

OTTIMIZZAZIONE DI UN POST – COMBUSTORE DI UN IMPIANTO DI TERMODISTRUZIONE PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI INQUINANTI

– Applicazione della tecnica OVER FIRE AIR –

S. Brusca, R. Lanzafame

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica
Facoltà di Ingegneria – Università degli Studi di Catania
Viale A. Doria, 6 – 95125, CATANIA

ABSTRACT

Nell'ambito dell'ampia attività di ricerca, svolta in collaborazione della Società GE.S.P.I. S.r.l. di Augusta (SR), riguardante l'ottimizzazione degli impianti industriali nei riguardi le emissioni inquinanti, è stata effettuata un'analisi teorico–sperimentale dell'impatto della tecnica di combustione a stadi “Over Fire Air” (OFA) sulla formazione degli inquinanti di un impianto di termodistruzione per rifiuti industriali e speciali di proprietà della stessa GE.S.P.I..

A tal fine è stato costruito un modello matematico del post–combustore dell'impianto di termodistruzione utilizzando un codice CFD commerciale (Computational Fluid Dynamic). Il modello CFD è stato tarato e validato utilizzando i risultati ottenuti tramite un'intensa campagna di prove sperimentali, finalizzata alla completa caratterizzazione del funzionamento dell'impianto di termodistruzione e alla valutazione dell'impatto di tale tecnica sulle emissioni inquinanti con particolare riguardo agli ossidi di azoto.

Il confronto tra i risultati numerici e i dati sperimentali ha permesso di valutare l'efficacia e l'accuratezza del modello matematico realizzato, nonché i vantaggi derivanti dall'applicazione di una simile tecnica sulle emissioni di inquinanti al camino. Il modello CFD ha consentito, inoltre, di evidenziare i percorsi di formazione e distruzione degli NO_x al variare dei rapporti di miscela tra la zona primaria e la zona OFA.

INTRODUZIONE

La gestione dei rifiuti solidi, urbani ed industriali, con l'incremento delle quantità prodotte e la riduzione delle discariche attrezzate, risulta essere un problema di difficile gestione sia in Italia che in tutta Europa [1 e 2]. Per porre rimedio a tali difficoltà sono state studiate strategie d'azione quali la raccolta differenziata, la termovalorizzazione dei rifiuti in senso energetico, etc [3].

Di fatto, i sistemi per la produzione d'energia dai rifiuti possono essere visti in funzione della loro influenza sugli equilibri ambientali, del loro effetto positivo sul bilancio energetico ed economico nazionale, del contributo alla riduzione del collocamento improduttivo in discarica, della compatibilità delle scelte con le direttive politiche e con il concetto di sviluppo sostenibile [3].

Un aspetto di particolare interesse riguarda la combustione dei rifiuti solidi. Gli impianti di termodistruzione devono poter consentire elevati rendimenti energetici e una efficiente produzione ed utilizzazione dell'energia. Fra l'altro questa è l'unica tecnologia che consente, in ragione del possibile recupero d'energia, un bilancio economicamente positivo. Gli impianti d'incenerimento con recupero energetico devono pertanto inserirsi e integrarsi correttamente in un sistema globale di gestione dei rifiuti, studiato in modo da ottimizzare i benefici ambientali, sociali ed economici.

La combustione della parte più energetica del rifiuto può rappresentare la soluzione ottimale purché vengano posti in atto gli accorgimenti impiantistici necessari a minimizzare i rischi la salute dell'uomo e per l'ambiente.

La diffusione degli impianti di termodistruzione ha condotto, infatti, ad una crescente preoccupazione dell'opinione pubblica per le ripercussioni dell'esercizio degli stessi sulla qualità dell'aria e, quindi, sulla salute della popolazione intorno al sito dell'impianto. Di conseguenza, si è assistito nel tempo all'emanazione da parte della Comunità Europea e dei Governi Nazionali di Normative che impongono limiti d'emissione e prescrizioni d'esercizio sempre più stringenti. L'adeguamento degli impianti a tali vincoli di legge ha richiesto l'implementazione e lo sviluppo di apposite tecnologie, per cui la sezione di depurazione dei fumi è diventata una delle componenti di maggior peso nei moderni sistemi [4, 5 e 6].

