



Ricerca di Sistema elettrico

Exhaust Gas Recirculation: indagine sullo stato dell'arte della combustione in impianti turbogas mediante ricerca di letteratura

A. Di Nardo, G. Calchetti, G. Messina

EXHAUST GAS RECIRCULATION: INDAGINE SULLO STATO DELL'ARTE DELLA COMBUSTIONE IN IMPIANTI
TURBOGAS MEDIANTE RICERCA DI LETTERATURA

A. Di Nardo, G. Calchetti, G. Messina (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'uso di combustibili fossili

Obiettivo: Studi sulla combustione in cicli turbogas EGR

Responsabile del Progetto: F.R. Picchia, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 INFLUENZA DELLA CONCENTRAZIONE DI CO ₂ NEI FUMI SULLA CATTURA.....	5
4 LA COMBUSTIONE IN PRESENZA DI EGR.....	8
5 SIMULAZIONI.....	10
6 CONCLUSIONI.....	12
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	17

Sommario

Il processo di separazione della CO₂ dai fumi di combustione in impianti di potenza comporta inevitabilmente penalizzazioni di efficienza. L'aumento della concentrazione di CO₂ nei fumi, ottenibile per esempio con il ricircolo dei gas combusti, implica una riduzione del volume di gas da trattare, con la conseguente riduzione delle dimensioni delle apparecchiature necessarie al trattamento e richiede un minore dispendio energetico. Ciò però comporta una diminuzione della concentrazione di ossigeno al bruciatore, con importanti conseguenze sulla qualità della combustione per quanto riguarda la stabilità di combustione, l'efficienza e le emissioni. Nel presente rapporto vengono riportati i risultati dell'indagine bibliografica condotta sulle tematiche su esposte e delle simulazioni numeriche effettuate.

1 Introduzione

La cattura ed il sequestro della CO₂ emessa dagli impianti per la produzione di energia alimentati a combustibili fossili può essere condotta principalmente in tre modi:

- Post-combustione: la separazione della CO₂ dai gas combusti si effettua attraverso l'uso di membrane o sorbenti.
- Pre-combustione: il carbonio viene rimosso dal combustibile attraverso una sequenza di reforming, water-gas-shift e separazione.
- Combustione oxy-fuel: il combustibile viene bruciato in condizioni circa stechiometriche in presenza di una miscela di ossigeno puro e gas esausti riciclati, allo scopo di limitare le temperature che si avrebbero utilizzando solo ossigeno. I fumi in questo modo sono composti essenzialmente da CO₂ e H₂O, facilmente separabile per condensazione, ottenendo quindi una cattura praticamente totale.

L'utilizzo di turbine a gas negli impianti di potenza è in continua crescita e diverse tipologie di cicli termodinamici sono stati messi a punto per sfruttare il vantaggio termodinamico derivante dalle caratteristiche proprie di tale tipologia di macchina. Il limite tecnologico è dettato dalle temperature massime a cui possono essere sottoposti i materiali e comporta pertanto l'impiego di grossi eccessi d'aria che limitano la concentrazione di CO₂ (3.3 vol% dry) nei gas esausti del combustore. Ciò rappresenta un grosso problema per i sistemi di cattura basati per esempio sulle ammine che si trovano a dover trattare enormi volumi di gas. In ogni caso il processo di separazione della CO₂ va integrato in impianti combinati dato che comporta penalizzazioni di efficienza. È importante pertanto ridurre al minimo i costi energetici del processo di separazione, che diminuiscono all'aumentare della concentrazione del gas da separare nella miscela. L'aumento della concentrazione di CO₂ riduce il volume di gas da trattare e di conseguenza le dimensioni delle apparecchiature necessarie al trattamento.

I cicli turbogas EGR (Exhaust Gas Recirculation) possono rappresentare una soluzione brillante, in grado di accoppiare la flessibilità di esercizio tipica delle turbine a gas, con l'implementazione efficace ed efficiente delle tecnologie CC(S). In estrema sintesi il principio fondante di questa tipologia di cicli consiste nel riciclare una parte degli esausti della turbina a gas fino ad ottenere un fluido di lavoro composto da aria con alti tenori di CO₂. La maggior concentrazione di CO₂ negli esausti rende la cattura più efficiente, richiede facilities dedicate meno voluminose e, non ultimo, può potenzialmente contribuire alla riduzione degli NO_x sia a causa della minor concentrazione di ossigeno, sia per la favorevole distribuzione della temperatura all'interno del combustore.

L'adozione della tecnica EGR riduce la portata in ingresso alla turbina, visto che a parità di temperatura di combustione è necessaria una minore portata di fumi già caldi per sostituire una porzione di aria in condizioni ambiente. Si può calcolare che con un EGR del 50%, a causa del più elevato peso molecolare della CO₂ e quindi della maggiore densità, la portata in massa si riduce del 1.04% in peso e del 1.61% in volume. Se ne può quindi dedurre che queste variazioni possono essere probabilmente gestite da turbina e compressore senza modifiche. Di contro, la minor concentrazione di ossigeno nella miscela comburente può condurre all'incremento degli incombusti e, di conseguenza, alla necessità di modificare la geometria del combustore finalizzandola all'esercizio in condizioni EGR. Un altro aspetto da considerare è che per un ciclo combinato che utilizza un ciclo Rankine a valle di un ciclo Bryton, è vitale che la temperatura di scarico dei fumi dalla turbina a gas si sufficientemente alta da consentire la produzione di vapore. È necessario pertanto lavorare con più alti rapporti di compressione.

2 Influenza della concentrazione di CO₂ nei fumi sulla cattura

Le tecnologie impiegate per la separazione della CO₂ differiscono in base ai livelli di pressione, temperatura, contenuto di CO₂, impurità e gas inerti. Pertanto una data tecnologia può essere più adatta di altre, in funzione delle condizioni operative. La tecnologia basata sull'assorbimento chimico da parte di ammine, può essere utilizzata anche con pressioni parziali di CO₂ relativamente basse nei gas esausti. Il principale svantaggio dell'assorbimento chimico è legato alle elevate quantità di energia necessaria alla rigenerazione del solvente ed alla estrazione della CO₂, a problemi di corrosione e degrado del solvente. Si

riportano di seguito alcune considerazioni tratte dal lavoro di Li et al. [1]. È stato dimostrato come l'energia richiesta dal reboiler per esempio sia strettamente dipendente dalla concentrazione di CO₂ nei gas esausti. Dalla figura 1 si vede come per un incremento di concentrazione dall' 1 al 6% molare, si abbia una riduzione da 7.5 a 3.76 MJ/kgCO₂. Ciò si spiega con l'incremento delle forze spingenti il processo che favoriscono le reazioni di cattura. Oltre questo range l'energia specifica richiesta diminuisce ma più lentamente. Il leggero incremento nella parte terminale si giustifica con il peggioramento delle performances causato dall'incremento di temperatura nell'assorbitore (fino a 90°C).

