



Ricerca di Sistema elettrico

Ossicombustione di polverino di carbone: studio CFD di un combustore sperimentale

Antonio Di Nardo, Giorgio Calchetti

OSSICOMBUSTIONE DI POLVERINO DI CARBONE: STUDIO CFD DI UN COMBUSTORE SPERIMENTALE

Antonio Di Nardo, Giorgio Calchetti (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 L'APPARATO SPERIMENTALE.....	6
3 CONDIZIONI AL CONTORNO E MODELLI NUMERICI.....	8
4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	11
5 CONCLUSIONI.....	15
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	16
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	16

Sommario

L'ossicombustione è una tecnologia relativamente nuova per l'applicazione energetica, che ha ancora bisogno di attività di ricerca per l'ottimizzazione dei dispositivi industriali e la Computational Fluid Dynamics (CFD) è uno degli strumenti indispensabili per la loro progettazione. L'approccio LES (Large Eddy Simulations) è il più indicato per lo studio di queste fenomenologie, sebbene ancora sia estremamente costoso dal punto di vista computazionale. Al fine di ridurre tale costo computazionale di questo tipo di applicazioni, si procede ad effettuare una serie di simulazioni preliminari di tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Nel presente rapporto è stata effettuata un'analisi termo-fluidodinamica di un impianto pilota alimentato a polverino di carbone. Le analisi termo-fluidodinamiche giocano un ruolo fondamentale nella comprensione dei meccanismi che sono alla base della produzione di inquinanti. Solitamente nelle simulazioni della combustione di polverino di carbone non si tiene conto delle reazioni di gassificazione legate alle specie CO₂ e H₂O, in quanto il loro contributo alla ossidazione del char è trascurabile rispetto al meccanismo di ossidazione legato all'O₂. Nelle condizioni di funzionamento simulate (che si dovrebbero avvicinare ad una situazione di combustione flameless), a causa del forte ricircolo di gas caldi e parzialmente combustibili nella zona primaria di combustione, tali reazioni divengono importanti. In questa situazione, quindi, le suddette reazioni di gassificazione devono essere tenute in considerazione. Le simulazioni sono state condotte con l'ausilio del codice Ansys-Fluent utilizzando la piattaforma CRESCO di ENEA.

1 Introduzione

Per validare la modellistica relativa all'ossicombustione di carbone attualmente implementata nei codici disponibili, saranno utilizzati i dati sperimentali relativi ad un combustore di polverino di carbone progettato e realizzato nell'ambito del progetto europeo FLOX-COAL. Il lavoro si inserisce nel progetto: "Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili" e fa parte dell'obiettivo: "Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione" del PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2012 relativo all'ACCORDO DI PROGRAMMA MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO – ENEA SULLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

2 L'apparato sperimentale

Le simulazioni sono state effettuate a partire da un setup consistente in una fornace alimentata a polverino di carbone, disposta verticalmente, di tipo 'top fired', con un diametro di 400mm ed una lunghezza totale di 4200mm [1]. In fig.1 è mostrata una vista generale della fornace, mentre in fig.2 è mostrato un dettaglio del bruciatore.

