



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Scalatura del reattore sperimentale ISOTHERM-ITEA da 5 MWt a 50 MWt

G. Calchetti, A. Di Nardo, C. Mongiello

Report RdS/2010/29

SCALATURA DEL REATTORE SPERIMENTALE ISOTHERM-ITEA DA 5 MWt A 50 MWt

G. Calchetti, A. Di Nardo, C. Mongiello
ENEA-UTTEI-COMSO

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: *Tecnologie innovative per migliorare i rendimenti di conversione delle centrali a polverino di carbone*

Responsabile Tema: Stefano Giammartini, ENEA

INDICE

Criteri di scalatura.....	4
Simulazioni.....	10
Bibliografia.....	24
Conclusioni e sviluppi futuri.....	24

1. Criteri di scalatura

Nel processo legato ai miglioramenti nella progettazione dei combustori di tipo industriale molto importanti sono le prove effettuate su prototipi in scala. I risultati ottenuti possono essere estrapolati ai bruciatori in scala reale con la raccomandazione di usare opportuni criteri di scalatura per quanto riguarda le variabili in gioco nel processo di combustione, come ad esempio velocità, tempi di residenza, volumi, ecc... Diversi fattori giocano un ruolo importante ma una corretta comprensione dei meccanismi della fisica e della chimica dei processi combustivi è fondamentale e può avere importanti ricadute ad esempio per quanto riguarda la produzione di sostanze inquinanti, come ad esempio gli ossidi di azoto o di zolfo.

Nel corso degli anni le conoscenze legate alla chimica della combustione, sia in fase omogenea che eterogenea (come ad esempio la combustione di polverino di carbone) ed alla produzione di inquinanti si è notevolmente accresciuta. Basandosi su tali conoscenze i progettisti di combustori utilizzano criteri di progettazione nel quale da una parte devono tenere conto degli aspetti più propriamente chimici e dall'altra di aspetti legati alla fluidodinamica ed allo scambio termico.

Parlando da un punto di vista generale, quindi, l'impiego di prototipi in scala è possibile perché l'analisi teorica approfondita consente di definire dei parametri fisico-matematici che consentono di "tradurre" e applicare all'esemplare reale gli studi e i risultati ottenuti sul modello. I parametri coinvolti sono di tipo geometrico (dimensioni e forma dell'oggetto), fisici (natura del fluido che circonda l'oggetto) e termofluidodinamici (condizioni di lavoro del fluido). A questo scopo conviene precisare che due grandezze fisiche y' e y'' stanno in similitudine se esiste tra loro, in punti omologhi nello spazio e nel tempo, proporzionalità diretta, cioè se $y'' = c \cdot y'$, in cui c è il fattore di similitudine (costante). Quando $c = 1$ le due grandezze evidentemente coincidono anche

numericamente. La similitudine non deve essere pensata come un fatto puramente geometrico, ma deriva dalle interazioni dei parametri geometrici con quelli che esprimono le condizioni di lavoro: quindi modello e oggetto potrebbero non differire solo per un fattore di scala (come alla lente d'ingrandimento). Col passare del tempo questi metodi sono stati affiancati dalle simulazioni numeriche svolte dai computers, ma i concetti che se ne traggono rimangono sempre validi e d'attualità. In alcuni casi, la stabilità numerica dei mastodontici codici di calcolo sviluppati in fluidodinamica viene testata proprio attraverso le indicazioni fornite dai parametri di similitudine.

La teoria della similitudine si basa sul teorema Π o di Buckingham. In esso si dice che, scelta una funzione obiettivo y_1 , descritta da n variabili:

$$Y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Il fenomeno così rappresentato può essere studiato tramite una funzione f_1^* espressa in termini adimensionali:

$$\Pi y_1 = f_1^*(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n)$$

Dove il numero di parametri adimensionali m è pari a $n-q$, essendo q il numero di unità fondamentali (lunghezza L , tempo T , massa M e temperatura Θ). Il teorema Π permette quindi di ridurre il numero di variabili da controllare. Questo indipendentemente dalla forma matematica assunta dalle funzioni f_1 e f_1^* . Per conoscere tali funzioni sarà poi necessario ricorrere alla sperimentazione.

Il nostro interesse, nel caso in oggetto, è legato all'influenza che ha una variazione della potenza termica di un combustore sui criteri di progettazione, sulla caratterizzazione della fiamma, sulle emissioni, ecc...

La questione principale da tenere in conto quando si voglia affrontare il problema della scalatura in combustori, è fondamentalmente quella di stabilire quali siano le regole di scalatura da applicare.

Siamo anche interessati a stabilire quali siano le differenze di 'performance' sia del prototipo a piccola scala che del combustore finale in scala reale legate a variazioni per esempio di geometria o di caratteristiche termiche.

Come abbiamo accennato, in generale il processo di scalatura di combustori coinvolge aspetti legati alla dinamica dei fluidi, alla combustione ed allo scambio termico sia nelle vicinanze del bruciatore che nella camera di combustione.

Considerazioni a livello teorico su tale argomento si trovano ampiamente trattati in letteratura, come ad esempio in Spalding e Beér [1] o Chigier [2] che propongono una lunga lista di gruppi adimensionali, partendo dalle equazioni differenziali fondamentali per la quantità di moto, energia e conservazione della massa. Damköhler [3] probabilmente è stato il primo autore ad introdurre cinque numeri adimensionali per la scalatura dei reattori chimici.

Il più delle volte non è possibile applicare esattamente i criteri basati sulla totalità dei gruppi adimensionali ricavati per mezzo della teoria. Anche considerando solo i gruppi principali, come ad esempio i numeri di Reynolds, Froude e Damköhler si hanno dei vincoli incompatibili tra loro. In pratica quindi si procede ad una modellizzazione parziale, utilizzando solo poche regole di scalatura.

I due criteri maggiormente utilizzati nel caso di combustori industriali sono quello basato sulla invarianza della velocità e quello basato sulla invarianza dei tempi di residenza. Il criterio basato sulla invarianza del numero di Reynolds viene usato raramente, in quanto nel caso di combustori industriali tipicamente tale numero è superiore a 10^5 .

Criterio a invarianza della velocità

La relazione fondamentale per la potenza termica (Q) è la seguente:

$$Q = K\rho_0 U_0 D_0^2$$

Dove ρ_0 , U_0 e D_0 si riferiscono alla densità del fluido in ingresso (tipicamente dell'aria di combustione), alla velocità del fluido in ingresso ed al diametro caratteristico del bruciatore (tipicamente diametro della gola del bruciatore), rispettivamente. K è una costante di proporzionalità. Quando un bruciatore viene scalato, portandolo ad una diversa potenza, usando il criterio della velocità costante ($U_0 = \text{const}$), il nuovo diametro caratteristico è valutabile dalla seguente relazione:

$$D_0 \sim Q^{1/2}$$

Quindi se si mantiene la similitudine geometrica del bruciatore, le altre dimensioni possono essere calcolate.

