



CONSIGLIO
NAZIONALE
DELLE
RICERCHE

ISTITUTO DI RICERCHE SULLA COMBUSTIONE

CONSULENZA TECNICA RELATIVA AL FUNZIONAMENTO DEI FORNI A LETTO FLUIDO BOLLENTE DELLA SCARLINO ENERGIA

Relazione tecnica

Ing. Riccardo Chirone

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



CONSIGLIO
NAZIONALE
DELLE
RICERCHE

ISTITUTO DI RICERCHE SULLA COMBUSTIONE

Il personale coinvolto nell'attività di consulenza è costituito da:

Ing. Riccardo Chirone

Ing. Roberto Solimene

Ing. Massimo Urciuolo

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



INDICE

1. Premessa
 2. Introduzione
 3. Articolo 237-octies del Codice dell'Ambiente
 4. Combustibili alimentati e materiale del letto
 5. Caratteristiche geometriche dei forni
 6. Fluidodinamica di un letto fluido bollente a pareti inclinate e relative conseguenze nella gestione della zona "letto" dei forni
 7. Comportamento reattoristico della zona di postcombustione
 8. Confronto con la simulazione CFD condotta da TEA Engineering
 9. Valutazioni esemplificative sulle prestazioni reattoristiche della zona di postcombustione
 10. Conclusioni
 11. Modifiche costruttive e di esercizio necessarie per i forni di Scarlino Energia
- Riferimenti Bibliografici
- Descrizione dell'Istituto di Ricerche sulla Combustione del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)



1. Premessa

La presente relazione del contratto di consulenza tecnica su incarico dell'Avv. Fazzi in nome e per conto di ACCARDI AGATA + 89 vs SCARLINO ENERGIA nell'ambito della causa civile del tribunale di Grosseto RG 1994/2013 riguarda:

- 1) l'analisi dell'attuale configurazione dei combustori e delle condizioni tipiche di esercizio sulla base della documentazione fornita;
- 2) l'individuazione delle criticità della zona principale di combustione connesse al combustibile considerato e alle condizioni di fluidizzazione;
- 3) l'individuazione delle criticità della zona di postcombustione con particolare riferimento alle condizioni necessarie per il soddisfacimento del comma 3 dell'articolo 237-octies del Codice dell'Ambiente (d.legs. n.152 del 2003);
- 4) l'individuazione di possibili configurazioni e condizioni ottimali di funzionamento dei combustori in termini di efficienza di combustione e di impatto ambientale.

In particolare, l'attività risponderà ai seguenti quesiti:

- 1) Se i forni a letto fluido bollente della Scarlino Energia siano in grado di incenerire rifiuti urbani trattati, in particolare CSS classificato in base alle norme UNI Ce N/TS 15359 (combustibili solidi secondari classificazione e specifiche) di classe da 1.1.1 a 4.4.4. (più tipicamente classe 3.3.3.), e nella misura prevista dall'Autorizzazione AIA 2015 (19 Gcal/ora per il forno n. 1 e 23 Gcal/ora per ciascuno dei forni n. 2 e n.3, più il 10% di sovraccarico transitorio):
 - a) in conformità con le norme vigenti, in particolare in conformità con quanto disposto dall'Articolo 8 comma 3 DLgs 133/2005 e dall'Articolo 237-octies d.leg. n.152 del 2006, applicabili ratione temporis, con accettabili emissioni dai forni di polveri e altri inquinanti (in particolare diossine, diossin-like e metalli pesanti);
 - b) in condizioni di accettabile continuità di esercizio (in particolare in relazione alla stabilità della fluidizzazione del letto, alla produzione di scorie ed alla loro estrazione dal letto, alla polverosità emessa dai forni quale possibile causa di blocco d'impianto).