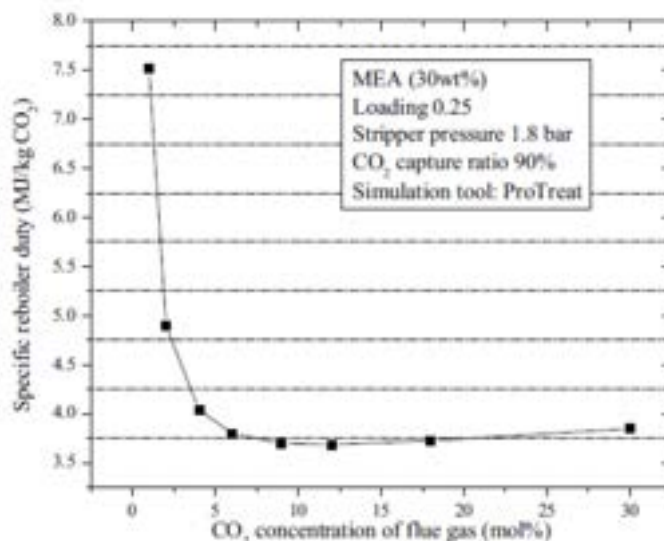


Fig. 1. Energia richiesta dal reboiler [1].

In figura 2 è riportato l'andamento della concentrazione di CO₂ nei gas esausti in funzione del rapporto EGR. Rispetto ad un ciclo senza EGR, un rapporto di ricircolo del 55% determina un incremento della concentrazione dal 3.8% molare al 8.7% molare, riducendo del 56.2% la portata dei fumi da trattare. Di conseguenza l'energia termica totale del reboiler si riduce del 60%, così come le dimensioni del sistema di assorbimento. Secondo quanto riportato da Røkke [2] un EGR del 50% può ridurre l'indice CAPEX del 21.1%. La figura 3 mostra invece la concentrazione di O₂ all'uscita del combustore. Come si nota la concentrazione di CO₂ incrementa mentre la concentrazione di O₂ decresce all'aumentare dell'EGR. Per questa ragione, per EGR superiori al 55% è necessario arricchire di ossigeno l'aria di combustione. In questa maniera l'EGR può essere incrementato ulteriormente. La figura 4 mostra la concentrazione di CO₂ nei gas esausti e la corrispondente energia richiesta per l'assorbimento chimico, fino al 75% di EGR. Come è evidente, oltre il 65% la concentrazione di CO₂ sale al 12% molare e l'energia necessaria comincia ad aumentare. L'efficienza elettrica e la penalizzazione di rendimento causata dalla cattura della CO₂ sono riportati in figura 5. È chiaro come con l'aumento dell'EGR l'efficienza aumenti mentre la perdita di rendimento si riduca, visto che il costo energetico dell'assorbimento diminuisce all'aumentare della concentrazione di CO₂, come già detto. Il massimo dell'efficienza si ottiene per un rapporto di ricircolo intorno al 50%. Oltre tale valore per mantenere efficiente il processo di combustione occorre arricchire di ossigeno l'aria comburente e l'efficienza si abbatte rapidamente a causa dell'energia richiesta alla produzione dell'ossigeno. Per EGR superiori al 65% la penalizzazione di rendimento aumenta a causa dell'incremento dell'energia richiesta al reboiler.

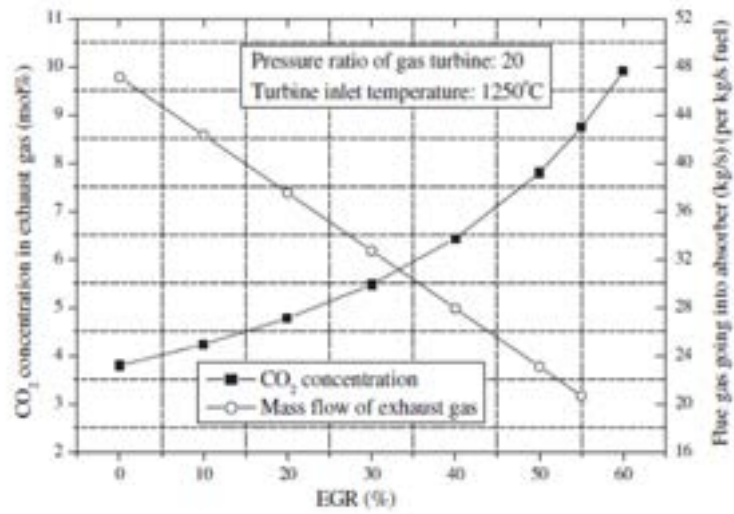


Fig. 2. Concentrazione di CO₂ al variare del fattore EGR [1].

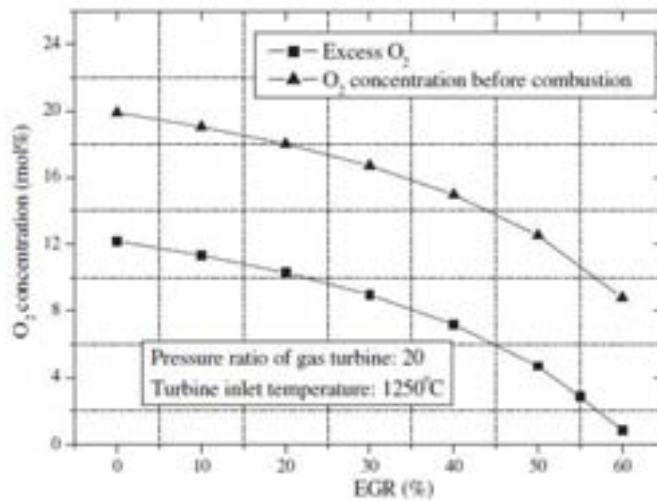


Fig. 3. Concentrazione di O₂ al variare del fattore EGR [1].

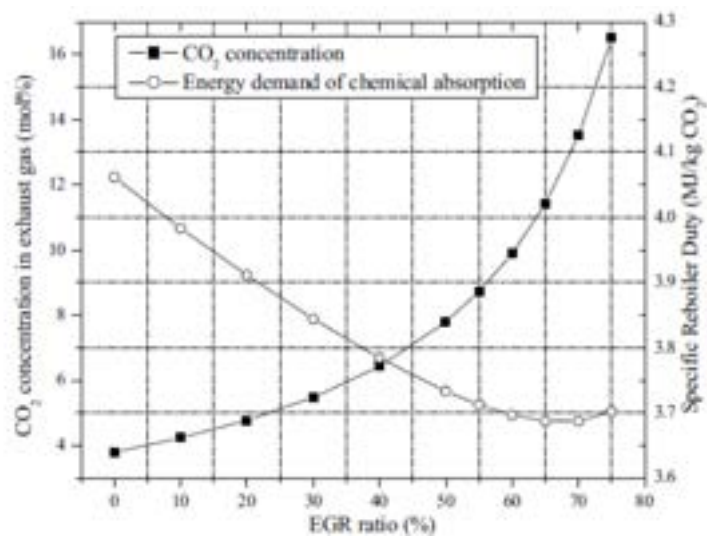


Fig. 4. Concentrazione di CO₂ e energia richiesta dal reboiler al variare del fattore EGR [1].