Criterio a invarianza di tempo di residenza

Il questo criterio di scalatura si mantiene costante il rapporto D_0/U_0 . Tale rapporto rappresenta il tempo caratteristico convettivo. Ad alti numeri di Reynolds, tutti i tempi caratteristici (tranne quelli legati alla dissipazione a livello molecolare), sono proporzionali al rapporto suddetto.

Partendo dall'equazione $Q = K\rho_0 U_0 D_0^2$ ed imponendo il vincolo $D_0/U_0 = \text{const}$, si ottiene:

$$D_0 \sim Q^{1/3}$$

Nel caso di combustori a polverino di carbone, nei quali sia presente un forte ricircolo interno, dovuto alla presenza di flussi swirlati e/o generati dalla configurazione geometrica del combustore stesso, risulta anche importante la valutazione del grado di penetrazione delle particelle all'interno

della zona di ricircolo. In prototipi di piccola scala il grado di penetrazione (dato dalla distanza di penetrazione divisa per la dimensione della zona di ricircolo) è sensibilmente maggiore di quanto non lo sia per i combustori a scala industriale. Questo tipo di problema può essere risolto prevedendo di usare una granulometria più fine per i combustori di piccola taglia.

Nella zona di fiamma all'interno di un combustore, le temperature sono determinate dalla velocità di reazione, dallo stretching e dal trasporto radiativo. Nella zona a valle, dove il rilascio termico dovuto alle reazioni chimiche è terminato, la velocità con la quale i prodotti di combustione diminuiscono la propria temperatura, è dovuto principalmente a scambio radiativo e convettivo.

Un aumento della potenza (quindi del carico termico) non deve influire sul campo di temperature nel combustore (nel caso non-adiabatico). Questo significa che nell'effettuare una operazione di scalatura si devono tenere in debito conto gli effetti dello scambio termico radiativo e convettivo. Un criterio spesso adottato è quello di mantenere costante la frazione di energia scambiata per trasporto radiativo (frazione radiante).

Nel combustore ISOTHERM, funzionante a slurry di carbone, un componente importante e per certi versi anche critico, è rappresentato dal sistema di pompaggio ed atomizzazione dello slurry. Nel processo di atomizzazione un volume di liquido (nel nostro caso slurry che sostanzialmente è una miscela di acqua e polverino di carbone), viene convertito in goccioline. Il problema della scalatura del reattore, appare principalmente un problema di scalatura dell'elemento essenziale del sistema, rappresentato dalla lancia di iniezione/atomizzazione dello slurry.

In un atomizzatore l'azione distruttiva delle forze aerodinamiche dovute ai getti ad alta velocità, è opposta alla forza di riaggregazione dovuta alla tensione superficiale ed alla viscosità. Quindi alla formazione di goccioline contribuiscono fondamentalmente due meccanismi, tenendo conto dei quali Lefebvre [4] ha formulato la seguente relazione empirica per l'atomizzazione di un liquido:

$$SMD/L_c = (A \cdot We^{-1/2} + B \cdot Z)(1 + W_F/W_A)$$

Dove

$We = \rho_A U_A^2 D_F / \rho_L$ (numero di Weber); ρ_A densità, velocità dell'aria; ρ_L densità del liquido; D_F diametro dell'orifizio;

W_F/W_A rapporto tra la portata di combustibile e quella di aria;

$Z = \eta_F / (\sigma_L \rho_F D_F)^{1/2}$ (numero di Ohnesorge); η_F viscosità apparente del combustibile; σ_L tensione superficiale;

SMD diametro medio di Sauter delle goccioline;

A, B costanti;

L_c lunghezza caratteristica;

Altre relazioni dello stesso tipo si possono ottenere partendo da considerazioni analoghe. Oltre all'SMD si può introdurre il parametro MMD (diametro medio di massa). I due parametri risultano approssimativamente proporzionali. In tal caso [5, 6]:

$$MMD/D_F = (A \cdot We^{-x} + B \cdot Z^{2x})(1 + W_F/W_A)^y$$

Queste relazioni esprimono in formule la dipendenza del diametro delle particelle ottenute dai due meccanismi citati: il “wave mechanism” (effetto della tensione superficiale) ed il “ligament mechanism” (effetto della viscosità del fluido). Le costanti delle relazioni riportate vanno determinate per ogni tipologia di atomizzatore, interpolando i dati sperimentali. Le dimensioni delle particelle di carbone incidono sulla dimensione delle particelle di slurry atomizzate e sul valore delle costanti. La presenza di particelle di carbone comporta una variazione del meccanismo fondamentale che determina la distribuzione delle particelle atomizzate, con la predominanza dell'effetto della viscosità del combustibile rispetto alla sua tensione superficiale. Molto importante

risulta pura l'effetto di impacchettamento delle particelle tra di loro, dipendente dal tipo di macinazione del carbone. Pertanto nella scalatura della lancia occorre considerare l'effetto dei parametri fisici riportati, garantendo che questi (velocità e proprietà dei fluidi, dimensioni caratteristiche) varino in modo da mantenere la stessa qualità dell'atomizzazione.

2. Simulazioni

Abbiamo affrontato il problema della scalatura del combustore ISOTHERM, in questa prima fase, con un approccio basato sulla invarianza della velocità in ingresso del combustibile (slurry e vapore) e del comburente (gas ricircolati arricchiti di ossigeno). Si è supposto che la lancia di iniezione dello slurry e del fluido atomizzatore (vapore), venga scalata in modo tale da mantenere costanti la velocità di vapore e slurry e la distribuzione granulometrica delle particelle atomizzate. Applicando il criterio della velocità costante, si ricavano i diametri del bruciatore, tali da garantire l'uguaglianza delle velocità per le nuove portate, anche considerando che la pressione operativa del reattore scalato sarà di 10 bar anziché 4. Il diametro del reattore è ricavato mantenendo la stessa proporzionalità tra diametro del reattore e diametro del bruciatore, mentre la sua lunghezza è ricavata imponendo lo stesso rapporto potenza/volume. In definitiva, le dimensioni del reattore risultano $D = 2.56$ m e $L = 11.35$ m. In questo modo si ottiene un reattore scalato geometricamente simile a quello reale.

Si è simulato il combustore in una configurazione verticale (così come si prevede che sarà esercito) con ingresso dello slurry dall'alto e l'uscita fumi in basso (le figure sono rappresentate orizzontalmente per motivi di grafica, ma si deve pensare che il verso del vettore accelerazione di gravità sia quello che va dall'ingresso all'uscita). Tale configurazione permette una più agevole rimozione delle scorie vetrificate sul fondo della camera di combustione.

Per quanto riguarda la modellistica utilizzata nelle simulazioni e la griglia di calcolo si fa riferimento a quanto illustrato nel rapporto tecnico EHE-09049 [7].

Abbiamo preso in considerazione due tipologie di granulometrie per il carbone dello slurry: una più fine ed una più grezza. Di seguito riportiamo i risultati delle simulazioni.

Le condizioni operative sono le seguenti:

5 MW:

Portata ricircolata: 3740 kg/h a 510 K (parzialmente swirlata).

Portata carbone: 508 kg/h. Distribuzione granulometrica Rosin-Rammler (grossa: $d_{min}=0.08\text{mm}$ $d_{max}=0.85\text{mm}$; fine: $d_{min}=0.004\text{mm}$ $d_{max}=0.2\text{mm}$).