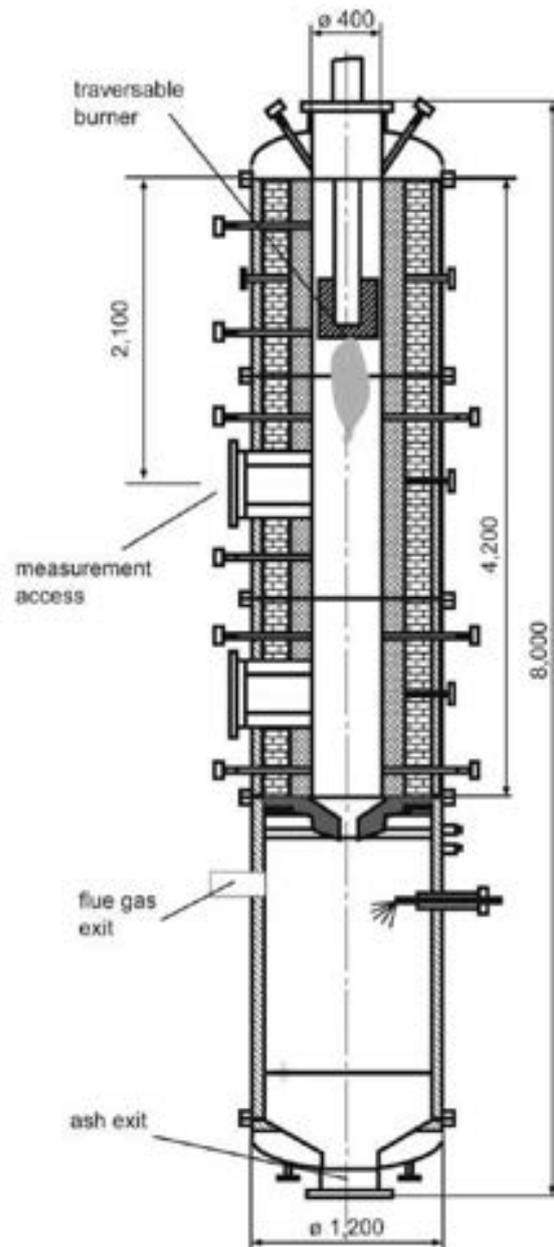


Fig.1 Apparato sperimentale (le misure sono espresse in mm)

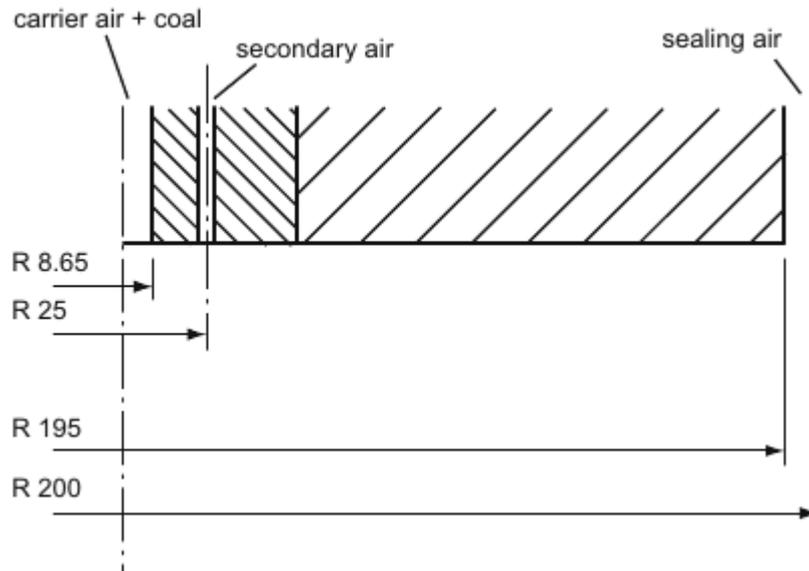


Fig.2 Dettaglio della zona del bruciatore (le misure sono espresse in mm)

La parte relativa al bruciatore è mobile, ciò permette che il bruciatore stesso possa essere spostato in alto o in basso per esigenze legate all'acquisizione di dati sperimentali.

Il polverino di carbone entra all'interno della camera di combustione da un ingresso centrale, trasportato da un flusso d'aria (carrier air). L'aria secondaria è immessa attraverso tre ugelli disposti circolarmente intorno all'asse del combustore, ai vertici di un triangolo equilatero (secondary air). Un flusso di aria anulare (sealing air) serve per evitare che particelle di carbone entrino nella zona al di sopra del bruciatore. La configurazione degli iniettori facilita il ricircolo dei gas caldi di combustione nella zona di immissione del polverino di carbone. Questo fa in modo che la concentrazione di ossigeno della miscela polverino-aria si riduca riducendo così i picchi di temperatura. Inoltre gli l'NO_x prodotto nella zona di reazione è parzialmente ricircolato, insieme ai gas di combustione, facendo in modo che una parte di essi subisca un processo di riduzione nella zona prossima al bruciatore. In fig.3 possiamo vedere uno schema del bruciatore, dove vengono evidenziati i flussi [2].

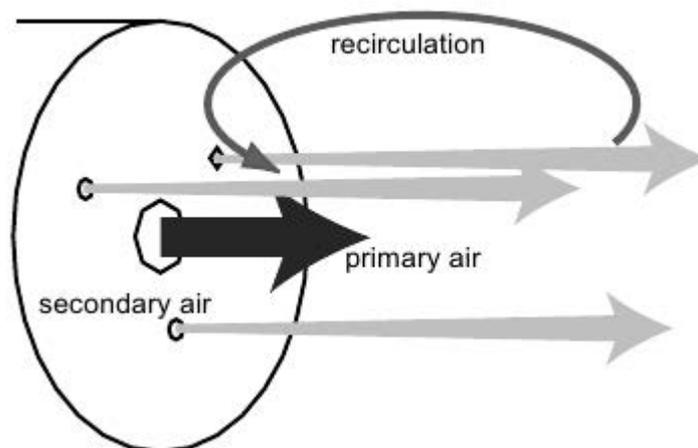


Fig.3 Schema del bruciatore

3 Condizioni al contorno e modelli numerici

Nelle prima serie di simulazioni, descritte in questo rapporto, abbiamo preso in considerazione due condizioni operative. In tab.1 sono riportate le condizioni al contorno. Quelle simulate sono: EAR=0.7, EAR=0.9 (EAR sta per 'excess air ratio').