- 2) Se vi sia la necessità di eventuali interventi sui forni e quali siano questi interventi, affinché il loro esercizio sia conforme alle norme vigenti, ed inoltre risultati affidabile sotto plausibili aspetti ambientali e industriali.
- 3) Se allo scopo di effettuare le valutazioni di cui ai nn. 1) e 2) sopraddetti sia indispensabile ottenere ulteriori dati sperimentali di esercizio dei forni, oltre ai dati di esercizio già disponibili in base alle Relazioni Ispettivi di ARPAT n. GR.01.11.26/65-2013 e n. GR.01.11.26/117 – 2014 relative all'esercizio 2013-2014.

La documentazione a disposizione è la seguente:

- 1) Documenti di provenienza Scarlino Energia s.r.l.:
 1. Progetto Definitivo, Relazione Tecnica N. SE.224, 6/3/2015
 2. Scarlino Energia, Schema di processo, n. 6.1.2. Rev. 0, febbraio 2015
 3. Scarlino Energia, Planimetrie, n. 3.2.15 Rev.0, febbraio 2015
 4. Forno n. 1 Specifica di Processo, SiryChamon Impianti, Spc F05-060 ott. 1996
 5. Forno n. 2 Specifica di Processo, SiryChamon Impianti, Spc F05-021 ott. 1996
 6. Disegno Forno n. 1 (da misure effettuate dalla Ditta Eurotec con laser-scanner)
 7. Disegno Forno n. 2, tipico per il forno n. 3 (da misure effettuate dalla Ditta Eurotec con laser-scanner)
 8. Curva granulometrica della sabbia usata per il letto
 9. Specifica della sabbia usata per il letto
 10. Analisi fanghi (n. 2430-3244 – 19/10/2013, superamento limiti delle Direttive Europee)
 11. Relazione finale riavvio impianti – 12/12/2013 (intasamento da polveri dei generatori di vapore e del sistema De NOx , 7-16)
 12. Relazione superamento emissione diossine – 11/7/2013 (inadeguatezza dei Cicloni, pagine 42-43)
 13. Tea-Eng Modello fluidodinamico della zona di post-combustione.
 14. Domanda di autorizzazione integrata ambientale elaborato tecnico 1 relazione tecnica allegato 9 “Manuale SMCE”
- 2) Documenti di provenienza ARPAT:

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



1. Rapporto Ispettivo ARPAT GR.01.11.26/65 - 2013 (instabilità della fluidizzazione del letto, pag. 16,22,23, 24; elevati valori di COT e NOx pagine 32-40);
 2. Rapporto Ispettivo annuale ARPAT GR.01.11.26/117 – 2014 (indisponibilità d'impianto, pagine 13-23; elevati valori di COT e NOx pagine 32-40; misure di diossine e relative analisi pagina 49 e seguenti; anomalie nelle misure di polveri e CO; intasamento da polveri del De Nox, pagina 59; instabilità della fluidizzazione del letti, paragrafo 5.1 conclusioni);
 3. ARPAT GR.01.11.26/9.145 valutazioni Tecniche in merito all'impatto sul Canale di Ritorno a Mare per il Parametro Diossine-Furani Supp. BURT n.43 28.10.2015.
- 3) Documenti Autorizzativi:
1. Delibera della Giunta Regionale n. 979 del 12/10/2015, Allegato C1 (pagine da 13 a 20)
- 4) Documenti depositati dai CTU nel contenzioso Tribunale di Grosseto RG 1994/2013 e le Osservazioni di parte attrice:
1. Modalità di calcolo dei tempi di residenza dei fumi
 2. Tavole di calcolo dei tempi di residenza dei fumi
 3. Osservazioni di Parte Attrice ai calcoli dei tempi di residenza dei fumi
- 5) Altri documenti:
1. Diagramma De Faja, Portata specifica fumi in funzione del potere calorifico dei rifiuti -1996
 2. P. Rabitti, Osservazioni in merito all'emissione di diossine dall'inceneritore di Scarlino Energia - 8/10/2013

2. Introduzione

In figura 1, si riporta lo schema di processo dei forni della Scarlino Energia S.r.l. finalizzati alla termovalorizzazione di rifiuti solidi (RS) classificabili con classe minima del CSS pari a 4.4.4 e caratteristiche comprese tra la classe 1.1.1 e la classe 4.4.4 e al trattamento di rifiuti liquidi (RL). L'impianto è suddiviso in tre linee costituite dalla stessa tipologia di

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



Tabella 1 Caratteristiche dei forni dichiarate dalla Scarlino Energia S.r.l.