Contenuto d'acqua dello slurry: 47 % in massa.

Portata vapore propellente: 220 kg/h a 474 K.

Pressione operativa: 400 kPa.

Parete: $T=1600\text{ K}$ uniforme.

Modello di devolatilizzazione: FGDVC.

50 MW:

Portata ricircolata: 37400 kg/h a 510 K (parzialmente swirlata).

Portata carbone: 5080 kg/h. Distribuzione granulometrica Rosin-Rammler (grossa: $d_{min}=0.08\text{mm}$ $d_{max}=0.85\text{mm}$; fine: $d_{min}=0.004\text{mm}$ $d_{max}=0.2\text{mm}$).

Contenuto d'acqua dello slurry: 47 % in massa.

Portata vapore propellente: 2200 kg/h a 474 K.

Pressione operativa: 1000 kPa.

Parete: $T=1600\text{ K}$ uniforme.

Modello di devolatilizzazione: FGDVC.

Granulometria fine

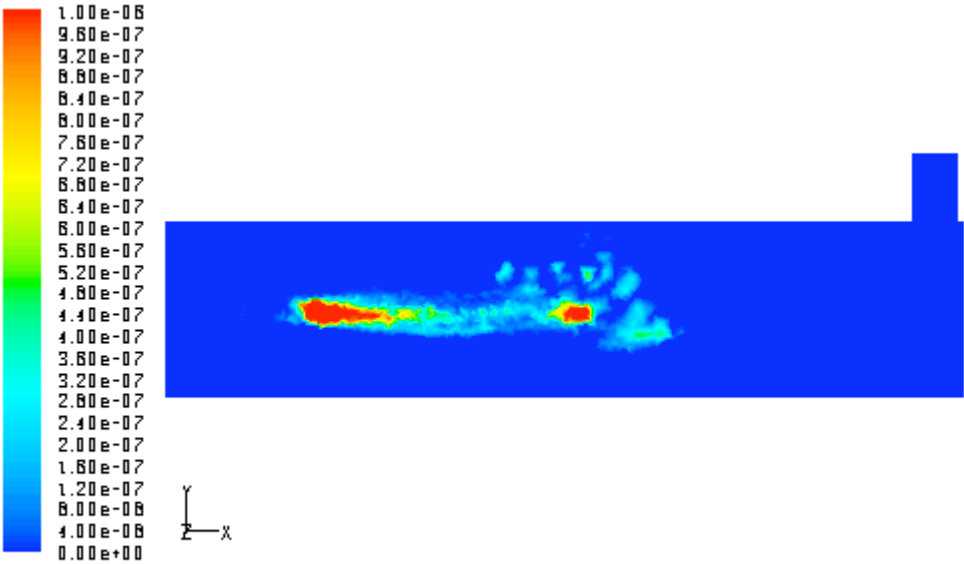


Fig. 1 DPM Burnout (kg/s) 5MW

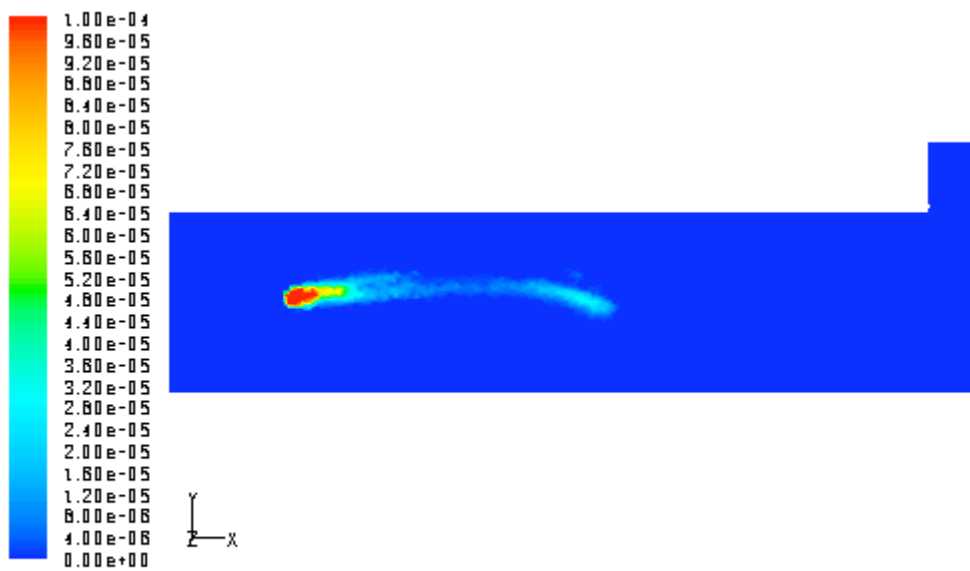


Fig. 2 DPM Burnout (kg/s) 50 MW

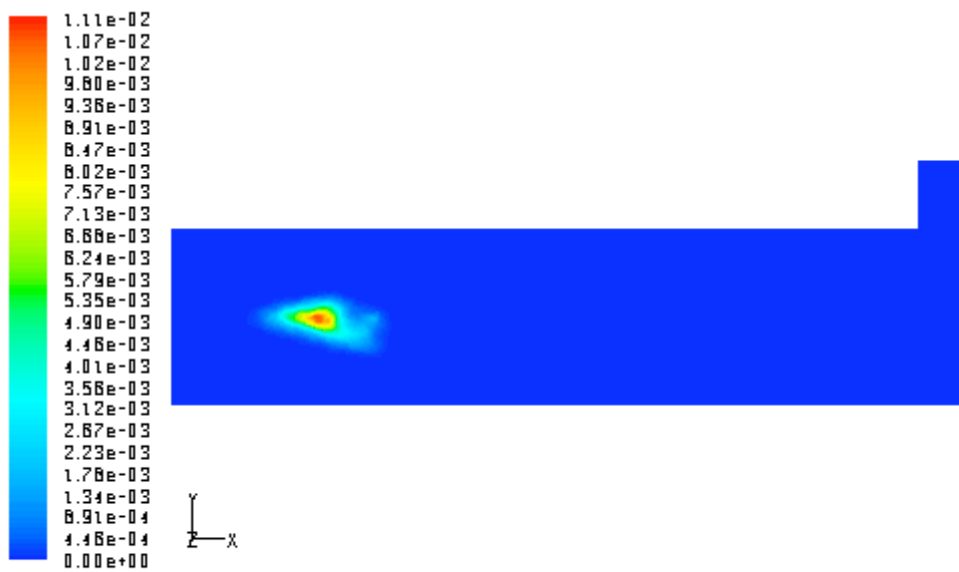


Fig.3 CH4 Mass Fraction 5MW

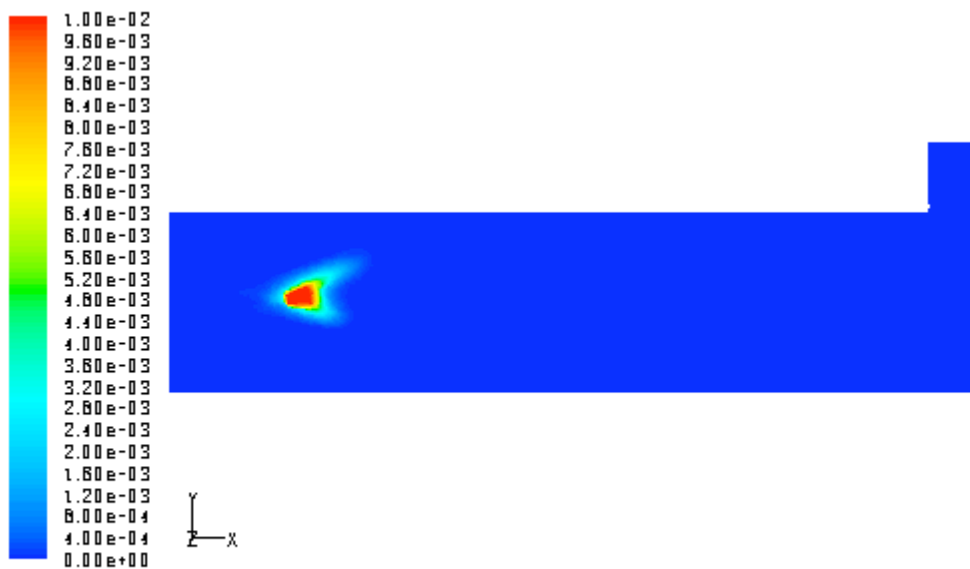