In tale ambito è stato analizzato, sia dal punto di vista teorico che sperimentale, l'impatto della tecnica di combustione a stadi Over Fire Air (OFA) sulle emissioni e l'esercizio di un impianto di termodistruzione per rifiuti industriali e speciali [9].

A tal fine è stato costruito un modello matematico del post-combustore di tale impianto utilizzando un codice di Computational Fluid Dynamics (CFD) commerciale [11, 12 e 13], in modo da effettuare lo studio della formazione degli inquinanti nella zona di combustione e ottimizzare l'esercizio dell'impianto nei riguardi delle emissioni stesse. È stata inoltre condotta un'intensa attività sperimentale al fine di caratterizzare l'impatto della tecnica in questione sul funzionamento dell'inceneritore e validare i modelli numerici utilizzati nelle simulazioni.

L'IMPIANTO DI TERMODISTRUZIONE

L'impianto di smaltimento per termodistruzione in questione appartiene alla categoria dei forni semi-pirolitici a combustione controllata. Nasce da esigenze di carattere generale determinate soprattutto dalla composizione del materiale da trattare e, data la sua versatilità, è destinato ad accogliere una vasta gamma di rifiuti solidi. A causa dell'estrema eterogeneità, per composizione e per stato di aggregazione delle tipologie di rifiuti elaborabili, è necessaria una corretta operazione di miscelazione. Nel caso specifico, tale tipologia di forno possiede una caratteristica che lo differenzia sostanzialmente dai forni statici tradizionali, ovvero presenta una camera di combustione principale rotante. Ciò comporta diversi vantaggi:

1. viene favorita una rapida e completa operazione di carico ed una razionale sistemazione dei materiali all'interno dello stesso, in quanto il materiale liquido e semiliquido si amalgama con i rifiuti solidi permettendo agli stessi di subire un processo di omogeneizzazione evitando la formazione di zone preferenziali;
2. accelerazione rilevante del processo di termodistruzione;
3. i gas di pirolisi prodotti, diffondendosi all'interno della massa di rifiuti ne provocano il riscaldamento uniforme regolarizzando in tal modo il processo di decomposizione;
4. l'evacuazione delle scorie in modo rapido e razionale senza intervento manuale e con ridotta fuoriuscita di polveri.

La rotazione consente, dunque, di ovviare alle principali carenze dei forni pirolitici statici, nei quali la combustione di materiale poco infiammabile, ad elevato contenuto di umidità, richiede tempi lunghissimi e dove lo scarico delle ceneri avviene con intervento manuale da parte dell'operatore.

L'inceneritore è sostanzialmente costituito da una camera di combustione principale rotante, seguita da una camera di combustione fissa. Il layout dell'impianto prevede inoltre un sistema di caricamento semiautomatico e un sistema di scarico delle ceneri. Le caratteristiche geometriche

principali sono riportati nella Tabella I, mentre nelle Figure 1 e 2 sono riportati rispettivamente uno schema dell'impianto e alcune fotografie dello stesso.

Tabella I

Caratteristiche geometriche dell'impianto di termodistruzione

Descrizione	Valore	Unità
Lunghezza	7	m
Lunghezza con caricatore	11	m
Larghezza	7	m
Altezza camino	15	
Massa totale impianto	35.000	kg