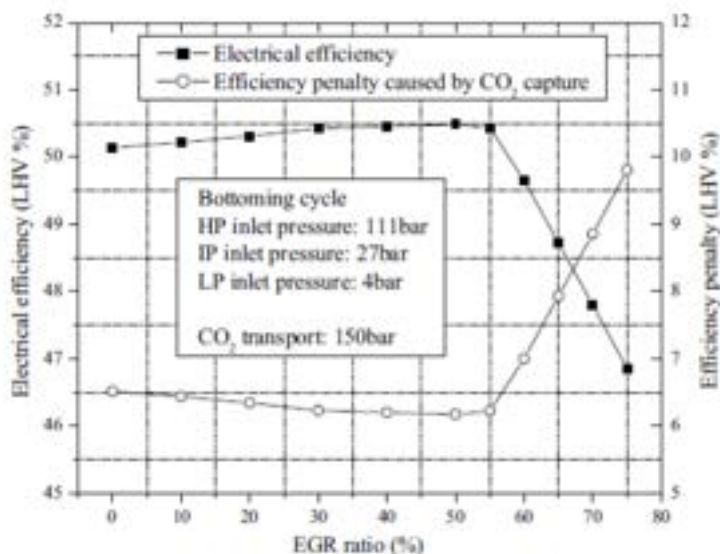


Fig. 5. Efficienza elettrica e penalizzazione del rendimento al variare del fattore EGR [1].

Akram et al. [3] hanno condotto una campagna sperimentale su di un impianto pilota, costituito da una microturbina Turbec T100 di 100 kWe, integrato con un impianto di cattura in post-combustione della capacità di una tonnellata al giorno. La microturbina produce gas esausti con solo 1.5% di CO₂. Pertanto, al fine di simulare l'EGR in turbine a gas industriali che producano gas di scarico che ne contengano circa il 4-5%, hanno utilizzato un serbatoio di stoccaggio di anidride carbonica per arricchire il flusso di gas esausti provenienti dalla turbina. L'impatto delle diverse concentrazioni di CO₂ sul processo di cattura è stato valutato sperimentalmente. È stato osservato che la penalizzazione energetica causata dal processo di cattura si riduce considerevolmente per alte concentrazioni di CO₂. L'EGR ha un impatto negativo sulla potenza prodotta dalla turbina a gas, ma un impatto positivo sulla potenza della turbina a vapore. Partendo dal caso base in cui la concentrazione di CO₂ si aggira intorno al 4.5%, il consumo di energia si abbatte del 7.5% per ogni incremento unitario nella concentrazione di CO₂. Viene indicato infine un rapporto di riciclo del 40% come ottimale al fine di evitare l'iniezione di ossigeno per sostenere la combustione.

3 La combustione in presenza di EGR

Le problematiche associate alla combustione EGR riguardano l'operabilità del sistema, le emissioni (NO_x, CO), lo scambio di calore e le possibili penalizzazioni di efficienza associate al completamento della combustione. Purtroppo pochi dati esistono sulla combustione EGR, in particolare alle temperature e pressioni tipiche delle turbine a gas. I dati esistenti sono limitati a esperimenti effettuati a pressioni atmosferiche e temperatura ambiente, a fiamme a diffusione (ad esempio bruciatori di caldaia) ed a modelli e simulazioni. I bruciatori sono generalmente progettati per funzionare con aria contenente 21% di ossigeno, per cui riciclando i gas di scarico la concentrazione globale di ossigeno all'ingresso del combustore diminuisce considerevolmente. Con aria viziata sorgono gravi problemi per quanto riguarda la stabilità di combustione, l'efficienza e le emissioni, in particolare nei combustori per turbine a gas, che sono caratterizzati da alte velocità e basso tempo di permanenza. Diversi studi in passato hanno esaminato alcune delle principali criticità, come il rendimento di combustione e l'operabilità. Ad esempio Bolland [4] raccomanda livelli EGR inferiori al 40%. Infatti per mantenere il requisito di un contenuto minimo di ossigeno (MOC) nell'aria di combustione intorno 16-18%, occorre un EGR massimo pari al 25% per una turbina F-class. Un altro problema è la stabilità della fiamma e il blowout, specialmente nei sistemi premiscelati magri. In uno studio di Rokke e Hustad [5], eseguito a pressione atmosferica su un bruciatore per turbogas sia in condizioni diffusive che premiscelate, è stato dimostrato che una diminuzione della concentrazione di O₂ senza modifiche al sistema può causare il blowout della fiamma. Essi hanno inoltre rilevato che i sistemi di combustione che funzionano con fiamme a diffusione sono meno sensibili alle variazioni di composizione del comburente. Gli effetti di pressione sono molto evidenti e importanti, come

evidenziato da Elkady et al. [6], e sono stati generalmente omessi nella maggior parte degli studi precedenti. Essi hanno osservato come i limiti di stabilità della fiamma si restringano nel caso EGR, rendendosi necessaria l'addizione di un pilota. Bolland e Saether [7] hanno verificato che in un tipico combustore per turbina a gas l'aria di combustione deve avere un minimo del 16-18% di concentrazione di ossigeno per ridurre i rischi di stabilità. Questo valore come si vede ritorna molto spesso ed è ampiamente ritenuto essere un valore limite, che consente però di avere fumi con al massimo l'8% di CO₂ in volume.

Quantità significative di CO possono essere prodotte a causa della mancanza di ossigeno per completare la reazione di ossidazione di CO₂ in fiamme ricche o a causa della dissociazione della CO₂ in fiamme stechiometriche o moderatamente magre, o infine a causa delle basse temperature di combustione e basse velocità di reazione [8, 9] in fiamme molto magre. Elkady et al. [6] hanno studiato il comportamento di una camera di combustione Dry Low NO_x (DLN), con il 35% di EGR a 10 bar. I risultati hanno mostrato che una bassa concentrazione di ossigeno può ridurre il rate di reazione, favorisce la distribuzione delle reazioni chimiche di combustione su una vasta regione riducendo i picchi di temperatura della fiamma, sfavorendo l'ossidazione del CO in CO₂; al contrario, la riduzione dei livelli di ossigeno combinato con l'incremento della CO₂ porta a cambiamenti nel processo di rilascio di calore attraverso la dissociazione della CO₂ stessa. Ditaranto et al. [10] hanno studiato sperimentalmente l'effetto della riduzione di O₂ in un bruciatore su scala da laboratorio, mostrando che anche se la fiamma può essere sostenuta fino al 14% molare, i livelli di idrocarburi incombusti e CO divengono eccessivamente alti quando la concentrazione di O₂ raggiunge già il 16%, a cui corrisponde un EGR del 40%. Valori superiori di EGR pertanto sono compatibili solo se si pensa ad arricchimenti in ossigeno del comburente o a diverse strategie di distribuzione dello stesso come suggerito da Li [11]. Nello studiare l'oxy-combustion. Amato et al. [12] hanno calcolato che le concentrazioni di CO all'equilibrio (crescenti con la temperatura di fiamma e quindi con la concentrazione di ossigeno) sono in ogni caso più elevate che nel caso di combustione ad aria, a causa delle più elevate concentrazioni di CO₂, crescendo ulteriormente se si rimuove l'ipotesi di equilibrio e si fissa il tempo di residenza, a causa della ridotta velocità di conversione. Hanno inoltre rilevato come l'incremento della pressione operativa, accelerando invece le reazioni chimiche, sia vantaggioso nella riduzione dei valori di CO.