Fig. 4 CH4 Mass Fraction 50 MW

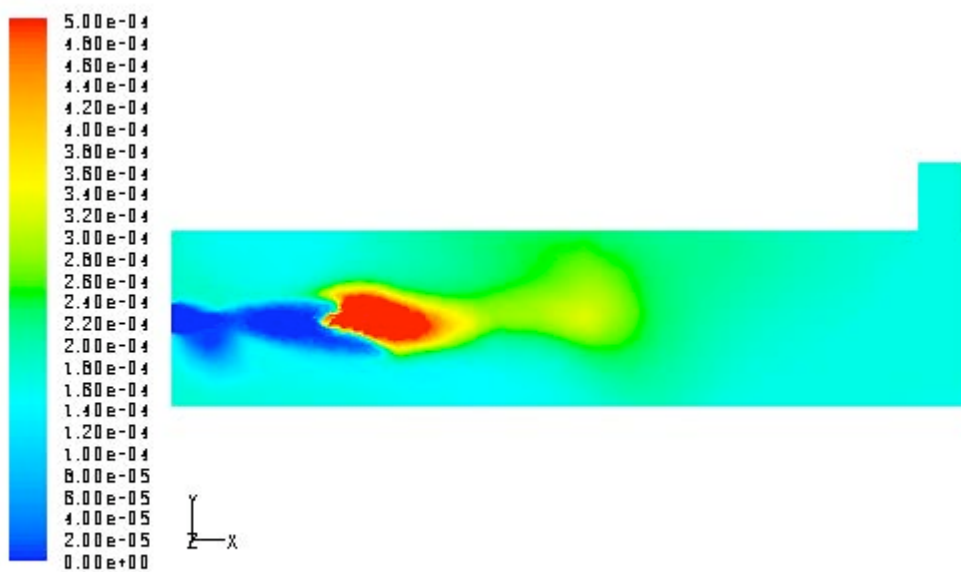


Fig. 5 OH Mass Fraction 5MW

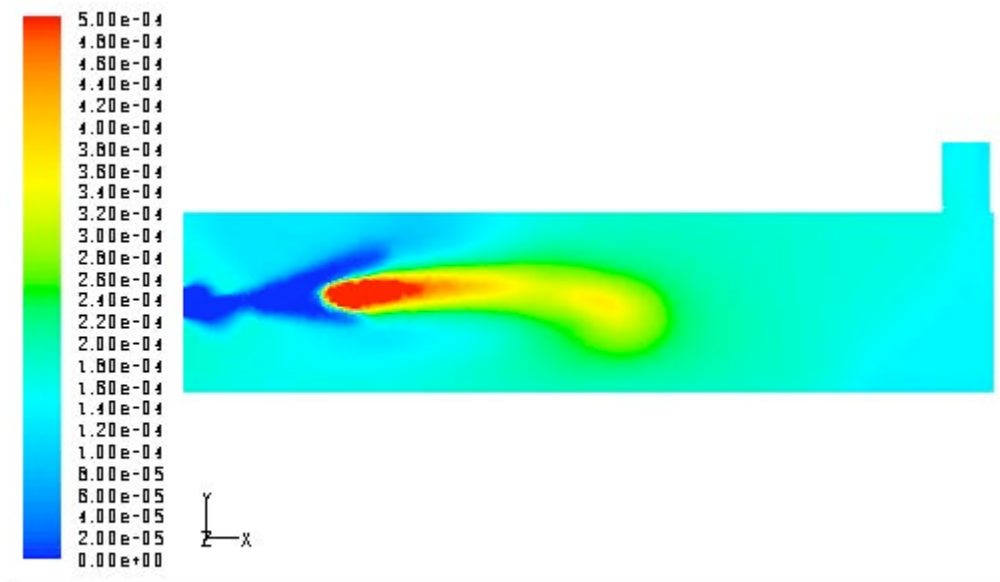


Fig. 6 OH Mass Fraction 50MW



Fig. 7 Particle Mass (kg) 5MW



Fig. 8 Particle Mass (kg) 50MW

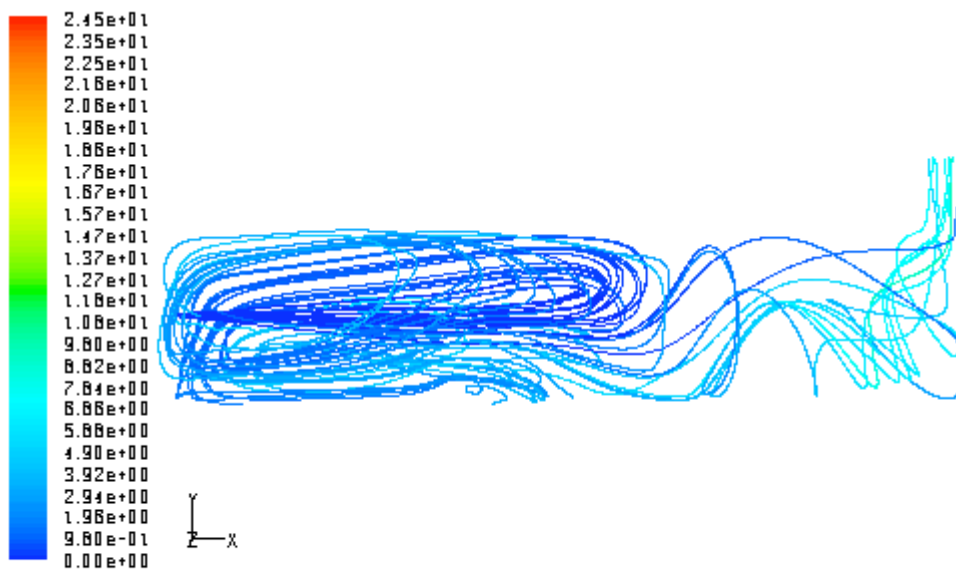


Fig. 9 Residence Time (s) 5MW

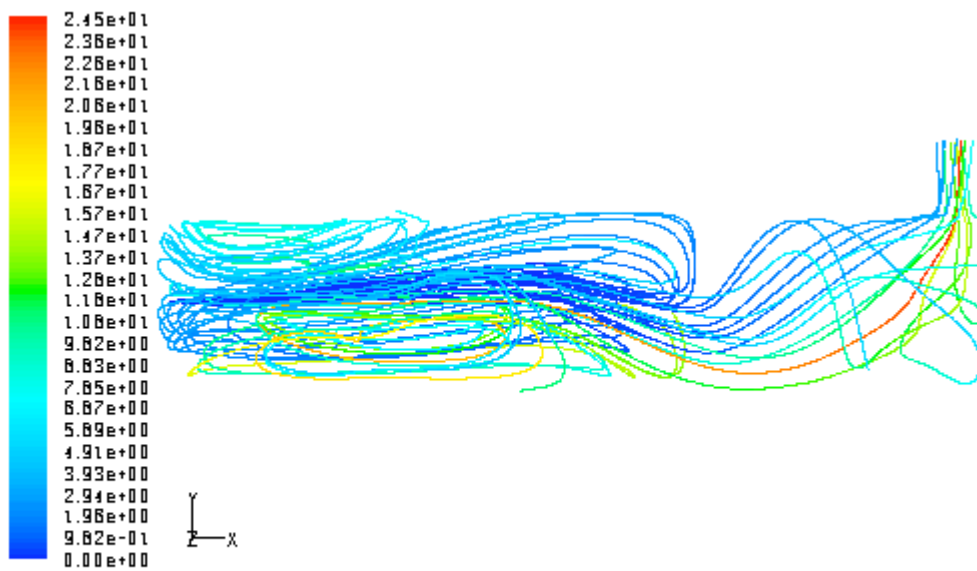


Fig. 10 Residence Time (s) 50MW

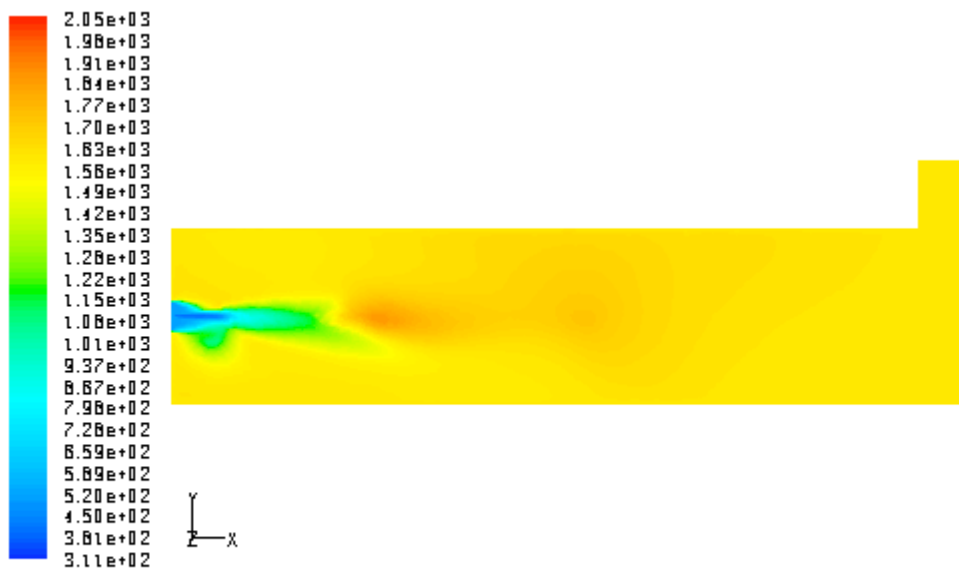


Fig. 11 Temperature (K) 5MW

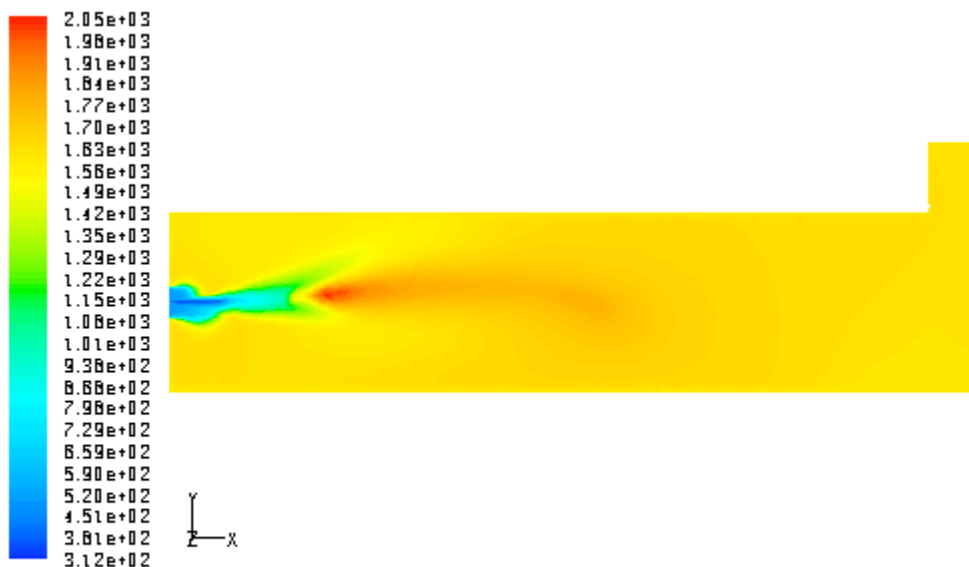


Fig. 12 Temperature (K) 50 MW

Naturalmente mantenendo costante la velocità, i tempi di residenza cambiano. In particolare aumentano per il fatto che le dimensioni geometriche sono maggiori. Questo fatto è chiaramente visibile dall'esame comparato delle figure 9 e 10 dove riportiamo le traiettorie delle particelle colorate con i tempi di residenza: in uscita si vedono particelle che sono rimaste all'interno della camera di combustione per un tempo maggiore.

Questo stato di cose ha una influenza anche sulle altre variabili. Dall'esame delle figure 1 e 2 si vede che la maggior parte della fase carboniosa brucia nella prima parte della camera di combustione relativa alla potenza maggiore (50MW), mentre nel caso della potenza minore la combustione arriva fin oltre la metà della camera di combustione. Per entrambe le potenze, comunque, osservando le figure 7 e 8 si può osservare che le particelle arrivano completamente bruciate in prossimità dell'uscita del combustore.

Per quanto riguarda il campo di temperature, osservando le figure 11 e 12, è da notare come si abbia una sostanziale uniformità di comportamento del combustore da 5MW e di quello da 50MW. E' questo un importante risultato in quanto aumentando il carico termico di un combustore, effettuando lo scaling, non si vogliono variare le temperature in uscita del combustore stesso.

