbine a gas già oggi svolgono un importante servizio di back-up (sia di picco che stagionale) per supportare le rinnovabili non programmabili e stabilizzare (sia in tensione che frequenza) la rete elettrica, con un contributo non trascurabile alla flessibilità del sistema elettrico. Oggi, l'attenzione è focalizzata sull'idrogeno, che non emette CO_2 durante il processo di combustione. Per ottenere un impatto decisivo sulla riduzione di CO_2 occorre lavorare con miscele ad alto contenuto di idrogeno. I notevoli quantitativi di idrogeno richiesti per la decarbonizzazione del settore della generazione termo-elettrica rendono inevitabile il ricorso al "blue hydrogen", prodotto attraverso il processo di steam reforming accoppiato a tecniche di cattura della CO_2 . La capacità delle turbine a gas di funzionare con alti tenori di idrogeno richiede però dei sistemi di combustione adatti alle caratteristiche peculiari di questo combustibile.

Il presente lavoro consta di due parti: nella prima è sinteticamente riportato lo stato dell'arte sulle tecnologie di combustione per turbine a gas, con particolare riguardo a quelle che offrono vantaggi in termini di fuel-flexibility; nella seconda parte, si descrivono le attività CFD relative allo sviluppo di un nuovo bruciatore che possa operare in maniera flessibile con miscele di gas naturale/idrogeno in un ampio range di contenuto di H_2 . In particolare, i risultati della ricerca condotta hanno portato alla definizione di una strategia "fuel-flexible" di combustione per turbine a gas e di una relativa configurazione preliminare di un nuovo bruciatore per microturbina, con caratteristiche di scalabilità verso turbine di taglia maggiore.

Nel presente lavoro sono state analizzate le tecnologie di combustione messe in atto per abbattere la formazione di NO_x con particolare enfasi su quelle tecnologie volte all'incremento della flessibilità di combustibile nelle turbine a gas (aumento del range del contenuto di H_2 nelle miscele gas naturale/idrogeno). Questi sistemi possono essere classificati in quattro gruppi, in funzione della strategia adottata per la stabilizzazione della combustione.

Combustione stabilizzata aerodinamicamente per propagazione

Questa strategia si basa sulla generazione di opportune zone di ricircolazione che stabilizzano la combustione per propagazione del fronte di fiamma. Una strategia di stabilizzazione aerodinamica delle fiamme premiscelate molto utilizzata nelle applicazioni consiste nell'utilizzo di getti swirlati, aventi cioè una componente tangenziale di velocità non trascurabile (Swirl Number > 0.6). Questi bruciatori generano un flusso con una forte componente rotazionale per mezzo di palette o di getti tangenziali; il flusso swirlato della miscela magra così prodotto stabilizza le fiamme per migliorare la qualità della combustione ed accorciare la zona di reazione. Esempi di bruciatori con stabilizzazione aerodinamica sono EV di ALSTOM/ANSALDO, Mars di SOLAR Turbines, Combustore Flame Sheet™ PSM THOMASSEN.

Combustione stabilizzata per auto-accensione

La combustione per auto-accensione si verifica quando i reagenti sono iniettati in una regione a temperatura maggiore di quella di ignizione. Un esempio lo si trova nel secondo combustore della combustione sequenziale a pressione costante sviluppata da ALSTOM/ANSALDO, in cui il combustibile è iniettato nella corrente di gas esausti provenienti dal primo combustore (di tipo EV) cui è stata aggiunta dell'aria fresca. Un'altra applicazione della combustione in condizioni di auto-ignizione è la "Flameless Oxidation" (FLOX™), il cui principio è stato originariamente scoperto da Wunning.

Combustione a stadi

Nella combustione a stadi (staged combustion) si hanno tipicamente una zona ad alto rapporto di equivalenza (primo stadio) e una zona (secondo stadio) dove il rapporto di equivalenza è più basso. Come esempio possiamo riportare il concetto di "Rich-Burn, Quench (o Quick-mix), Lean-Burn" (RQL). Questo fu introdotto nel 1980 da Mosier e Pierce ed è sostanzialmente una tecnica di stadiazioni usata ancora oggi con successo. Come esempi di forme avanzate di combustione a stadi, possiamo citare la combustione sequenziale a pressione costante (CPSC) di ANSALDO Energia, il sistema a combustione distribuita (DCS) di SIEMENS, e lo staging assiale di combustibile (AFS) di GE.

Micro-mixing

Nel "micro-mixing" si cerca di ottenere un mescolamento molto rapido tra combustibile e comburente, utilizzando un gran numero di iniettori molto piccoli. La scala spaziale di questi iniettori è tale che la velocità di immissione in camera di combustione risulta maggiore della velocità di fiamma, evitando così il fenomeno del flashback e dell'ancoraggio della fiamma in prossimità dell'iniettore stesso. Il principio di tale tecnica di combustione è stato inventato in Germania diversi anni fa per applicazioni aerospaziali. Tale tecnica è oggi molto studiata per ridurre le emissioni di NO_x nella combustione di idrogeno in condizioni "dry", cioè senza iniezioni di acqua o di vapore. Il principio del micro-mixing permette di ridurre la formazione degli ossidi di azoto riducendo il tempo di residenza dei reagenti nelle zone ad alta temperatura ed accorciando la fiamma.