In fig.5 riportiamo le caratteristiche del carbone che abbiamo utilizzato nelle simulazioni.

Per quanto riguarda la granulometria del polverino di carbone, si è ipotizzato che questa segua una distribuzione di tipo rosin-rammler con i seguenti parametri:

- diametro minimo: 1e-06 m
- diametro massimo: 0.0001m
- diametro medio: 3.25e-05m
- fattore di spread: 3.5

Tab. 1 Condizioni Operative

Burner EAR	Coal flow ($\frac{kg}{s}$)	Carrier air ($\frac{kg}{s}$)	Secondary air ($\frac{kg}{s}$)	Sealing air ($\frac{kg}{s}$)	Burnout air ($\frac{kg}{s}$)	Wall temperature (°C)
0.7	1.167×10^{-3}	3.389×10^{-3}	3.699×10^{-3}	2.730×10^{-3}	8.800×10^{-3}	900
0.8	1.167×10^{-3}	3.389×10^{-3}	4.561×10^{-3}	2.766×10^{-3}	6.824×10^{-3}	900
0.9	1.167×10^{-3}	3.389×10^{-3}	5.783×10^{-3}	2.766×10^{-3}	5.388×10^{-3}	900

Tab.2 Tipologia di carbone: Bituminous Coal (frazione di massa)

Proximate analysis		Ultimate analysis	
Water	0.60	C	85.90
Ash	3.60	H	5.09
Volatiles	33.00	O	2.94
Char	62.80	N	1.41
		S	0.46

Le simulazioni sono state effettuate mediante il codice di calcolo Ansys-Fluent, sulla piattaforma CRESCO dell'ENEA. La griglia di calcolo è di tipo ibrido, con un infittimento nella zona di mescolamento. Nelle figg.4,5,6 riportiamo varie viste della griglia computazionale.

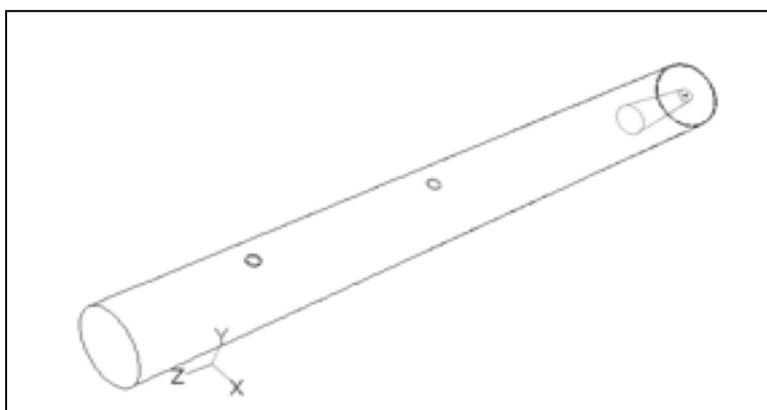


Fig.4 Griglia di calcolo (vista globale)

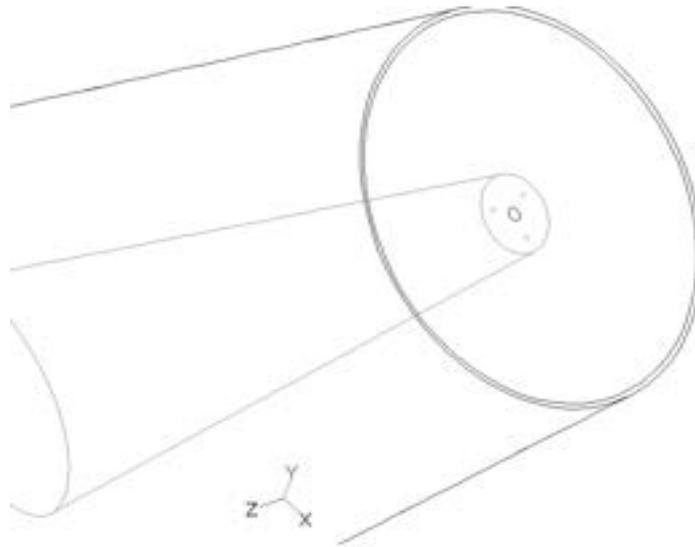


Fig.5 Griglia di calcolo (dettaglio della zona di ingresso)