È noto che la bassa concentrazione di ossigeno e le basse temperature di fiamma sono vantaggiosi rispetto alla formazione di NO_x, ed entrambi si riducono con l'aumentare del rapporto EGR. Inoltre, il ricircolo di specie minori come NO e CO nella zona di combustione tende a ridurre la concentrazione attraverso, ad esempio, il meccanismo di reburning. Nello studio di Elkady et al. [6] le emissioni di NO_x sono diminuite di oltre il 50% con il 35% di EGR. Wilkes and Gerhold [13, 14] in condizioni diffuse con EGR e senza estrazione di acqua allo scarico hanno mostrato una riduzione sostanziale delle concentrazioni NO_x. Senza alcuna modifica del sistema di combustione, una riduzione di circa il 50% è stata raggiunta con il 20% di EGR. Gupta et al. [15], studiando l'effetto della concentrazione di ossigeno su una fiamma a propano diffusiva, hanno concluso che la concentrazione di NO_x è molto più bassa con aria preriscaldata a bassa concentrazione di O₂ rispetto ad un normale caso ad aria. Hazard [16] ha invece trovato che una riduzione di NO_x del 70-80% può essere ottenuta facendo ricircolare fino al 22% di gas di scarico raffreddati, tutto ciò con un effetto trascurabile sulle emissioni di HC e CO. Arai [17] riporta che con la combustione EGR le emissioni di NO_x sono ridotte a causa di una reazione più lenta della miscela combustibile ed una temperatura di fiamma inferiore. Egli ha mostrato però che il ritardo di accensione del combustibile incrementa con le basse concentrazioni di ossigeno. Rokke e Hustad [5] hanno studiato l'effetto dell'aggiunta di N₂, CO₂ e O₂ nel flusso di combustibile e aria a pressione atmosferica. I risultati mostrano che l'aggiunta di N₂ e CO₂ diminuisce le emissioni di NO_x in entrambe le modalità, diffusiva e premiscelata, laddove l'addizione di O₂ incrementa le emissioni solo in modalità diffusiva.

Un vantaggio significativo della combustione EGR in combustori DLN potrebbe risiedere nella soppressione delle dinamiche di combustione. Kobayashi et al. [18] hanno studiato l'effetto della diluizione in CO₂ su fiamme premiscelate turbolente. Essi hanno concluso che l'EGR ha effetto sul profilo della regione di

rilascio di calore, rivelandosi efficace nel contenimento delle oscillazioni. Infatti si viene a formare una zona di reazione ampiamente distribuita, con velocità di reazione relativamente lente, il che porta alla soppressione delle oscillazioni. Anche Elkady [6] et al. hanno notato una riduzione nelle oscillazioni di pressione, dimostrando come la combustione EGR sia favorevole alla diminuzione delle instabilità termo-acustiche.

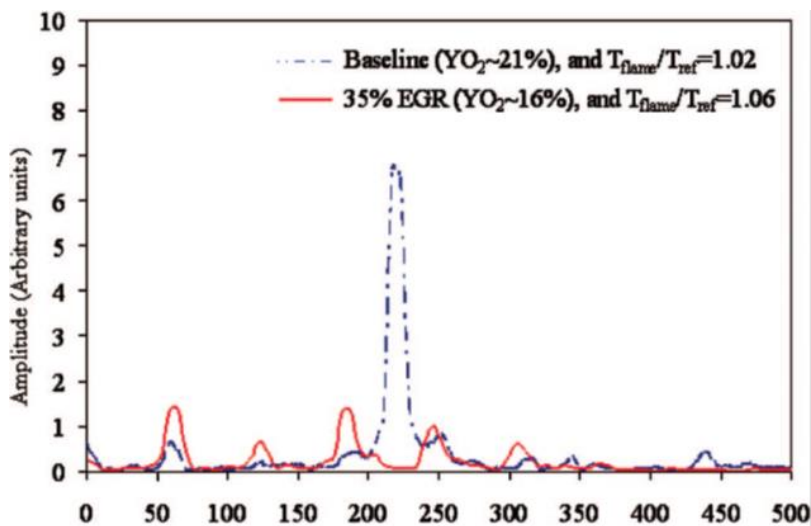


Fig. 6. Oscillazioni di pressione [6].

Anche il combustore della GT26 dell'Alstom è stato testato full-scale in condizioni di ricircolo dei gas combusti [19, 20]. La macchina presenta in realtà due combustori disposti in sequenza, testati separatamente. Il primo, denominato EV, è un bruciatore premiscelato, il secondo, denominato SEV, è un bruciatore diffusivo. Nel primo caso si è osservato che la fiamma rimane ben confinata nella camera di combustione, apparendo più stirata e meno luminosa, ma stabile per tutte le condizioni esaminate. Gli ossidi di azoto si riducono, con contemporaneo incremento degli ossidi di carbonio, i quali restano comunque in linea con i valori previsti all'equilibrio, ma si riducono con l'incremento della pressione e della temperatura di ingresso. Nel secondo caso, oltre ad una riduzione degli NO_x , dovuta ad una riduzione della temperatura di fiamma ed allo spostamento più a valle della stessa che comporta una riduzione del tempo di residenza, si è registrata una diminuzione del gradiente di formazione dei NO_x con la temperatura. Ciò comporta anche una maggiore flessibilità operativa. Ancora una volta, la combinazione di ricircolo, bassa temperatura in ingresso e bassa temperatura di fiamma, ha portato all'incremento degli ossidi di carbonio, anche di diversi ordini di grandezza.

4 Simulazioni

A scopo esplorativo, sono state condotte delle simulazioni CFD bidimensionali RANS per un bruciatore diffusivo dotato di swirl, con l'obiettivo di valutare fino a che punto è possibile spingersi con la diluizione dell'aria in sola CO_2 . La pressione operativa è stata fissata a 40 bar, la temperatura di ingresso a circa 450 °C, il comburente è CO_2 /aria ed il rapporto di equivalenza calcolato sull'ossigeno è pari a 0.9. I modelli di turbolenza e combustione sono il k- ϵ e l'Eddy Dissipation Concept, rispettivamente, mentre il meccanismo cinetico è un semplice 2 steps. Fissate le portate, le dimensioni degli ugelli e della camera di combustione sono state variate fino a non avere lo spegnimento della fiamma. A conferma di quanto detto è emerso che sono necessari volumi maggiori e velocità inferiori rispetto al caso ad aria per consentire un sufficiente tempo di residenza (fig. 7). Se un combustore progettato per lavorare in aria è caratterizzato da una densità di potenza intorno a 15 MW/(m³bar), nel caso per esempio in cui si voglia ottenere una concentrazione nei fumi di CO_2 intorno al 42% molare (13% O_2 , 40% CO_2 nel comburente), la diluizione del comburente è tale che la densità di potenza si deve ridurre di circa un fattore 3. Resta però invariata già per una concentrazione del 29% di CO_2 nei fumi (16% O_2 , 25% CO_2 nel comburente).