EGR (Exhaust Gas Recirculation)

L'EGR, "Exhaust Gas Recirculation", consiste nel ricircolare parte dei gas esausti mescolandoli con l'aria all'aspirazione del compressore. Questo determina una combustione in aria diluita sostanzialmente in CO₂, detta aria "viziata". L'effetto finale può essere analogo a quello della MILD combustion per temperature sufficientemente alte dell'aria viziata: i gas esausti sono fatti ricircolare (non con un ricircolo interno al combustore) nella zona di reazione, e la conseguente diluizione riduce i picchi di temperatura locali, rallenta la formazione di NO_x termici, e tende a smorzare eventuali instabilità termoacustiche.

Conversione catalitica

La conversione catalitica è la misura di carattere secondario, cioè, effettuata in post-combustione, più utilizzata per la riduzione degli NO_x. Il dispositivo più utilizzato per questa metodica è il convertitore catalitico, implementato ad esempio in molte automobili. Il processo di abbattimento consiste nell'utilizzo di materiali "nobili" come catalizzatori per l'ossidazione di CO in CO₂ e la conversione di NO in N₂.

Sviluppo di un prototipo di combustore fuel-flexible per la microturbina Turbec T100

Nella seconda parte si riportano gli studi effettuati ed i risultati raggiunti, relativi allo sviluppo di un bruciatore fuel-flexible per microturbina, con soluzioni scalabili a turbine a gas di taglia superiore. Infatti, l'**obiettivo** delle attività previste in questo Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico è proprio quello di individuare una **tecnologia di bruciatore fuel-flexible a basse emissioni**, realizzarne un **prototipo**, e verificarne in una test facility fuori macchina (TRL 3-4):

- l'operatività con un contenuto di idrogeno almeno pari al 20% in volume (stato dell'arte per le microturbine di circa 100 kW_e),
- e le potenzialità, con dimostrazione di una tendenza tecnologica che consenta di raggiungere e superare il 50% in volume,

il tutto nel rispetto dei limiti di emissioni.

Queste attività fanno parte di un piano di lavoro più ampio, che punta a progettare e realizzare, in un successivo programma di ricerca, un prototipo da 330 kW_t da installare nella microturbina TURBEC T100 dell'impianto AGATUR (TRL 5), di cui il Laboratorio IPSE di ENEA Casaccia è dotato. I vincoli da rispettare per la definizione del nuovo bruciatore sono quindi chiaramente legati alla microturbina in questione:

- potenza termica 330 kW_t (100 kW_e);
- pressione di esercizio 4.5 bar;
- ingombri per l'alloggiamento del nuovo bruciatore e del suo liner;
- configurazione geometrica del sistema di alimentazione dell'aria.

Pensare a microturbine come applicazione ha senso nell'ottica di sistemi di energia decentralizzati, ma è ovviamente limitante; per questo la soluzione proposta ha caratteristiche di **scalabilità** verso turbine a gas di taglia maggiore. In ultima analisi, l'implementazione finale sulla microturbina TURBEC T100 è stata scelta per la possibilità di eseguire futuri test sperimentali su una macchina completa di cui ENEA è dotata, anche se i più limitati spazi disponibili aggiungono complessità realizzative alle possibili soluzioni.

Fissato l'obiettivo, il bruciatore deve dunque essere in grado di conciliare esigenze tra loro contrastanti, passando da un combustibile composto da solo gas naturale ad un combustibile ad alto tenore di idrogeno. Nel primo caso deve consentire la combustione completa del gas naturale, mentre nel secondo deve evitare il ritorno di fiamma nel sistema di alimentazione, garantendo in entrambi i casi basse emissioni di ossidi di azoto e monossido di carbonio.

Sulla base delle considerazioni sopra esposte e dopo aver testato numerose possibilità realizzative, è stata ideata una strategia costruttiva e di funzionamento del tutto originale. Essa prevede la presenza di **due bruciatori indipendenti, swirlati premiscelati magri, con stabilizzazione aerodinamica della fiamma**: uno centrale per miscele con bassi tenori di idrogeno ed uno coassiale (sistema di bruciatori a corona) per miscele con alti tenori di idrogeno. In questo modo è possibile limitare gli NO_x attraverso l'adozione di un opportuno rapporto di equivalenza (strategia DLE), con il quale è possibile controllare la temperatura adiabatica di fiamma. Per evitare il rischio di flashback, soprattutto per il bruciatore che interviene nel caso di miscele ad elevati tenori di idrogeno, esso è stato dimensionato in modo da garantire velocità di efflusso sufficientemente alte e bassi tempi di residenza nel miscelatore. Per garantire queste caratteristiche, i bruciatori per miscele ad alto contenuto di H₂ sono stati disegnati **ibridizzando** una tipica **configurazione swirlata** (che porta ad una stabilizzazione aerodinamica della fiamma per mezzo di una ricircolazione centrale, o **vortex breakdown**) con il concetto del **micro-mescolamento**. Il bruciatore che interviene nel caso di gas naturale o per bassi tenori di idrogeno, invece, risente meno di questa problematica e può quindi essere dimensionato per velocità di efflusso più basse, che consentano la combustione completa della miscela a maggior contenuto di gas naturale.