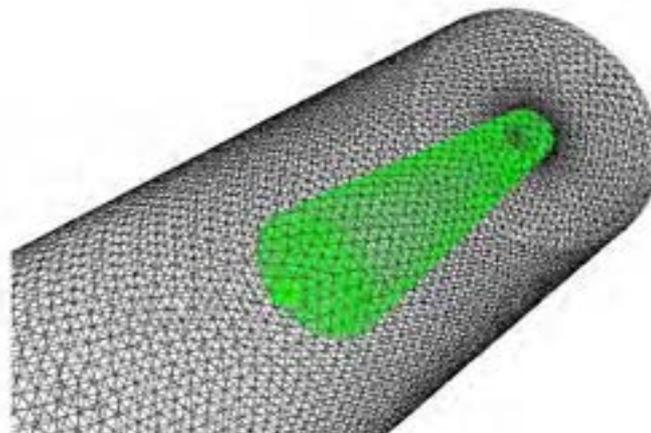


Fig.6 Griglia di calcolo (la zona di infittimento è indicata dal colore verde)

Il numero di celle di calcolo è di circa 1.300.000.

La simulazione è del tipo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) ed il modello di turbolenza adottato il $k-\epsilon$. Il modello EDC (Eddy Dissipation Concept) è stato adottato per la modellazione dei fenomeni chimici in fase gas. Per l'irraggiamento si è scelto il modello P1. La traiettoria e lo scambio termico e di massa con la fase gas delle particelle è stata valutata secondo un approccio lagrangiano

Il fenomeno del rilascio dei volatili è stato modellato utilizzando uno schema single-rate con una energia di attivazione di 74 kJ/(mol K).

Per quanto riguarda il meccanismo cinetico abbiamo adottato un modello che prevede tre reazioni in fase omogenea (gas-gas) e tre reazioni in fase eterogenea (solido-gas), per un totale di sei reazioni.

Le specie volatili sono state rappresentate con un'unica pseudo molecola del tipo $C_aH_bO_cN_d$ (che abbiamo indicato con MV_VOL), che si decompone con ossigeno per formare CO, H_2 e N_2 :



Il CO e l' H_2 reagiscono secondo le seguenti altre due reazioni:



Per quanto riguarda le reazioni di tipo solido-gas, abbiamo considerato le seguenti tre reazioni (C<s> rappresenta il Char):



Nelle tabelle 3, 4, 5, 6, 7, 8 sono riportati i parametri cinetici delle sei reazioni considerate nel nostro modello.



Tab. 3 parametri cinetici reazione (1)



Tab. 4 parametri cinetici reazione(2)



Tab. 5 parametri cinetici reazione (3)



Tab. 6 parametri cinetici reazione (4)



Tab. 7 parametri cinetici reazione (5)



Tab. 8 parametri cinetici reazione (6)

4 Risultati delle Simulazioni

Durante la prima serie di simulazioni relative al combustore descritto, abbiamo analizzato le due condizioni operative summenzionate: EAR=0.7 ed EAR=0.9.

In fig.7 è mostrato l'andamento dei dati sperimentali, indicati con dei piccoli cerchi nel grafico, per il caso EAR=0.7. Si tratta di misure di velocità effettuate con una tecnica LDA (Laser Doppler Anemometry). I dati sono relativi ad un profilo radiale, a partire dal centro della camera di combustione verso la periferia e distante 25mm dalla testa del bruciatore. Il piano di misura è situato in una posizione intermedia tra due fori dell'aria secondaria. Le curve continue sovrapposte ai dati sperimentali rappresentano il risultato di simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics) realizzate da H.Stadler et al./Combustion and Flame 156 (2009) 1755-1763 [1]. Nella fig.8 è riportato il risultato delle nostre simulazioni relativamente alla stessa posizione.

In fig.9 e in fig.10 riportiamo, in modo analogo, gli stessi risultati relativamente ad una distanza dalla testa del bruciatore pari a 100mm.

L'accordo tra i risultati delle nostre simulazioni ed i dati sperimentali è buono anche dal punto di vista quantitativo.

Nel caso relativo a 25mm, essendo molto vicini alla testa del bruciatore ed essendo il piano di misura non coincidente con uno dei fori dell'aria secondaria, il profilo di velocità risente solo del flusso d'aria centrale che funge da fluido di spinta per il polverino di carbone. Alla distanza di 100mm, il flusso di aria secondaria si è aperto ed è chiaramente visibile nel diagramma del profilo di velocità.