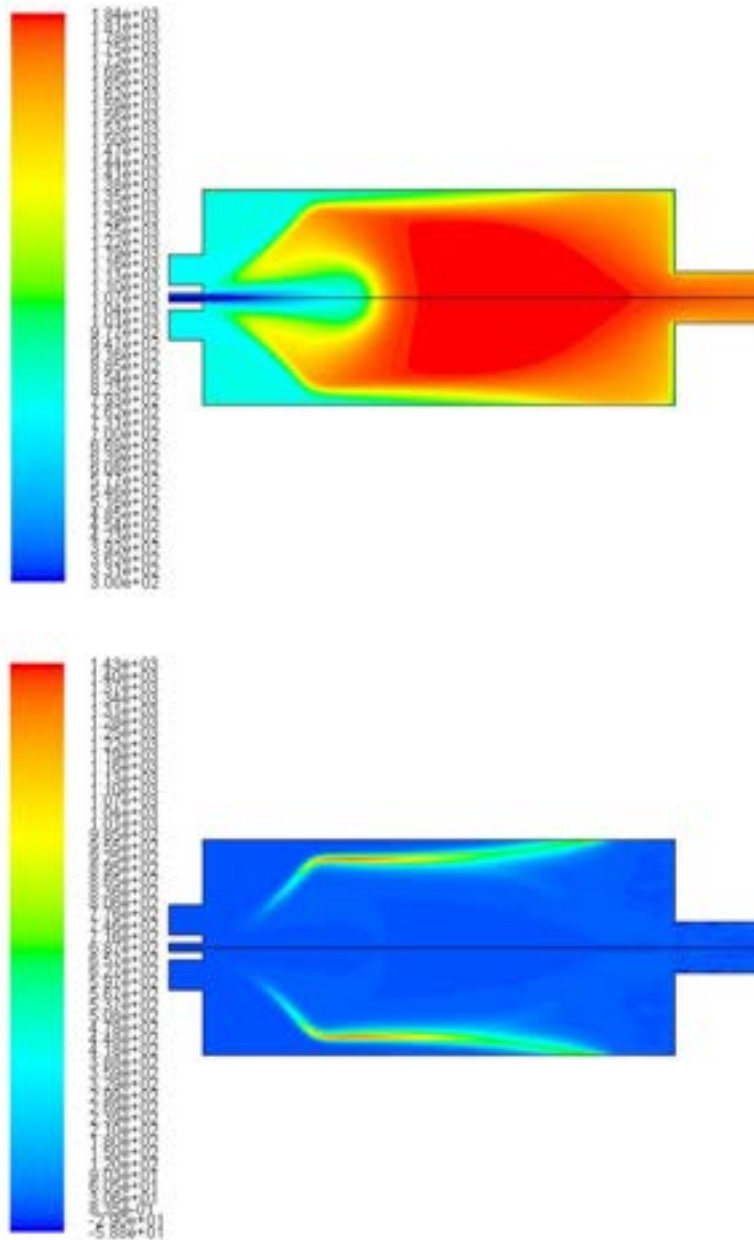


Fig. 7. Temperatura (K) e rilascio di calore (W).

È chiaro che si tratta di situazioni limite dato che anche il raggiungimento di concentrazioni molto inferiori comporterebbe comunque un vantaggio economico considerevole sulla cattura. Come è noto dalla letteratura le fiamme diffuse hanno il vantaggio di essere meno soggette ad instabilità termo-acustiche, ma comportano temperature di picco più elevate, che richiedono quindi di lavorare necessariamente in condizioni di buona diluizione in CO_2 rispetto al caso premiscelato. Peraltro il maggiore volume necessario ed il conseguente maggiore ingombro del combustore, non sembrano essere un punto a sfavore così determinante per una macchina installata a terra.

Se l'opzione che prevede un consistente arricchimento in CO_2 è da approfondire e comporta necessariamente la riprogettazione dei bruciatori e delle camere di combustione pensati per lavorare in aria, la tecnica EGR può trovare invece applicazione pressoché immediata, come risulta dalla letteratura. Per questo sono state effettuate delle simulazioni 3D RANS sul bruciatore per turbogas disponibile presso i nostri laboratori in condizioni di ricircolo dei gas combusti fino al 65%, confrontando i risultati con il caso a sola aria e a CO_2 pura e aria a pari contenuto di ossigeno. Il combustore presenta un pilota diffusivo

alimentato da sei iniettori, più una parte premiscelata swirlata, per circa 300 kWt. Nella parte terminale della camera di combustione sono presenti fori di diluizione per raffreddare i gas combusti. I modelli di turbolenza e combustione sono il k-ε e l'Eddy Dissipation Concept, rispettivamente, con un meccanismo cinetico a 17 specie e 46 reazioni. Le condizioni di prova sono:

Condizioni al contorno.

Caso	Aria	EGR 65%	Aria+CO ₂
Pressione	3.84 bar	3.84 bar	3.84 bar
Temperatura aria	600 °C	600 °C	600 °C
Portata aria	0.808 kg/s	0.813 kg/s	0.813 kg/s
Portata aria liner	0.573 kg/s	0.573 kg/s	0.573 kg/s
Portata aria premix	0.223 kg/s	0.229 kg/s	0.229 kg/s
Portata aria pilota	0.011 kg/s	0.011 kg/s	0.011 kg/s
Portata combustibile premix	0.0062 kg/s	0.0072 kg/s	0.0072 kg/s
Portata combustibile pilota	0.000696 kg/s	0.0008 kg/s	0.0008 kg/s

Composizioni in massa.

Specie	Combustibile	Comburente Aria	Comburente Aria+EGR 65%	Comburente Aria+CO ₂
O ₂		23.28	16.13	16.13
H ₂ O			3.73	
CO ₂			4.72	32.40
N ₂		76.72	75.42	51.47
CH ₄	1			

In generale si può dire che il flusso premiscelato swirlato crea un vortice toroidale di forma stretta ed allungata che stabilizza la fiamma (fig. 8). È evidente inoltre l'azione dei getti ortogonali che raffreddano i gas prima dell'immissione in turbina. La premiscelazione di metano ed aria è abbastanza uniforme come si vede dalla figura 9. La differenza sostanziale tra i tre casi sta nell'assenza dei picchi di temperatura (fig. 10) del pilota nel caso con EGR e Aria+CO₂, che comporta l'abbattimento delle emissioni di NO_x, come già discusso. In più si nota dalle figure 11 e 12 una maggiore distribuzione delle reazioni chimiche. Di contro aumentano sensibilmente le emissioni di CO, che passano da 218 ppmv@15%O₂, a 422 ppmv@15%O₂ (dry) con EGR e 1055 ppmv@15%O₂ (dry) con Aria+CO₂. Le motivazioni sono state già illustrate in precedenza.