Linea	1	2 e 3	
Tipo forno	Letto fluido bollente	Letto fluido bollente	
Carico termico nominale, Gcal	19	23	
Fattore di sovraccarico discontinuo per tempi brevi, %	10	10	
Portata combustibile CSS (PCI 3266Kcal/kg), t/h	5.82t/h	7.04t/h	
Portata aria nominale, Nm ³ /h	40000 ±10%	48000 ±10%	
Velocità di fluidizzazione, m/s	2m/s	2m/s	
Caratteristiche zona di postcombustione			
Diametro interno, m	6.5	7.24	
Sezione interna, m ²	33.17	41.15	
Altezza (dopo ultimo ingresso aria), m	5.3	5.3	
Volume, m ³	176	218	
Portata nominale fumi, Nm ³ /h	49000	60000	
Temperatura media fumi, °C	850	1000	850 1000
Tempo medio di permanenza, s	3.1	2.8	3.2 2.8

In tabella sono riportate le caratteristiche geometriche e di processo della zona di postcombustione e il calcolo del tempo medio di permanenza in tale zona alle temperature di 850-1000°C. I valori calcolati da Scarlino Energia sono superiori a 2s in ottemperanza dell'articolo 237-octies del Codice dell'Ambiente (d.legs. n.152 del 2003).

3. Articolo 237-octies del Codice dell'Ambiente

L'articolo 237-octies del Codice dell'Ambiente (d.legs. n.152 del 2003) regola le condizioni di esercizio degli impianti di incenerimento e coincenerimento. In particolare il comma 3 recita: *“Gli impianti di incenerimento devono essere progettati, costruiti, equipaggiati e gestiti in modo tale che, dopo l'ultima immissione di aria di combustione, i gas prodotti dal processo di incenerimento siano portati, in modo controllato ed omogeneo, anche nelle condizioni più sfavorevoli, ad una temperatura di almeno 850° C per almeno due secondi. Tale*

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



temperatura è misurata in prossimità della parete interna della camera di combustione, o in un altro punto rappresentativo della camera di combustione indicato dall'autorità competente.” Tale comma, in sostanza, distingue la zona di combustione principale al di sotto dell'ultima immissione d'aria dove è richiesta la miscelazione fra il combustibile ed il comburente e la zona sovrastante, la zona di postcombustione, dove si portano a completa conversione le specie combustibili rimanenti. In particolare, il comma indica le condizioni principali e minimali del corretto funzionamento, nelle condizioni più sfavorevoli di esercizio della zona di postcombustione, in termini di temperatura e tempo di permanenza necessarie alla evoluzione dei processi chimici di conversione tipici di questa zona di reazione che riguardano la conversione dei prodotti incombusti sia gassosi che solidi quali CO, fuliggine, IPA e diossine. Al fine di pervenire alla completa conversione di tali specie, i fumi di combustione devono essere tenuti a 850°C per almeno 2 secondi in maniera controllata ed omogenea, ovvero tutta la corrente gassosa deve avere una medesima velocità e, quindi, permanere nel reattore almeno 2 secondi. Il comportamento reattoristico ideale che assicura questa condizione è quello del reattore a flusso a pistone che è caratterizzato da un tempo di permanenza del fluido nel reattore uniforme ed uguale al tempo medio di permanenza (funzione di distribuzione dei tempi di permanenza assimilabile ad un impulso, in termini matematici ad una delta di Dirac). Infatti, in questo caso, il comportamento di tale sistema reattoristico è da preferire in termini di conversione a parità di tempo medio di permanenza all'altro sistema ideale di riferimento, il reattore continuo a perfetta miscelazione (funzione di distribuzione dei tempi di permanenza assimilabile ad un decadimento esponenziale) in quanto le cinetiche dei processi in questione sono lineari nella concentrazione dei rispettivi reagenti. Nella pratica reattoristica significa che la zona di postcombustione deve essere progettata in modo tale che il suo comportamento sia il più possibile assimilabile al comportamento ideale di un reattore a flusso a pistone di tempo medio di almeno 2 secondi. Alternativamente, ma non in maniera del tutto in linea con la norma, il sistema reattoristico deve essere tale che il minimo tempo di permanenza (non il valore medio) della funzione di distribuzione dei tempi di permanenza sia almeno pari a 2 secondi.