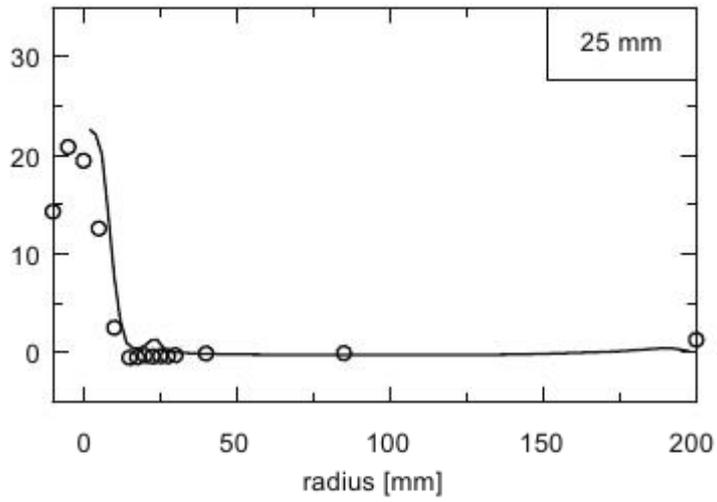


Fig.7 Profilo di velocità (m/s) – EAR=0.7

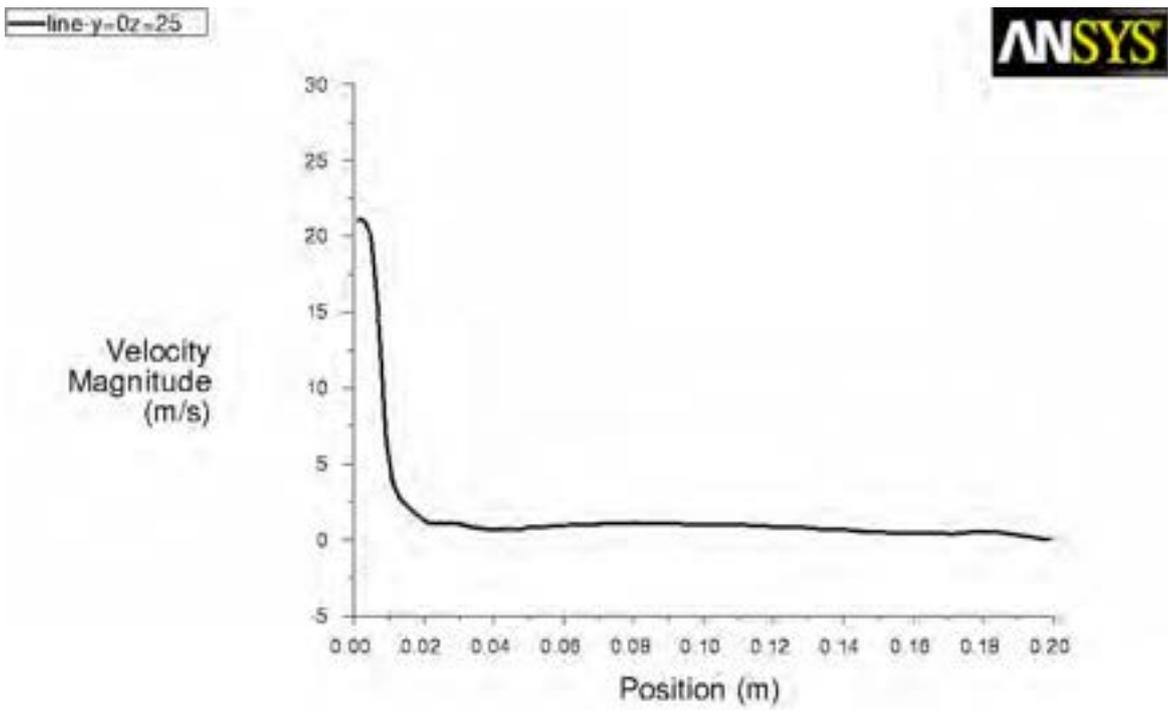


Fig.8 Profilo calcolato di velocità (m/s) – EAR=0.7

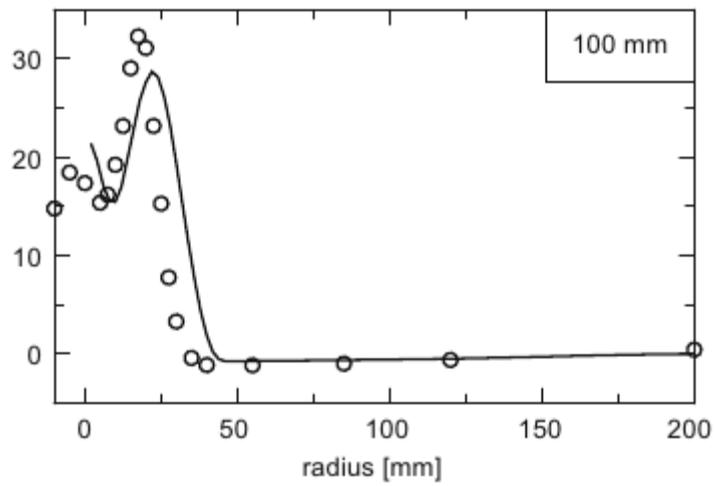


Fig.9 Profilo di velocità (m/s) – EAR=0.7

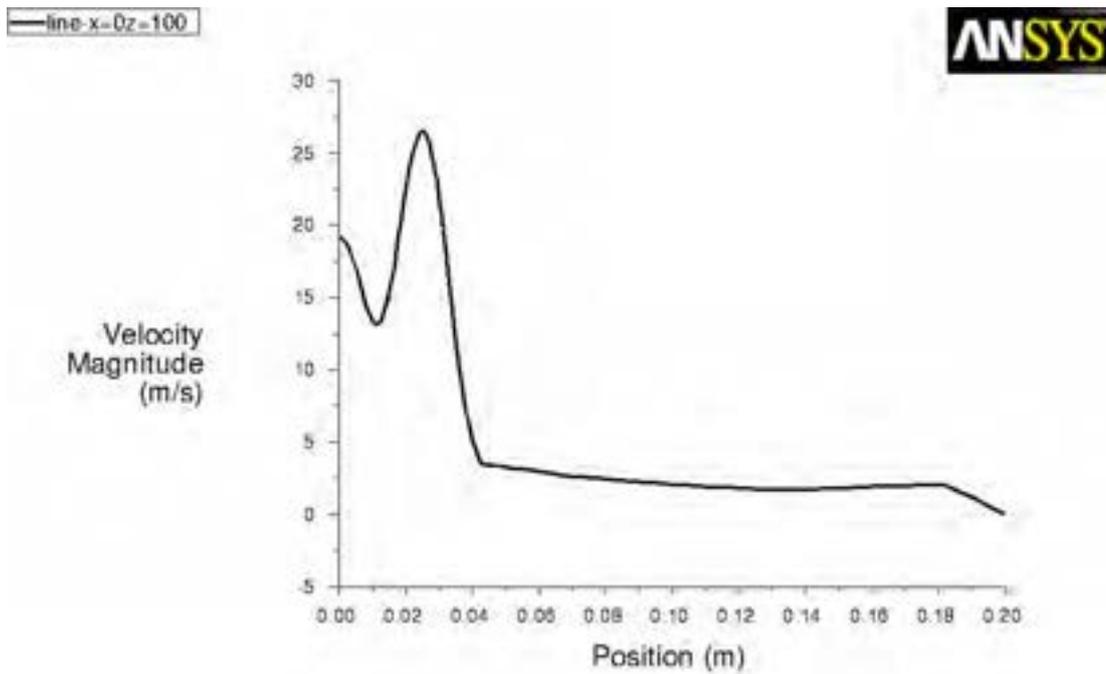


Fig.10 Profilo calcolato di velocità (m/s) – EAR=0.7

In fig.11 riportiamo l'andamento del campo di temperature nel caso EAR=0.7. In questo caso la temperatura sulle pareti è stata imposta costante e pari a 1173K (900°C).

In fig.12 è mostrato, in modo analogo, il campo di temperature nel caso EAR=0.9 con temperatura di parete di 1773K (1500°C).

Possiamo osservare come in entrambi i casi non vi siano grandi picchi di temperatura. In particolar modo nel caso EAR=0.9 con temperatura di parete di 1773K, il campo di temperatura appare omogeneo per quasi tutta la lunghezza del combustore.