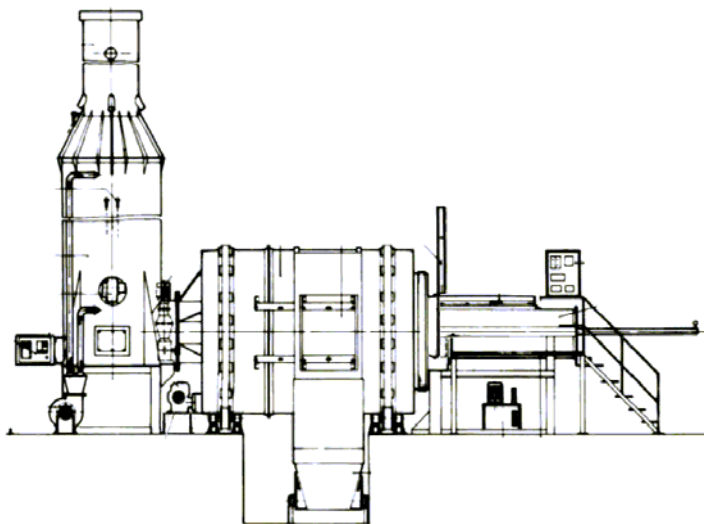


Figura 1

Schema dell'impianto di termodistruzione



Figura 2

Camera principale, caricatore meccanico e sistema di post – combustione

La capacità di smaltimento per ciascuno dei tre forni presenti in impianto è pari a circa 4.000 Mg/anno.

I quantitativi annui di materiale trattato sono riportati nel grafico di Figura 3, mentre i volumi di ceneri prodotte sono mostrati in Figura 4.

È opportuno sottolineare che i valori riportati in tali diagrammi sono relativi al primo dei tre forni gemelli dalla sua entrata in esercizio nel 1996.

TECNICA DI COMBUSTIONE OFA

La tecnica “Over Fire Air” (OFA) [14] è la più diffusa applicazione commerciale della combustione a due stadi.

Tale tecnica consiste nel generare all'interno della camera di combustione due zone: una

primaria riducente in cui, attraverso il bruciatore principale, vengono iniettati il combustibile ed una parte dell'aria di comburente (aria primaria), ed una secondaria ove, mediante un opportuno sistema di introduzione (porte OFA) viene insufflata l'aria secondaria necessaria al completamento della combustione. La Figura 5 mostra uno schema funzionale della combustione a stadi applicata al post-combustore.

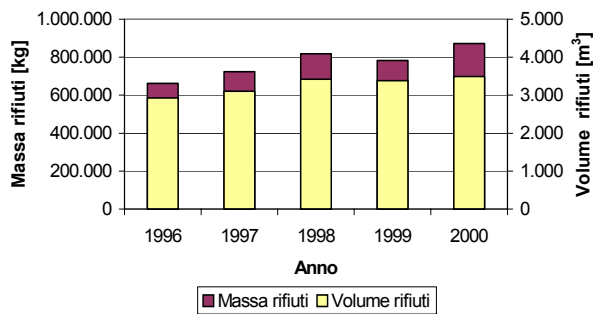


Figura 3

Quantità di rifiuti trattati al 30 ottobre 2000

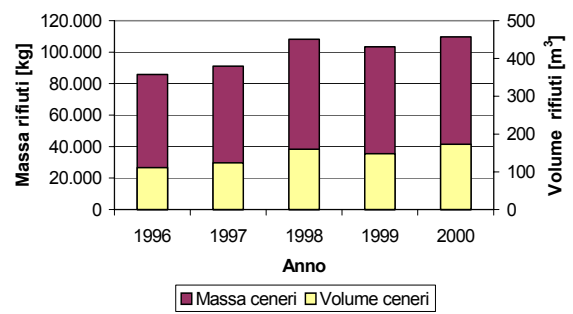


Figura 4

Quantità di ceneri smaltite al 30 ottobre 2000

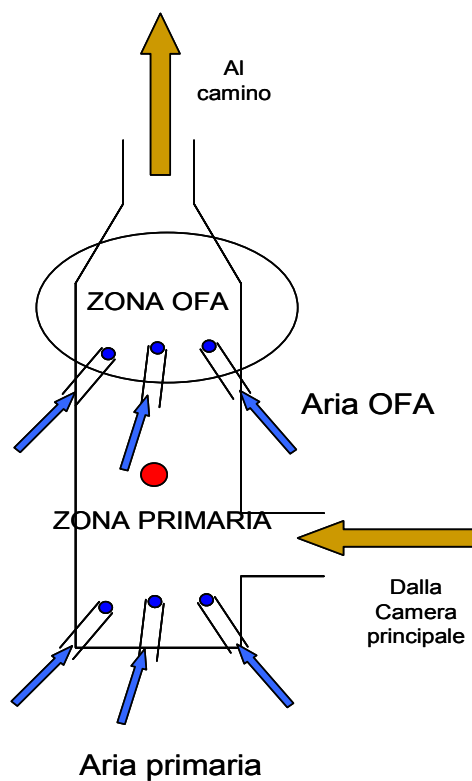


Figura 5

Schema di principio dell'applicazione della tecnica OFA al post-combustore dell'impianto di termodistruzione