Considerando che l'intero sistema dovrà avere degli ingombri tali da adattarsi alla microturbina TURBEC T100, si è pensato di adottare una configurazione che prevede un unico **bruciatore centrale da 330 kW_t** per le miscele a basso contenuto di idrogeno ed un sistema a corona di **dieci bruciatori da 33 kW_t** per le miscele a maggior contenuto di idrogeno (potenzialmente fino al 100% di H₂).

Il dimensionamento e l'ottimizzazione dei bruciatori è stato effettuato con l'ausilio di simulazioni CFD di tipo RANS, eseguite con il software Ansys-Fluent 2019R1, focalizzando l'attenzione sul mescolamento (simulazioni non reattive). La griglia di calcolo è di tipo tetraedrico, infittita per cogliere al meglio i dettagli della geometria, per un totale di circa cinque milioni di celle computazionali. Il modello di turbolenza adottato è il "k-ε realizable". Le simulazioni sono state effettuate alla pressione di esercizio di 4.5 bar. Il bruciatore centrale è stato studiato per miscele dallo 0 al 50 % di idrogeno, mentre quello rappresentativo dei 10 laterali, dal 50% al 100 % di idrogeno. L'obiettivo è quello di realizzare un bruciatore che renda ottimale il mescolamento dei reagenti, riduca il rischio di flashback e sia caratterizzato da una bassa emissione di NO_x. Sono state effettuate numerose simulazioni CFD prima di arrivare alla configurazione finale (descritte nel report).

Nella configurazione finale, entrambe le tipologie di bruciatori sono costituite da **18 canali inclinati in cui scorre l'aria**. Il **combustibile** viene iniettato in ciascun canale in **cross-flow in due punti opposti**: ciò facilita la penetrazione del combustibile per una buona parte del flusso d'aria, anche se comunque non riesce a diffondere per tutta l'altezza del canale. La doppia iniezione implica due plenum per il combustibile: l'ingresso principale del combustibile alimenta il plenum inferiore, che è poi collegato a quello superiore attraverso dei canali ricavati tra i condotti dell'aria. Il numero elevato di canali e di fori di iniezione serve ad accelerare il miscelamento, attraverso l'iniezione del combustibile in maniera distribuita. Combustibile e comburente completano la miscelazione all'interno di una **camera di premiscelazione** di lunghezza assiale sufficiente ad uniformare la concentrazione del combustibile.

Elemento essenziale è la presenza di un **sistema attivo per la selezione del bruciatore e per la parzializzazione dell'aria** comburente tra il plenum aria del bruciatore centrale e quello del sistema di bruciatori a corona: esso consiste in una superficie cilindrica forata, che ruotata apre o chiude i fori di passaggio ricavati nei plenum, o ne riduce l'area di efflusso. Il sistema consente il controllo dell'aria che alimenta uno dei due bruciatori escludendo al contempo l'altro, a secondo della composizione del combustibile. Per ognuno dei due bruciatori il sistema presenta l'ulteriore vantaggio di permettere anche la parzializzazione dell'aria, in modo da consentire di lavorare a rapporti di equivalenza ottimali al variare del carico e della composizione del combustibile.

Sono state effettuate anche alcune simulazioni reattive preliminari, con lo scopo di evidenziare le caratteristiche macroscopiche della fiamma, come ad esempio l'estensione e la conformazione del fronte di fiamma.

È stata anche avviata la procedura di affidamento della realizzazione dei prototipi dei bruciatori, che saranno testati nel laboratorio di diagnostica della combustione del Laboratorio IPSE in ENEA Casaccia, a partire dalla successiva LA3.7. Per la realizzazione del primo prototipo del bruciatore tipo del sistema a corona, esso sarà anche equipaggiato di un **secondo sistema di iniezione del combustibile, indipendente** e di tipo **diffusivo**, in prossimità della sezione di uscita della camera di premiscelazione.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state pianificate né occorse consulenze all'interno della LA3.6.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta:

1. 'Gas Turbine Combustion Technologies for Hydrogen Blends', D. Cecere, E. Giacomazzi, A. Di Nardo, G. Calchetti, *Energies*, 16(19):6829 (1-29), 2023, DOI: 10.3390/en16196829. IF = 3.2

10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione legati alle attività:

1. Congresso EUROPEAN CONFERENCE ON NONLINEAR OPTICAL SPECTROSCOPY, Kiruna (Svezia), M. Marrocco, 25-29/98/2022.
2. European Turbine Network, Berlino (Germania), E. Giacomazzi, 11-13/10/2022.