4. Combustibili alimentati e materiale del letto

Il solido granulare impiegato nel reattore a letto fluidizzato è sabbia silicea con pezzatura 0.5-2.5mm. Una specifica così grossolana della distribuzione granulometrica della sabbia non tutela in condizioni di esercizio del letto fluidizzato che non avvenga la segregazione delle particelle più grossolane al fondo e delle più fini alla sommità del letto con conseguente peggioramento della qualità della fluidizzazione del letto. Risulta necessario indicare specifiche più stringenti del materiale solido da impiegare. Tipicamente, la sabbia impiegata in letto fluidizzato bollente ha diametro medio di Sauter (medio superficie/volume) intorno al 1mm con frazione di materiale inferiore al 5% per particelle di dimensioni sia minori di 0.5mm che maggiori di 1.4mm.

Il combustibile solido impiegato, CSS derivante da rifiuti solidi, è alimentato ai forni sfuso o in forma addensata e prima dello stoccaggio di esercizio è trattato mediante un deferrizzatore per eliminare eventuali materiali ferrosi. Tale pratica è particolarmente importante per la corretta gestione del combustore a letto fluidizzato, in quanto la presenza di materiali a densità maggiore della sabbia determina la loro stratificazione al fondo con conseguente peggioramento delle condizioni di fluidizzazione del letto in tale zona. È altresì importante che non siano presenti nel CSS materiali metallici ed inerti bassofondenti quali vetro o alluminio. La fusione di tali materiali all'interno del letto determina la formazione di agglomerati di particelle del letto con conseguente defluidizzazione, malfunzionamento del combustore e conseguente spegnimento. Dall'analisi della documentazione fornita si desume che nessun dispositivo o controllo è previsto che garantisca che tali materiali eventualmente presenti nel combustibile siano alimentati ai forni. Nel complesso, è necessario ribadire che per il corretto funzionamento di un combustore a letto fluidizzato bollente un controllo accurato del CSS alimentato, anche a campione, è indispensabile.

Il CSS derivante dai RS e la biomassa usata nei transitori tipicamente contiene metalli alcalini, per esempio, K che interagiscono chimicamente con la sabbia silicea producendo eutettici bassofondenti (composti chimici che fondono a temperatura più bassa dei composti originari). Questi composti determinano la formazione di agglomerati delle particelle che compongono il letto fluidizzato pregiudicandone il corretto funzionamento e determinandone lo spegnimento per assenza di fluidizzazione del materiale granulare. Tipicamente nei



combustori a letto fluidizzato bollente commercialmente in uso vengono alimentati materiali solidi che fungono da agenti antiagglomeranti. Dall'analisi della documentazione fornita si desume che nessuna procedura o controllo è previsto per prevenire i fenomeni di agglomerazione delle particelle del letto causati dall'interazione fra metalli alcalini e la sabbia silicea. Al contrario i rapporti ispettivi ARPAT evidenziano la presenza di fenomeni di agglomerazione di particelle del letto che hanno determinato fermi di impianto e discontinuità di esercizio. A tale riguardo si sottolinea l'importanza di adottare strategie di esercizio che limitano al massimo tali fenomeni per una corretta funzionalità dell'impianto.