L'efficacia di tale tecnica dipende dal livello di penetrazione e di miscelamento dell'aria secondaria con i prodotti di combustione della zona primaria. Infatti, il maggiore problema riscontrato con la tecnica OFA consiste nell'elevata produzione di incombusti conseguenti al ridotto

valore della dosatura nella zona primaria ed alla loro incompleta eliminazione successiva a causa dell'imperfetta miscelazione in zona secondaria.

Per tale motivo non è possibile eccedere con la riduzione del valore di dosatura; essa va scelta, quindi, opportunamente per raggiungere un compromesso tra l'abbattimento degli NO_x e la produzione di incombusti solidi e gassosi.

La scelta di applicare tale tecnica primaria di riduzione degli NO_x è stata dettata dalla particolare geometria della camera di post-combustione dell'impianto in esame, che prevede due schiere di ugelli poste una al di sotto e l'altra al di sopra della fiamma.

MODELLO MATEMATICO

L'attività svolta per realizzare il modello matematico del post-combustore, al fine di ottimizzarne il funzionamento dal punto di vista delle emissioni inquinanti in atmosfera, può essere suddivisa nelle seguenti fasi principali:

- rilievo e restituzione grafica della camera di post-combustione;
- generazione della mesh della camera;
- determinazione delle condizioni al contorno;
- verifica delle congruenze del modello.

Per ciò che concerne il primo punto, la restituzione grafica 3D è stata realizzata utilizzando un CAD 3D commerciale (RHINOCEROS). Il modello 3D è stato realizzato come insieme di solidi semplici; le operazioni booleane, necessarie per ottenere un unico volume, sono state effettuate utilizzando l'utilità di generazione dei domini di calcolo dello stesso FLUENT (GAMBIT). In tale ambiente è stata, quindi, generata la mesh del post – combustore, che rappresenta la discretizzazione spaziale del dominio di calcolo [11].

La Tabella II riporta le statistiche della mesh realizzata, mentre la Figura 5 ne mostra una vista tridimensionale in ambiente GAMBIT.

Tabella II
Statistiche della mesh di volume realizzata

Caratteristica	Valore
Celle	73712
Facce	158813
Nodi	18762

Per effettuare le simulazioni è stato scelto il *segregated solver* che permette la risoluzione delle equazioni in modo sequenziale e quindi con elevata efficienza di calcolo, ma soprattutto perché tale tipologia di solutore si adatta particolarmente allo studio della formazione degli NO_x . Per modellizzare la turbolenza nel dominio di calcolo è stato scelto il modello $k - \epsilon$ standard, che risulta adatto alla simulazione di flussi turbolenti in camere di combustione o post-combustione.

Al fine di validare il modello matematico realizzato, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni con i dati sperimentali relativi ai test in regime stazionario e in assetto standard.

Tale confronto teorico – sperimentale è mostrato nelle Figure 7, 8 e 9, che riportano i valori esitati dalle corse di simulazione e i risultati sperimentali relativamente alla temperatura dei fumi, alla concentrazione di ossigeno nei fumi, nonché le quantità dei principali inquinanti (CO, NO_x, SO_x) emesse al camino.

Dall’analisi dei diagrammi sopra riportati è possibile rilevare che l’errore delle simulazioni rispetto ai dati sperimentali risulta relativamente piccolo (inferiore al 5), e concludere che il modello matematico costruito è in grado di modellizzare correttamente il funzionamento reale.