5 Conclusioni

Come risulta dalla discussione precedente, l'incremento della concentrazione di CO₂ nei gas di scarico è certamente auspicabile per il conseguimento di un abbattimento significativo dei costi di cattura. Il vantaggio ottenibile con l'utilizzo della tecnica EGR può essere ancor di più aumentato con la diluizione dell'aria con CO₂ pura proveniente dalla cattura, che consente di ottenere concentrazioni considerevoli di anidride carbonica nei fumi di combustione. D'altro canto c'è da tenere in considerazione le problematiche legate alla combustione in atmosfere a bassa concentrazione di ossigeno: riduzione della velocità di fiamma e del rate di reazione, riduzione della conversione di CO in CO₂, blow-out e stabilità di combustione. Appare quindi evidente la necessità di riprogettare i combustori per turbogas per far fronte alle mutate esigenze e condizioni di funzionamento.

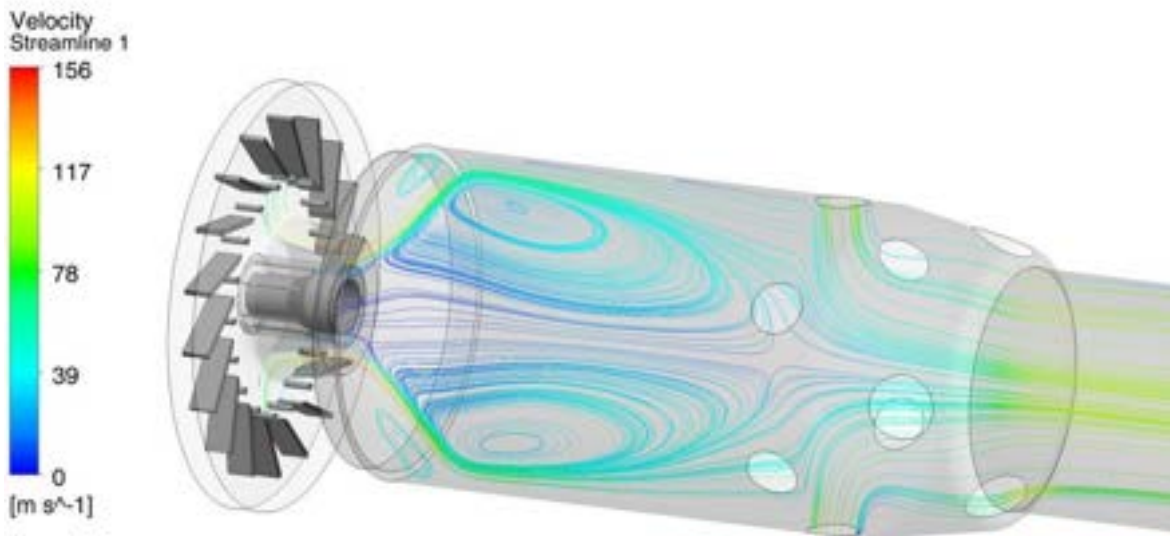


Fig. 8. Linee di flusso bruciatore AGATUR.

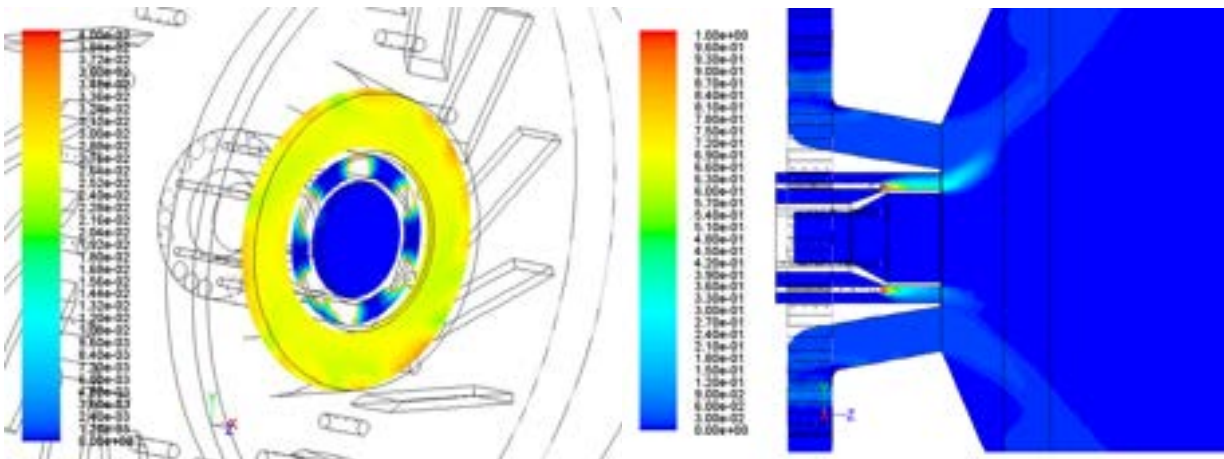


Fig. 9. Distribuzione metano bruciatore AGATUR.