Granulometria grossa

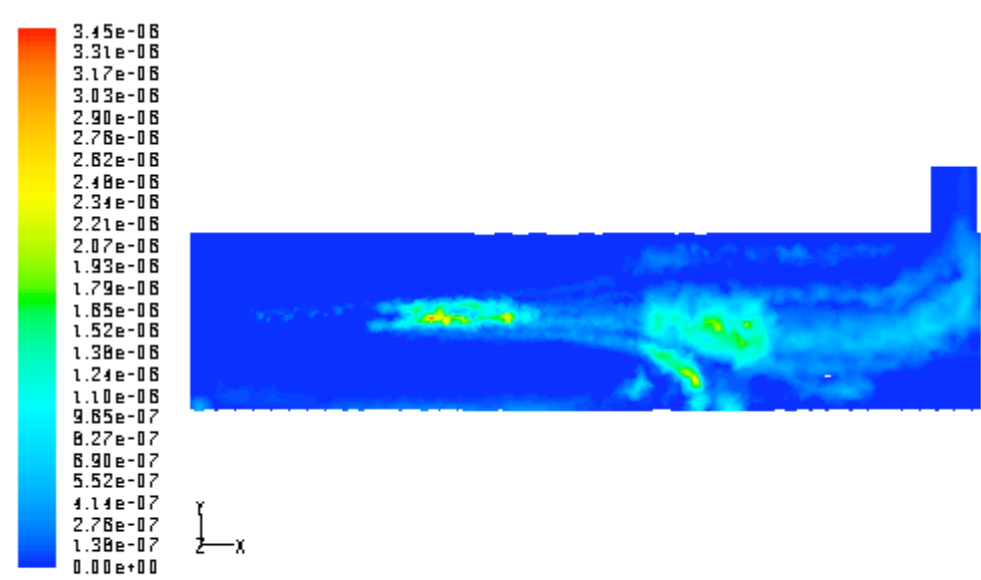


Fig. 13 DPM Burnout (kg/s) 5MW

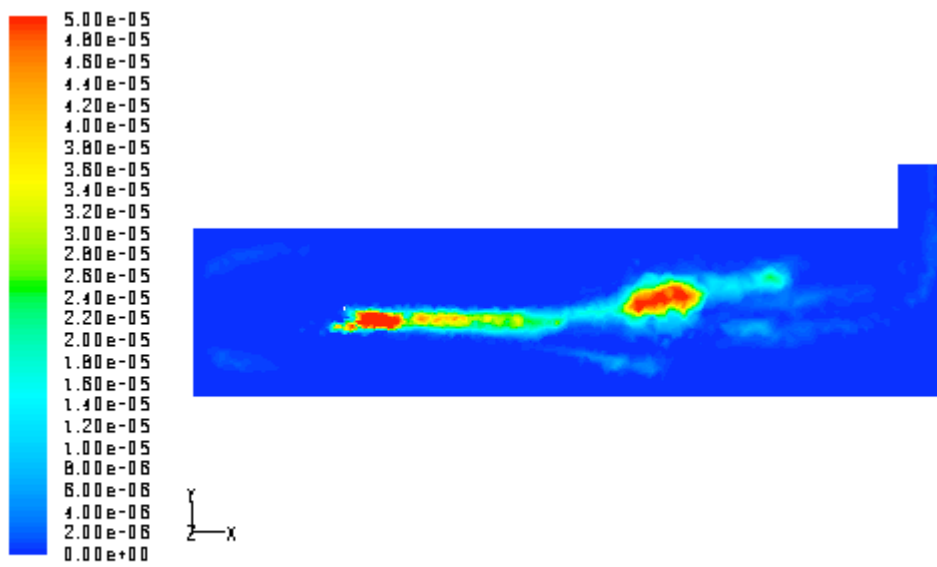


Fig. 14 DPM Burnout (kg/s) 50MW

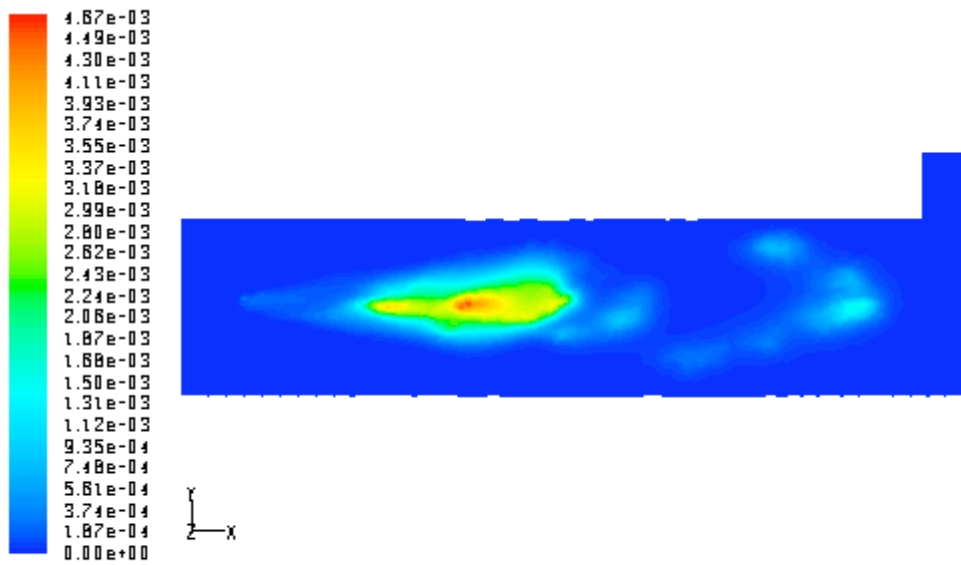


Fig. 15 CH4 Mass Fraction 5MW

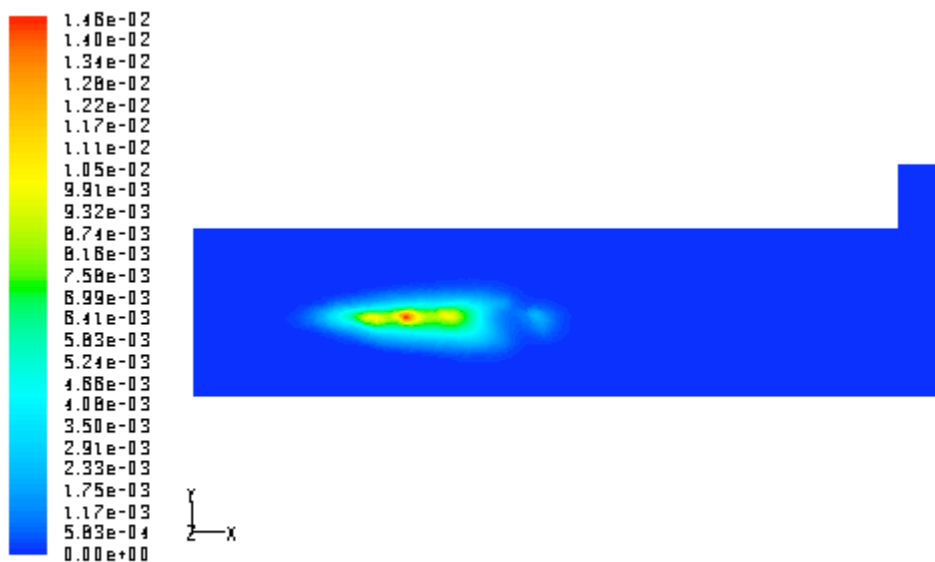


Fig.16 CH₄ Mass Fraction 50MW

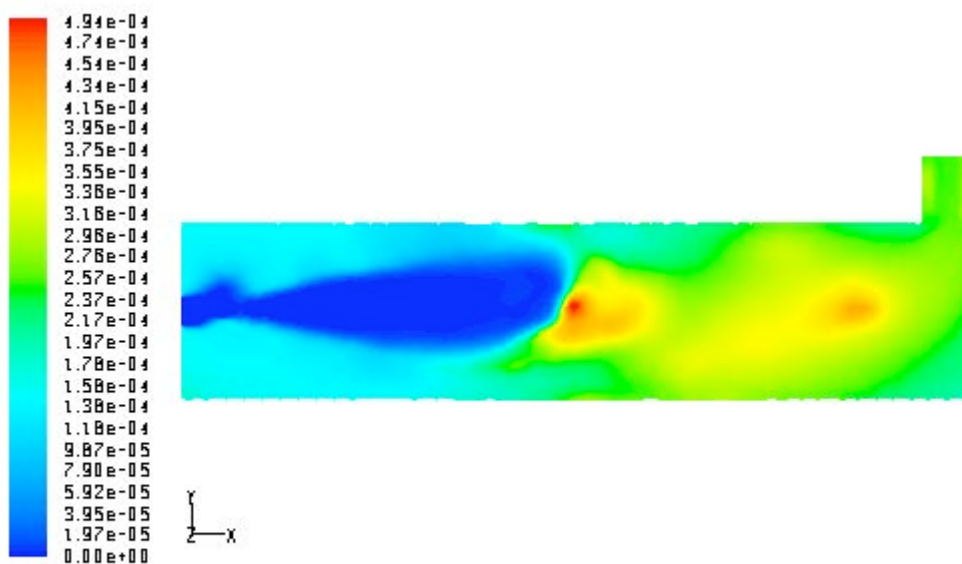


Fig. 17 OH Mass Fraction 5MW

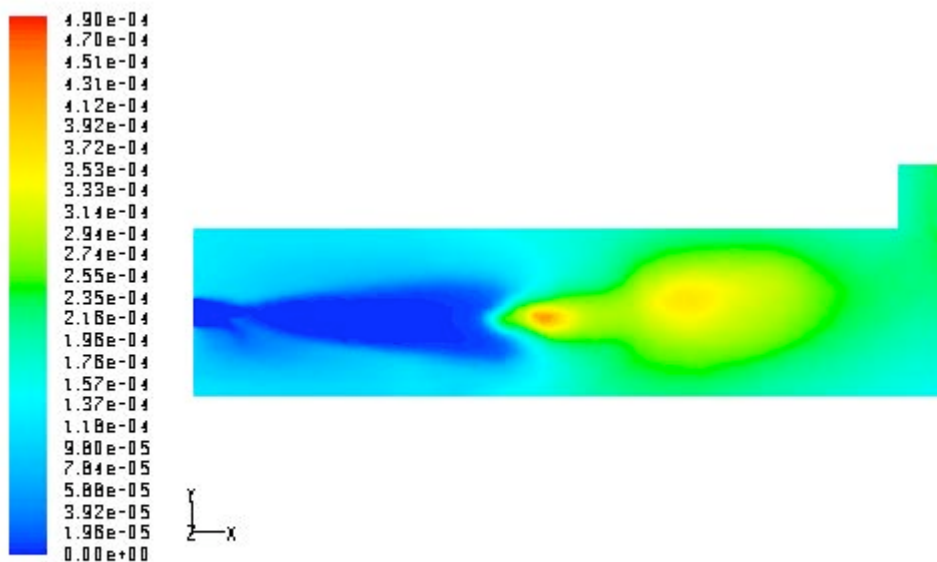


Fig. 18 OH Mass Fraction 50MW

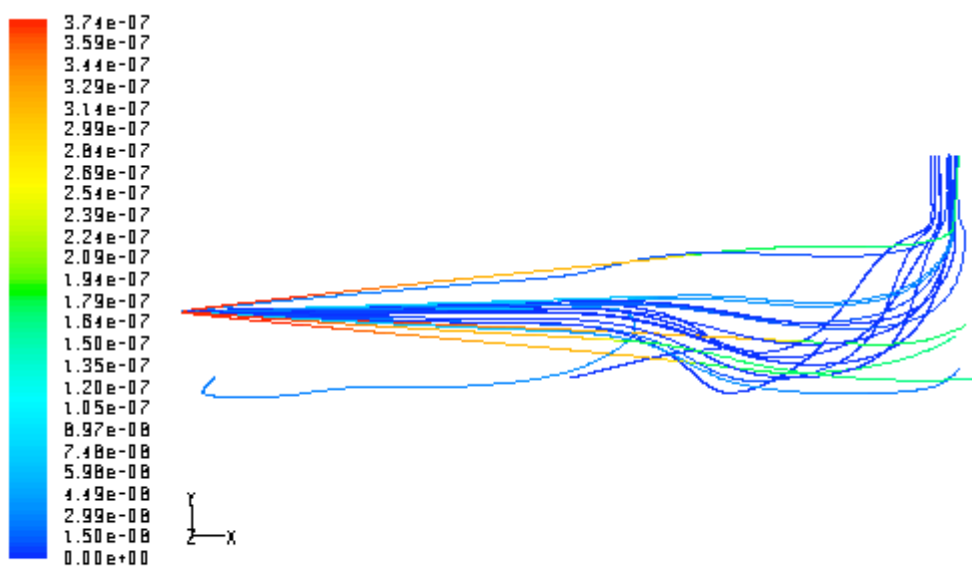


Fig. 19 Particle Mass (kg) 5MW

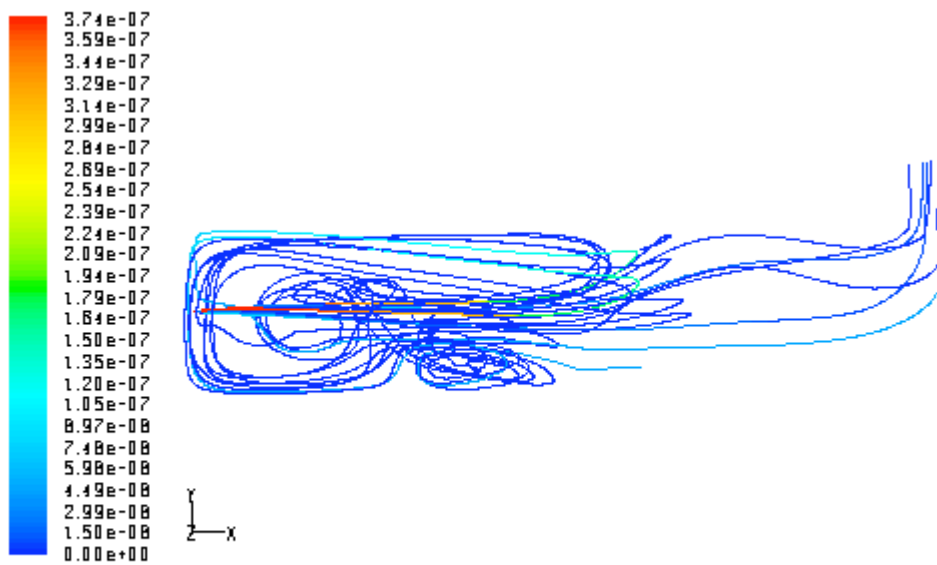


Fig. 20 Particle Mass (s) 50MW

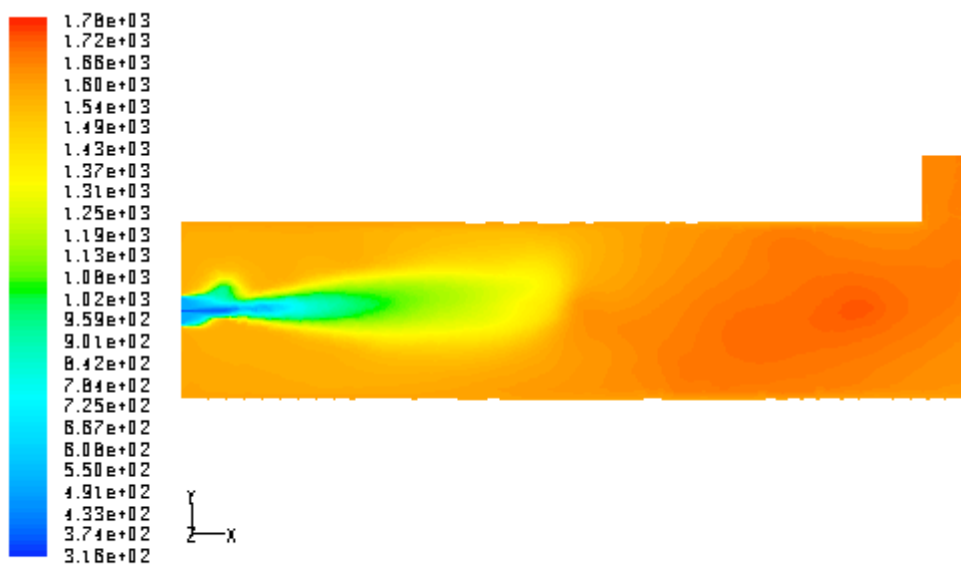


Fig. 21 Temperature (K) 5MW

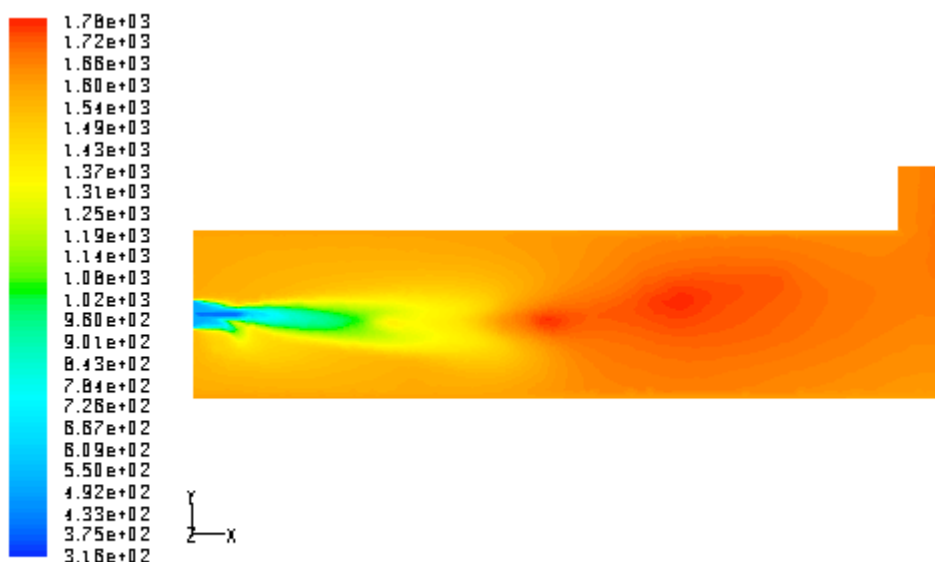


Fig. 21 Temperature (K) 50MW

Nel caso della granulometria più grossa, accanto a considerazioni analoghe al caso della granulometria più fine, si devono fare alcune osservazioni legate proprio alla tipologia di granulometria, la quale determina una ulteriore differenza di comportamento tra i due combustori.