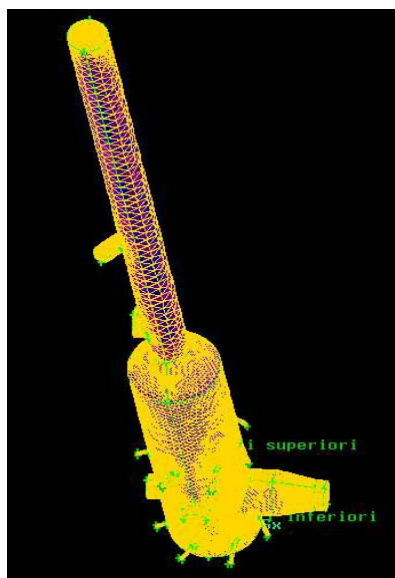


Figura 6
Vista 3D della mesh di volume realizzata

APPLICAZIONE DELLA TECNICA OFA

Verificata l’affidabilità e l’accuratezza del modello matematico, è stato studiato il funzionamento dell’impianto in assetto OFA sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

L’applicazione di tale tecnica è stata effettuata semplicemente variando la percentuale dell’aria di post-combustione tra la schiera di ugelli superiori ed inferiori lasciando inalterata la portata massica totale. La distribuzione d’aria utilizzata è riportata nella Tabella III. È opportuno sottolineare che non è stata effettuata nessuna modifica strutturale all’impianto.

Tabella III
Distribuzione dell’aria tra gli ugelli superiori ed inferiori in assetto OFA