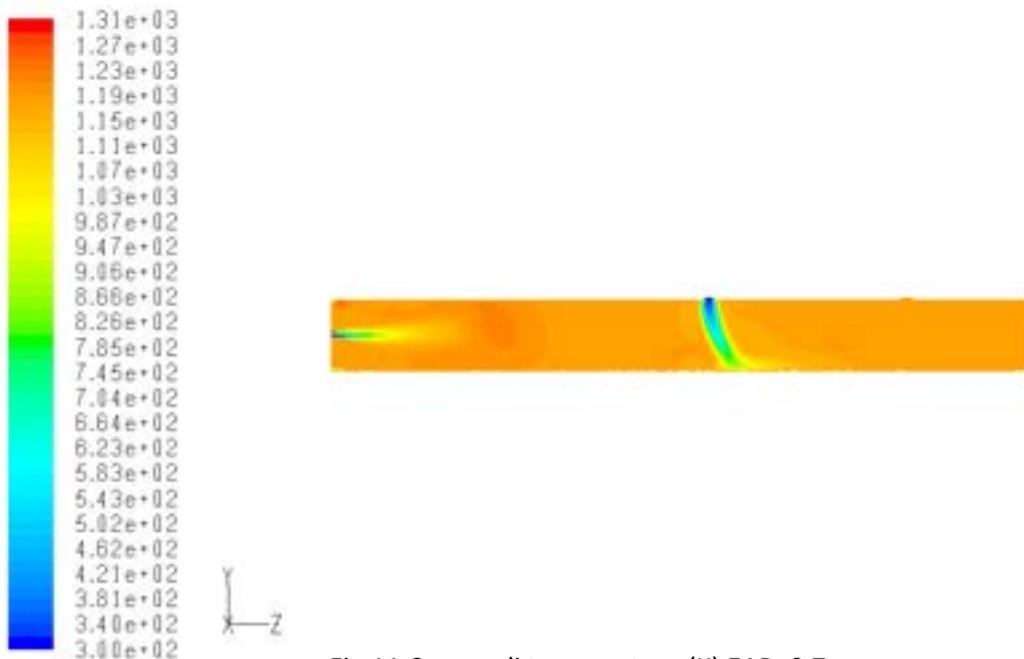


Fig.11 Campo di temperature (K) EAR=0.7

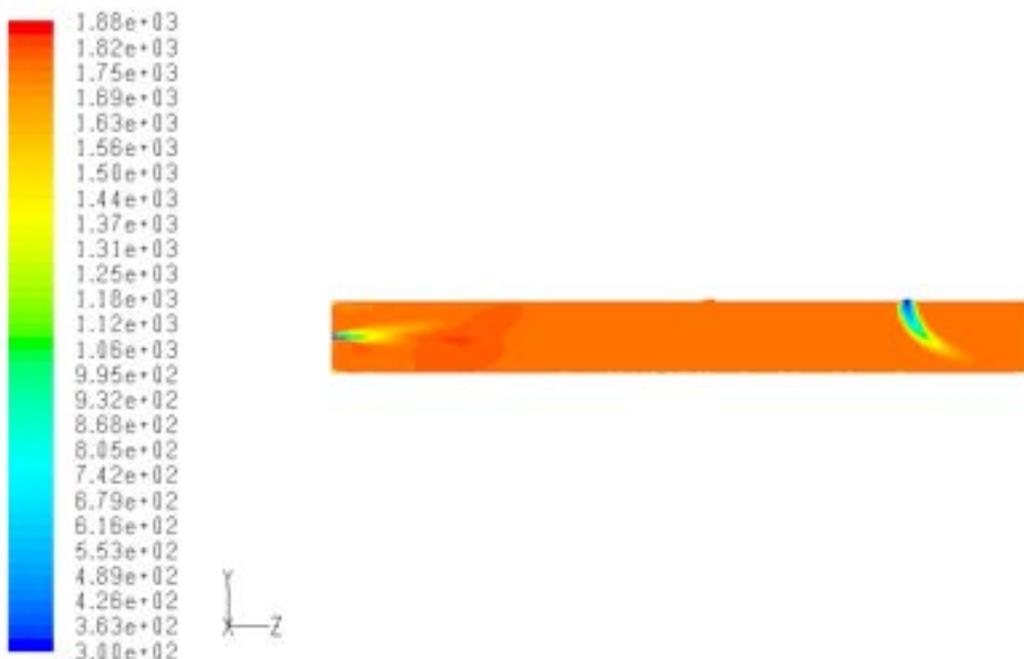


Fig.12 Campo di temperature (K) EAR=0.9

Il fatto di avere dei gradienti di temperatura, bassi unitamente al fatto che la concentrazione di ossigeno nella zona di reazione risulti diluito dal ricircolo dei gas combusti, fa in modo che la produzione di inquinanti, tipicamente NO_x , risulti limitata. In fig.13 riportiamo il campo di concentrazione degli Ossidi di Azoto nel caso $\text{EAR}=0.9$. Il picco di concentrazione risulta di circa 255ppm, mentre il valore integrale all'uscita è di circa 28ppm.