5. Caratteristiche geometriche dei forni

Le caratteristiche geometriche del forno 1 e dei forni 2 e 3 prese come riferimento sono quelle ottenute dai rilievi sul campo mediante scanner 3D laser condotti da Eurotec e sono riportate nella figura 2. I forni possono considerarsi suddivisi in due zone: una prima al di sotto dell'alimentazione del combustibile ed una seconda di geometria cilindrica al di sopra. La prima zona chiamata zona "letto" nella relazione redatta da Scarlino Energia è sua volta composta, partendo dal basso, da una prima zona a geometria cilindrica dove sono presenti gli ugelli di fluidizzazione e da una zona conica. Le principali caratteristiche della zona letto sono riportate in tabella 2. Nel complesso, l'analisi della geometria dei forni evidenzia delle caratteristiche peculiari non riscontrabili nella geometria di combustori a letto fluido bollente attualmente in commercio o in uso [1]. Tale discordanza deriva principalmente dal fatto che le caratteristiche geometriche sono state progettate per l'arrostimento delle piriti. Tale processo chimico è eterogeneo e esotermico, ovvero l'ossigeno dell'aria ossida il solido granulare che forma il letto fluidizzato formando ossido ferrico (solido) ed anidride solforosa. Il processo chimico, quindi, avviene esclusivamente nel letto fluidizzato (dove è presente il solido), mentre nessuna reazione chimica ha luogo nella regione al di sopra del letto (freeboard) che funge esclusivamente da zona di disimpegno delle particelle: le particelle grossolane eiettate dalle bolle del letto fluidizzato hanno la possibilità di ricadere nel letto per azione della forza di gravità. La zona a geometria troncoconica riducendo la velocità del gas gioca un ruolo positivo in tale fenomeno. L'adattamento di tale geometria al processo di combustione di combustibili solidi ad alto tenore di volatili richiede particolare attenzione al

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



comportamento reattoristico e alla fluidodinamica nella zona al di sopra del letto fluidizzato in quanto una frazione consistente del calore generato dalla combustione deriva dalla combustione delle materie volatili che non avviene all'interno del letto fluidizzato ma ha luogo mediante reazioni omogenee (fra l'ossigeno e le specie combustibili gassose generate durante la degradazione termica del combustibile solido) in fase gassosa.