	PERCENTUALE ARIA	
	UGELLI SUOPERIORI	UGELLI INFERIORI
CASO A	60	40
CASO B	70	30
CASO C	80	20
CASO D	90	10
CASO E	100	0

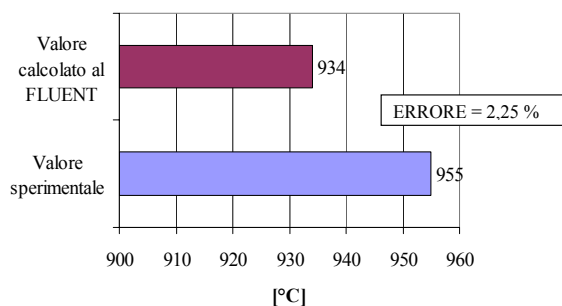


Figura 7
Temperatura sperimentale e simulata

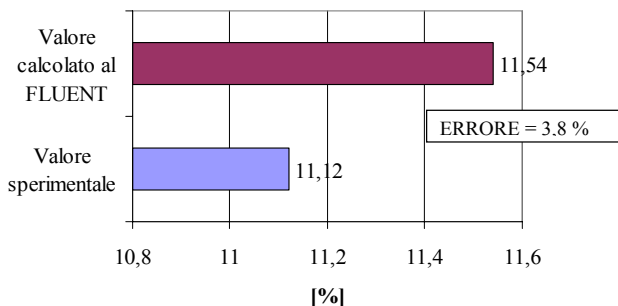


Figura 8
Frazione massica di ossigeno molecolare sperimentale e simulata

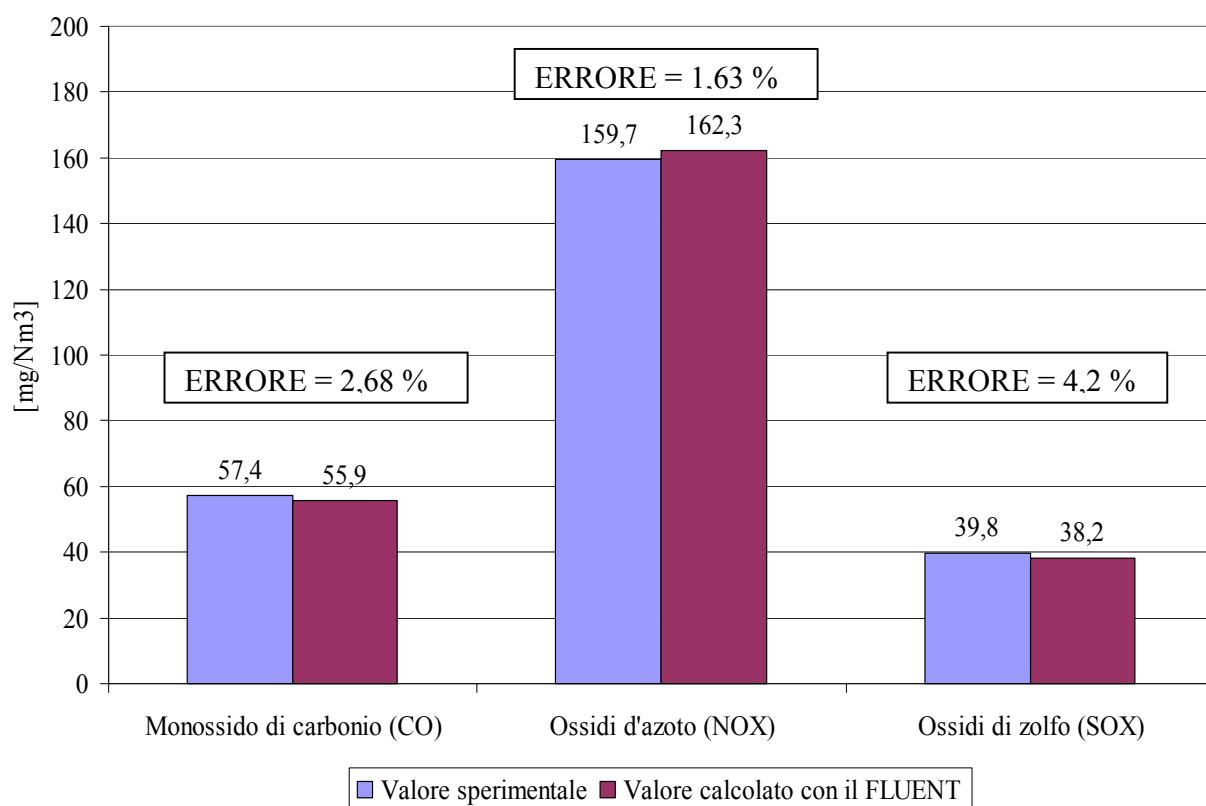


Figura 9
Confronto teorico – sperimentale quantità di monossido di carbonio, ossidi di azoto e di zolfo emesse al camino

Dall'analisi dei risultati esitati dalle corse di simulazione in regime stazionario è ben evidente che aumentando la portata d'aria alla schiera di ugelli superiore rispetto a quella inferiore la frazione massica degli ossidi d'azoto diminuisce (Figura 11). Ciò conferma la "bontà" dell'applicazione di una siffatta tecnica di riduzione delle emissioni. È, inoltre, osservabile che la variazione degli NO_x è accompagnata da una riduzione della temperatura dei fumi al camino (Figura 10). Tale temperatura deve essere mantenuta al di sopra di 850 °C per imposizione di legge. Dall'analisi del grafico riportato in Figura 10 appare chiaro che non è possibile utilizzare una percentuale di aria agli ugelli superiori più elevata del 70 % rispetto alla portata massica totale.

È stata effettuata, quindi, una campagna di prove sperimentali relativamente alle percentuali di portata massica 50, 60 e 70 % rispetto alla portata d'aria totale.

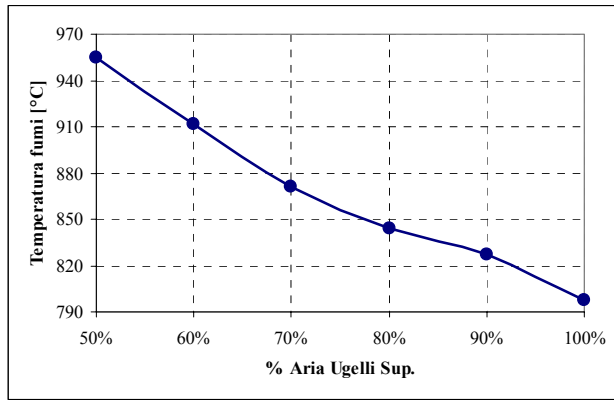


Figura 10

Variazione della temperatura con la percentuale di aria agli ugelli superiori rispetto agli inferiori