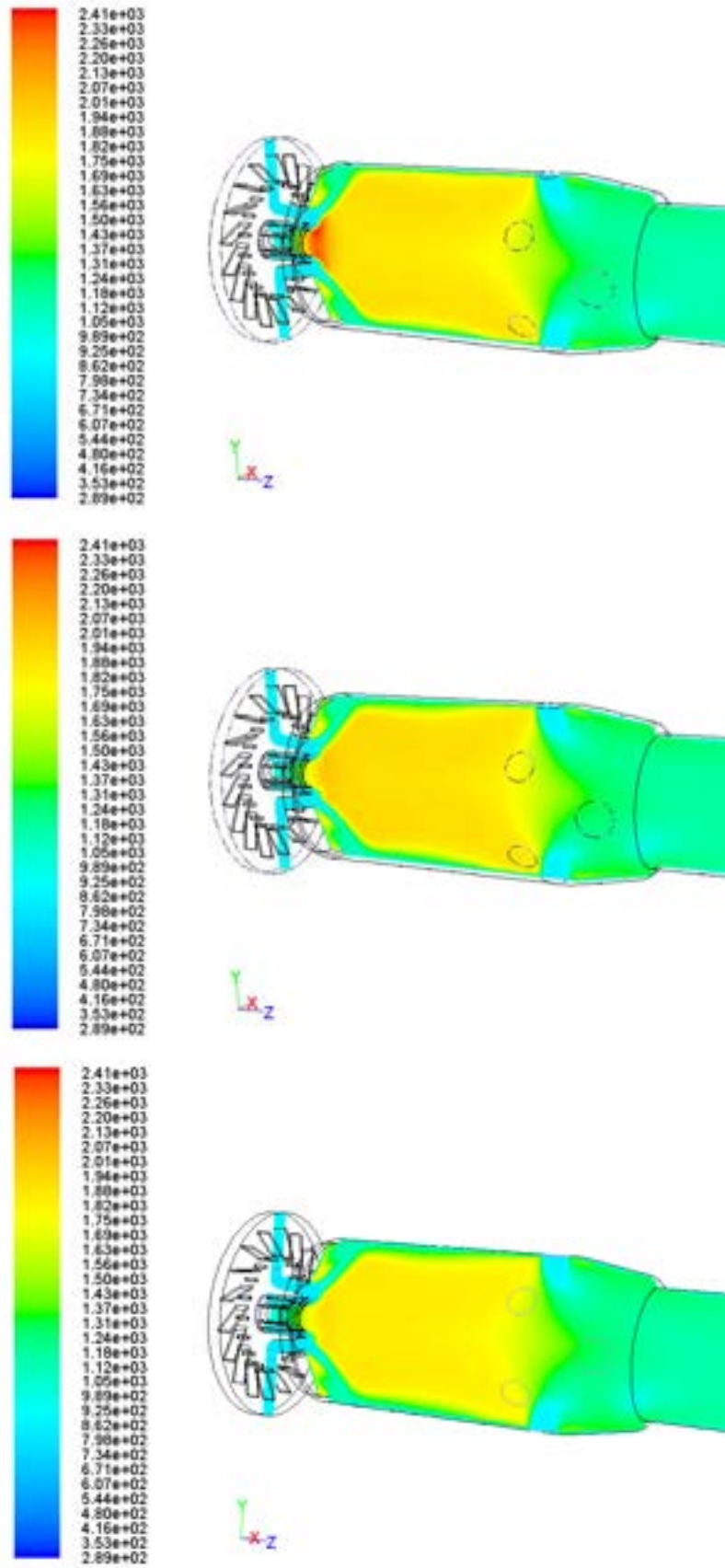


Fig. 10. Temperatura (K) bruciatore AGATUR. Superiore: Aria. Centro: EGR 65 %. Inferiore Aria+CO₂.

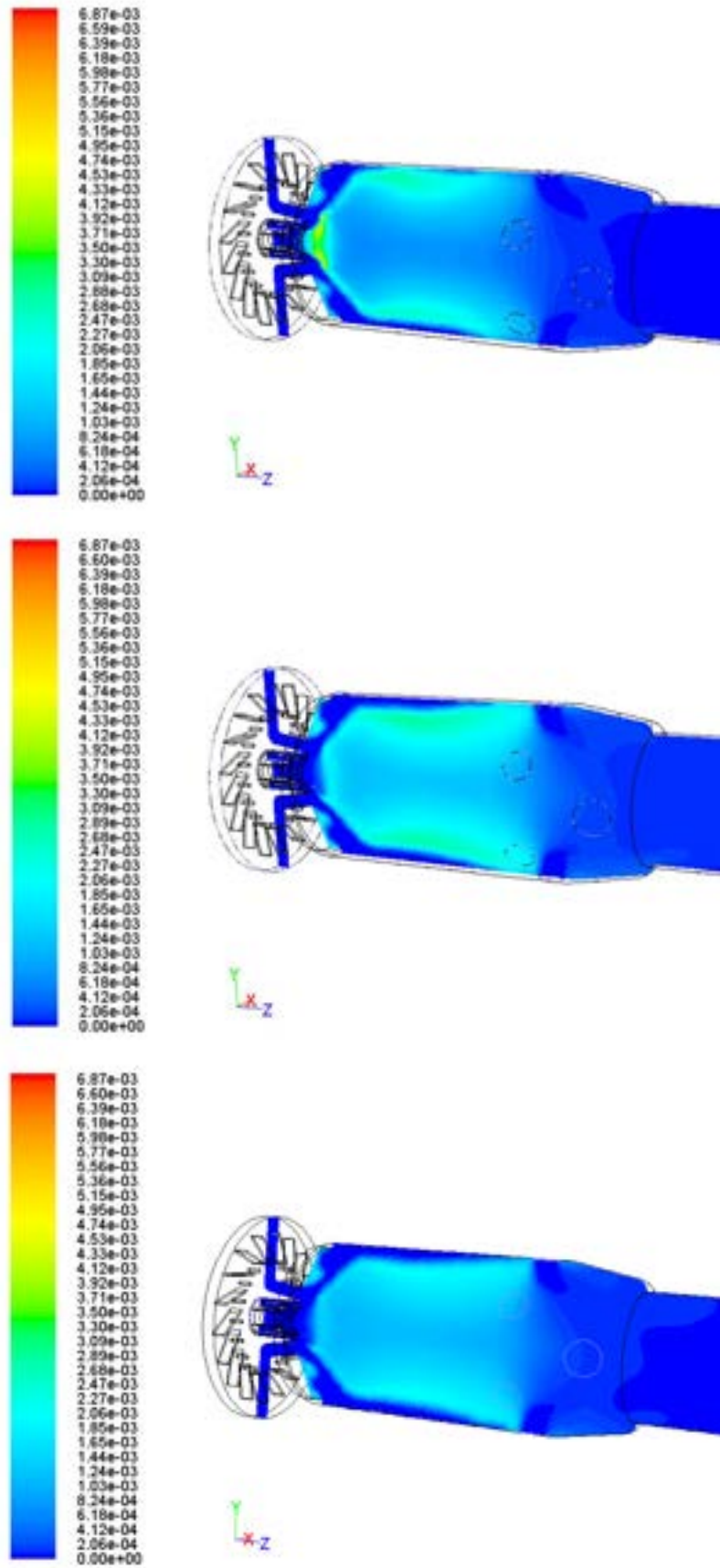


Fig. 11. Frazione di massa di OH bruciatore AGATUR. Superiore: Aria. Centro: EGR 65 %. Inferiore Aria+CO₂.