Per quanto riguarda l'aspetto modellistico, nelle simulazioni degli Ossidi di Azoto si è tenuto conto del:

THERMAL NO_x

FUEL NO_x

PROMPT NO_x

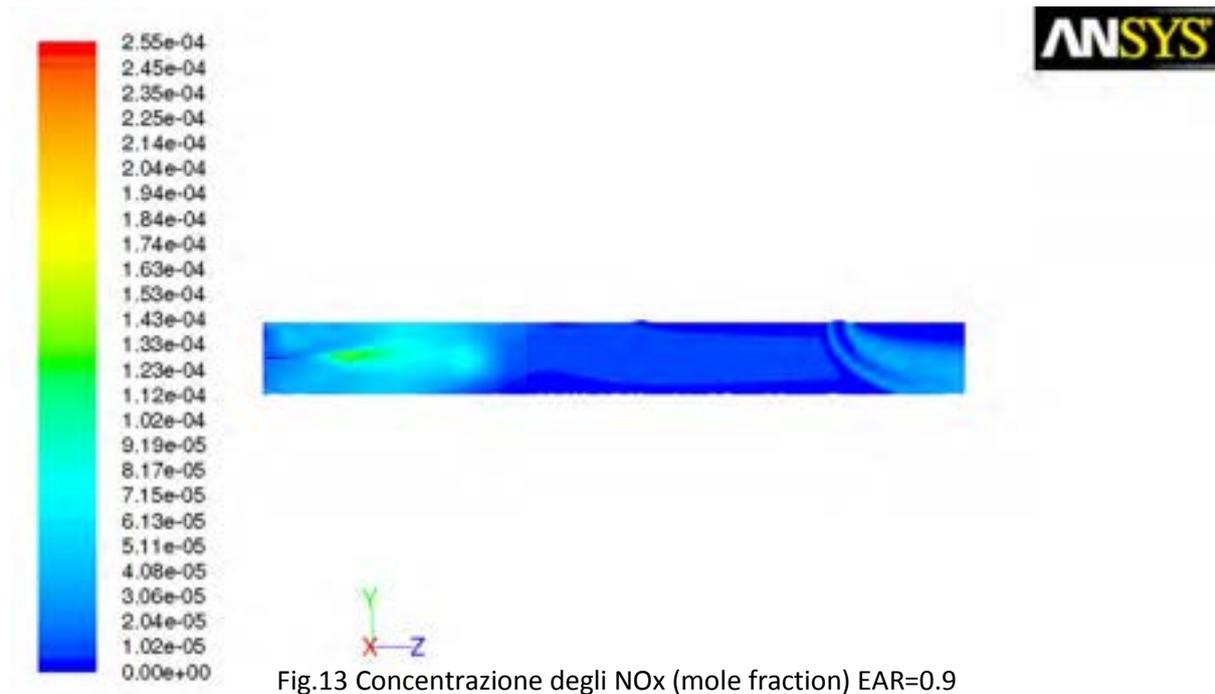


Fig.13 Concentrazione degli NO_x (mole fraction) $\text{EAR}=0.9$

5 Conclusioni

L'attività di modellistica è molto importante ed è un potente ausilio al fine di indagare le condizioni di esercizio migliori. In questa ottica, presso i nostri laboratori di termo-fluidodinamica computazionale, sono state svolte le simulazioni descritte nel presente rapporto tecnico.

La modellazione della combustione del carbone, coinvolgendo reazioni che avvengono in fase eterogenea, presenta degli aspetti critici in più rispetto alla combustione omogenea gas-gas.

La prima serie di simulazioni ha mostrato che una opportuna scelta della configurazione degli ugelli dell'aria secondaria e dell'iniettore del polverino di carbone, unitamente ad una geometria che promuova un ricircolo interno, conducono ad una situazione nella quale si hanno dei campi termici sostanzialmente omogenei. Questa omogeneità, o meglio l'assenza di picchi di temperatura, fa in modo che la produzione di specie inquinanti sia molto contenuta, soprattutto all'uscita del combustore.

Un eventuale proseguimento dell'attività potrebbe essere finalizzata ad una analisi di diversi tipi di carbone, sia per quanto riguarda la tipologia che per quanto riguarda la granulometria.

6 Riferimenti bibliografici

1. Hannes Stadler, Dobrin Toporov, Malte Förster, Reinhold Kneer, “On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion”, *Combustion and Flame* 156 (2009) 1755-1763
2. Hannes Stadler, Dragisa Ristic, Malte Förster, Anja Schuster , Reinhold Kneer, Günter Scheffknecht, “NOx-emissions from flameless coal combustion in air, Ar/O2 and CO2/O2”, *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) 3131–3138

7 Abbreviazioni ed acronimi

- CFD: Computational Fluid Dynamics
RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes
EAR: Excess Air Ratio
EDC: Eddy Dissipation Concept
LDA: Laser Doppler Anemometry
CRESCO: Centro computazionale di RicErca sui Sistemi COmplessi