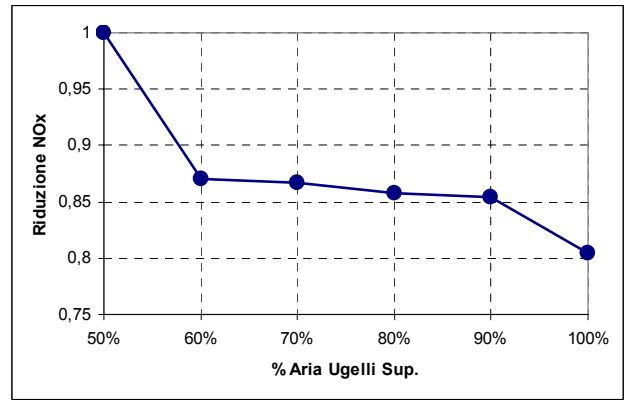


Figura 11

Variazione delle emissioni di NO_x con la percentuale di aria agli ugelli superiori rispetto agli inferiori

I risultati delle prove sperimentali hanno dimostrato come l'applicazione della tecnica OFA sia un ottimo rimedio per la riduzione delle emissioni di ossidi d'azoto da parte dell'impianto di termodistruzione. Tali misure hanno, inoltre, confermato ulteriormente la validità del modello matematico generato e della grande affidabilità dei CFD nelle applicazioni di termo-fluidodinamica.

Infatti i valori misurati si discostavano da quelli esitati dalle simulazioni in maniera marginale. Ciò è spiegabile tenendo presente la non perfetta omogeneità della carica nel forno e le necessarie approssimazioni fatte nella realizzazione del modello matematico.

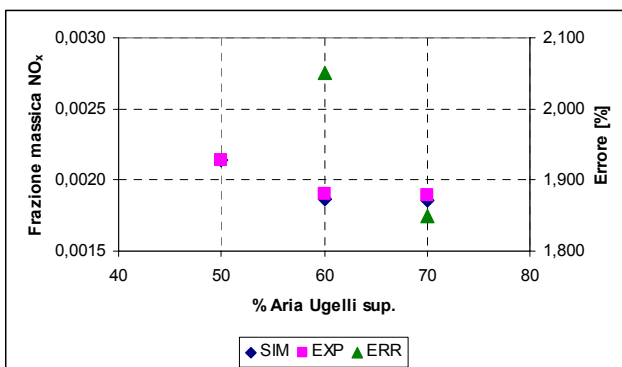


Figura 12

Andamento della frazione massica degli ossidi di azoto al variare della percentuale di aria agli ugelli superiori

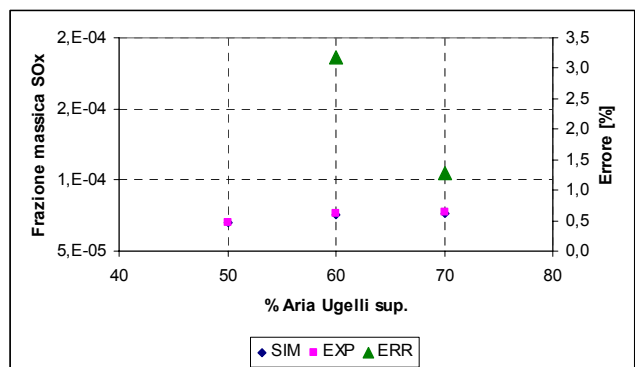


Figura 13

Andamento della frazione massica degli ossidi di zolfo al variare della percentuale di aria agli ugelli superiori

Nei diagrammi riportati nelle Figure 12 e 13 sono mostrati gli andamenti delle frazioni massiche nei tre casi considerati. Nelle medesime figure sono inoltre mostrati i valori ottenuti tramite simulazione. In tali diagrammi è stato inoltre riportato l'errore percentuale commesso.

Dall'analisi dei risultati è possibile osservare una buona riduzione degli ossidi d'azoto (pari a circa il 15 %), mentre si è registrato un leggero incremento delle emissioni di ossido di zolfo (pari a circa il 9 %).

L'incremento della concentrazione degli ossidi di zolfo non risulta un grosso problema per la gestione dell'impianto, prima di tutto per le ridottissime frazioni massiche prodotte e anche perchè

l'impianto è dotato di un sistema di post – trattamento di tali composti.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito di un'ampia attività di ricerca finalizzata all'applicazione e all'ottimizzazione di tecniche di combustione, primarie e secondarie, per la riduzione della formazione degli inquinanti durante il processo di combustione.