Una prima osservazione che si può fare è che mentre nel caso della granulometria fine le particelle arrivano già completamente combuste all'uscita per entrambe le potenze, nel caso della granulometria grossa la lunghezza del combustore più piccolo non è sufficiente a far sì che le particelle brucino completamente. Inoltre, in questo caso, il moto di tali particelle è dominato dall'inerzia, per cui ricircolano poco e vanno direttamente verso l'uscita ed una frazione non trascurabile urta il fondo del combustore.

Conclusioni e sviluppi futuri

Gli studi fin qui effettuati sul combustore ISOTHERM ci permettono di dire che, in generale, l'effetto della verticalità del reattore, dal punto di vista dei campi ottenuti, è da ritenersi trascurabile per quanto riguarda i campi termici e di concentrazione delle specie chimiche [7]. Per quanto riguarda lo slurry di carbone ed i residui della loro combustione (ceneri), invece, nel caso di

configurazione ad asse orizzontale, si determina, soprattutto nel caso della granulometria più grossa, un accumulo di particelle di slurry parzialmente combuste e di ceneri sul fondo della camera di combustione, verso il basso in prossimità della parte terminale della camera stessa. Risulta quindi opportuno indagare ulteriormente il processo di oxy-combustione all'interno del reattore. Come sviluppi futuri prossimi si può prevedere di effettuare uno studio, analogo a quello qui illustrato, nel quale si utilizzino altri criteri di scalatura come ad esempio il criterio della invarianza del tempo di residenza delle particelle.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Spalding, D. B., *Ninth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1962, p. 833.
- [2] Bee' r, J. M. and Chigier, N. A., *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers Ltd., London, 1972.
- [3] Damköhler, G., *Elektrochem* 42:846 (1936)
- [4] Lefebvre, A., H., *Progr. Energy Combust. Sci.*, 6, 233, (1980).
- [5] Kim, K. Y. and Marshall, W. R., *AIChE J.*, 17, 575, (1971).
- [6] Shirley C. Tsai and True Vu, *Fuel*, 66, (1987).
- [7] A. Di Nardo, G. Calchetti, B. De Caprariis, G. Calchetti, N. Verdone, C. Mongiello, *Modelli avanzati di combustione del carbone e della produzione di inquinanti. Simulazioni CFD del reattore ISOTHERM-ITEA alimentato con carbone Sulcis. II parte*, 2009