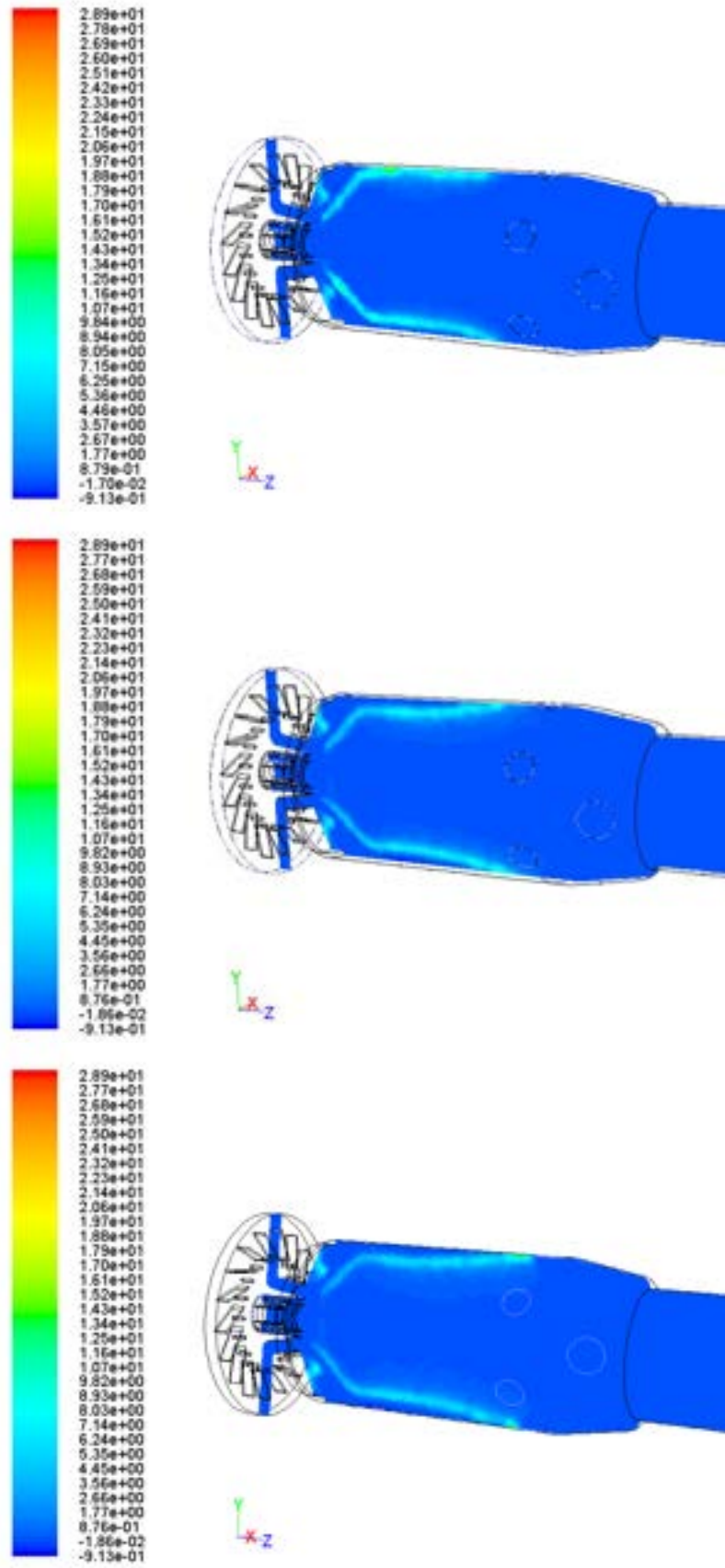


Fig. 12. Rilascio di calore (W) bruciatore AGATUR. Superiore: Aria. Centro: EGR 65 %. Inferiore Aria+CO₂.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] Li, H., Ditaranto, M., Berstad, D., "Technologies for increasing CO₂ concentration in exhaust gas from natural gas-fired power production with post-combustion, amine-based CO₂ capture", *Energy* 36 (2011) pp. 1124-1133.
- [2] Rokke, P.E., Nomad, J. E., "Exhaust gas recirculation in gas turbines for reduction of CO: emissions", *International Journal of thermodynamics*, Vol. 8. No. 4. pp. 167-173. Sept. 2005.
- [3] Akram, M., Pourkashanian, M., Blakey, S., " Influence of gas turbine exhaust CO₂ concentration on the performance of post combustion carbon capture plant", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015*, June 2015, Montreal, Canada.
- [4] Bolland, O., Mathieu, P., "Comparison of two CO₂ removal options in combined cycle power plants", *Energy Conyers". Mgmt Vol. 39, No. 16-18, pp. 1653-1663, 1998.*
- [5] Rokke, P. E., Hustad, J.E., "Exhaust gas recirculation in gas turbines for reduction of CO₂ emissions" *International Journal of thermodynamics*, Vol. 8, No. 4, pp. 167-173, Sept. 2005.
- [6] Elkady, A. M., Evulet, A., Brand, A., Ursin, T. P., Lynghjem, A., "Exhaust gas recirculation in DLN F-Class gas turbines for post-combustion CO₂ capture", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, June 2008, Berlin, Germany.
- [7] Bolland. O., Saether. S., "New concepts for natural gas fired power plants which simplify the recovery of carbon dioxide", *Energy Conversion & Management*, Vol. 33, no. 5-8, pp. 467-475. 1992.
- [8] Correa, S. M., "Carbon monoxide emissions in lean premixed combustion", *Journal of Propulsion and Power*. Vol.8, No. 6, 1992, pp. 1144-1151.
- [9] Lefebvre, A. H., *Gas Turbine Combustion*, 2nd ed., Taylor and Francis, Philadelphia, PA, 1998.
- [10] Ditaranto, M., Hals, J., Bjørge, T., "Investigation on the in-flame NO reburning in turbine exhaust gas", *Proc Combust Inst 2009*;32:2659-2666.
- [11] Li, H., Haugen, G., Ditaranto, M., Berstad, D., Jordal, K., "Impacts of exhaust gas recirculation (EGR) on the natural gas combined cycle integrated with chemical absorption CO₂ capture technology", *Proceedings of the 10th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-10)*, Amsterdam, Netherlands; 2010.
- [12] Amato, A., Hudak, R., Noble, D. R., Scarborough, D., D'Carlo, P. A., Seitzman, J. M., Lieuwen, V., "Methane oxy-combustion for low CO₂ cycles: measurements and modeling of CO and O₂ emissions", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air GT2010 June 14-18 2010*, Glasgow, UK.
- [13] Wilkes, C., Gerhold, B., "NO_x reduction from a gas turbine combustor using exhaust gas recirculation", *American Society of Mechanical Engineers, Joint Power Generation Conference*, Phoenix, Ariz ; United States; 28 Sept.-2 Oct. 1980. 10 pp. 1980.
- [14] Wilkes, C., Gerhold, B., "NO_x reduction in a combined gas-steam power plant", *US patent #4313300*, Feb 1982.
- [15] Gupta, A. K., Bolz, S., Hasegawa, T., "Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission", *Journal of energy resources technology*, Vol 121, NO 3, pp 209-216, 1999.
- [16] Hazard, H.R., "Reduction of NO_x by EGR in a compact combustor" *Journal for Engineering for Power*, pp. 235-239, July 1974
- [17] Arai, M., "Flue gas recirculation for low NO_x combustion system". *IJPGC2000-15073 Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference*, Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000.
- [18] Kobayashi, H., Hagiwara, H., Kaneko, H., Ogami, Y., "Effects of CO₂ dilution on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature", *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 31 I, 2007, Pages 1451-1458.
- [19] Guethe, F., Stankovic, D., Genin, F., Khawar Syed, Winkler, D., "Flue gas recirculation of the alstom sequential gas turbine combustor tested at high pressure", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011 GT2011*, June 6-10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [20] Burdet, A., Lachaux, T., de la Cruz Garcia, M., Dieter, W., "Combustion under flue gas recirculation conditions in a gas turbine lean premix flame", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010 GT2010*, June 14-18, 2010, Glasgow, UK.