Scopo principale della presente ricerca è stato l'implementazione e l'ottimizzazione della tecnica di combustione Over Fire Air al post – combustore di un impianto di incenerimento, al fine di ottenere una riduzione degli ossidi d'azoto emessi al camino durante il ciclo di termodistruzione. A tal fine, è stato realizzato un modello matematico di tale componente dell'impianto utilizzando un codice di calcolo CFD commerciale.

Il confronto tra i risultati numerici e i dati sperimentali mostra un efficace ed accurata predittività del modello realizzato, che, quindi, può essere utilizzato per lo studio della formazione degli inquinanti nelle zone di combustione primaria e secondaria. La comparazione è da ritenersi accettabile. Gli errori presenti (3 – 4 % al massimo) possono essere certamente attribuiti alle approssimazioni effettuate in fase di realizzazione del modello matematico stesso.

L'analisi dei risultati mostra chiaramente una riduzione della concentrazione degli ossidi d'azoto al camino di circa il 18 – 19 %, tuttavia a causa del vincolo imposto dalle norme che regolamentano il settore e che impongono una temperatura minima dei gas al camino pari ad 850 °C, tale valore si è abbassato intorno al 18 %.

Dai risultati ottenuti dalla campagna di prove sperimentali, si è osservato che la concentrazione degli NO_x può subire un reale abbattimento che si attesta su valori di circa il 15 %. Con una tale riduzione si è arrivati a valori delle emissioni che affrancano dall'implementazione di costose tecniche di lavaggio fumi, con la conseguente efficace riduzione dei costi d'impianto e d'esercizio.

In conclusione, è possibile, inoltre, affermare che lo strumento di calcolo utilizzato consente di progettare ed ottimizzare gli impianti industriali sia dal punto di vista del processo che nei riguardi dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- 1) M. di Fidio, (1982) *Gestione dei rifiuti- tecniche e organizzazione per lo smaltimento e il riciclaggio*, Pirola Editore, Milano
- 2) P. Ficco, P. Fimiani, F. Gerardini, (1999) *La gestione dei rifiuti – Il nuovo sistema dopo il “Decreto Ronchi”*, Edizioni Ambiente, Milano
- 3) A. Frigerio, F. Fardini, (1996) *Smaltimento e recupero dei rifiuti*, GSISR, Milano
- 4) R. Bona, D. Sordelli, (1993) *Il controllo delle emissioni atmosferiche di impianti industriali*, FrancoAngeli, Milano
- 5) L. Corbo, D. Dell'Erba, (1991) *Energia dai rifiuti – Tecniche di incenerimento e recupero dei rifiuti speciali, tossici e nocivi*, ETASLIBRI, Milano
- 6) A. Gerli, G. Riva, E. Smedile, (1998) *L'energia dai rifiuti – Dalla gestione al recupero energetico*, Editori Riuniti, Roma
- 7) A. Frigerio, F. Fardini, (1996) *Inquinanti atmosferici primari e secondari*, GSISR, Milano
- 8) A. Cavallini, L. Mattarolo, (1990) *Termodinamica applicata*, CLEUP, Padova
- 9) R.A Strehlow, (1985) *Combustion Fundamentals*, McGraw-Hill
- 10) G. Guglielmini, C. Pisoni, (1990) *Elementi di trasmissione del calore*, Veschi, Milano

- 11) Fluent Inc. , (1999) *GAMBIT Documentation*
- 12) Fluent Inc. , (1999) *FLUENT 5 Documentation*
- 13) G. De Michele (1991), *Abbattimento degli inquinanti durante la combustione: la caldaia come reattore chimico*, Atti della Scuola sulla Combustione Stazionaria in Firenze
- 14) G. De Michele, L. Ghiribelli, s. Pasini, G. Pedrelli, M. Livraghi, R. Tarli (1993), *Primary Technologies for NOx reduction in ENEL fossil-fired boilers*, UNIPEDE / IEA Conference, Hanburg, Germany
- 15) J. A. Miller, C. T. Bowman (1989), *Mechanism and Modelling of Nitrogen Chemistry in Combustion*, Prog. Energy Combust. Sci., Volume 15
- 16) J. A. Miller, C. T. Bowman, C. P. Fenimore (1971), *Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames*, 13TH Symposium (International) on Combustion