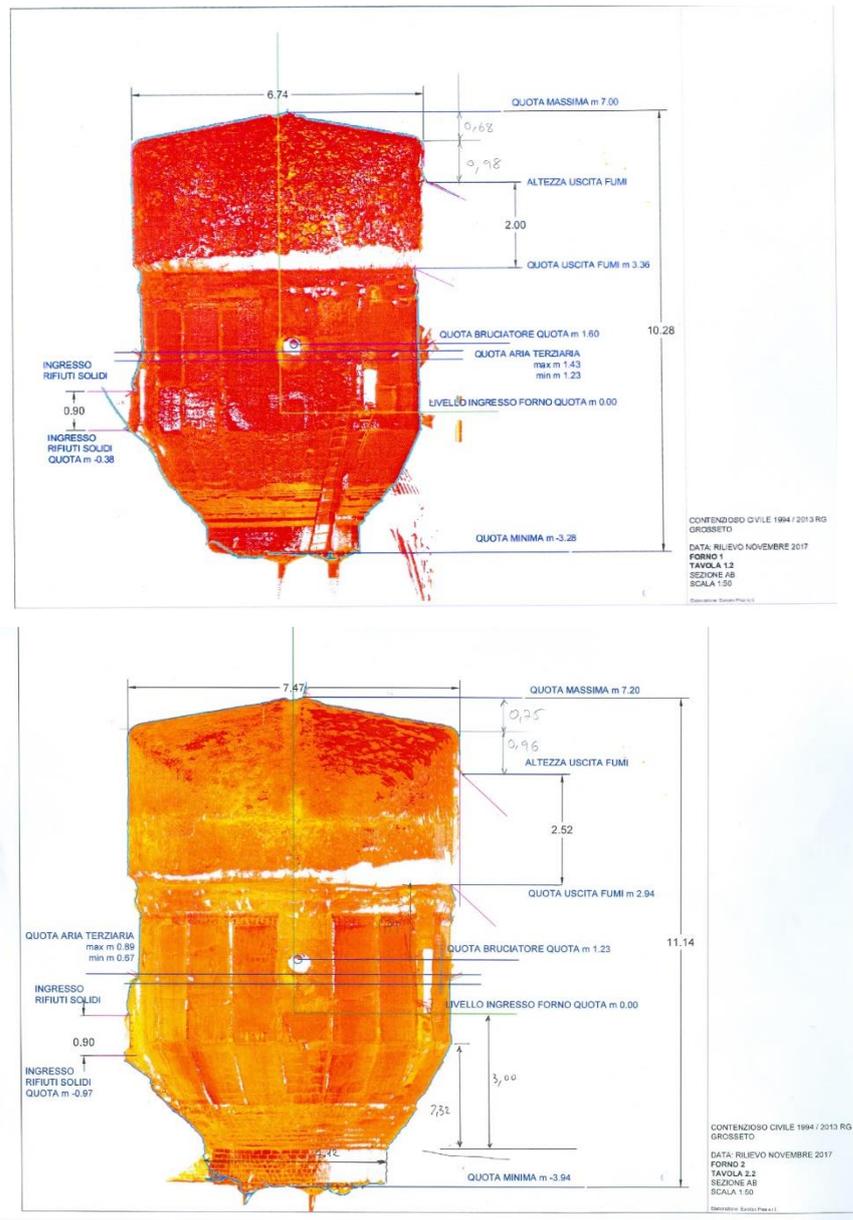


Fig. 2 – Rilievi sul campo mediante scanner 3D laser del forno 1 e 2.



Inoltre, è di fondamentale importanza che il combustibile solido, che in questo caso è differente dal materiale solido granulare costituente il letto, si misceli efficientemente con esso sin dal momento della sua immissione nel forno.

Tabella 2 *Caratteristiche geometriche dei forni*

Linea	1	2 e 3
Diametro interno zona cilindrica inferiore, m	3.5	4.1
Altezza zona cilindrica inferiore, m	0.68	0.76
Angolo medio rispetto alla verticale zona conica, °	34	34
Altezza zona conica, m	2.2	2.3
Altezza della zona principale di combustione, m	4.71	4.83
Diametro interno zona postcombustione, m	6.5	7.24
Altezza zona post combustione, m	5.1	5.7

Dal punto di vista reattoristico del processo di combustione possiamo distinguere all'interno del reattore due zone: la zona principale di combustione al di sotto dell'ultima immissione d'aria dove è richiesta un'intensa miscelazione fra il combustibile sia esso solido che gassoso ed il comburente e la zona sovrastante, la zona di postcombustione, dove si portano a completa conversione le specie combustibili rimanenti. La zona di principale combustione presenta una parte conica con un angolo di svaso molto ampio, mediamente 34° rispetto alla verticale in entrambi i forni con un angolo iniziale di 40° nel primo forno. Data l'altezza della zona conica, sono anche notevoli le variazioni di diametro da 3.5 a 6.5 per il forno 1 e da 4.1 a 7.24 nel forno 2 e 3. Nel complesso, le caratteristiche costruttive dei forni rendono sia la zona principale di combustione che la zona di postcombustione caratterizzate da un aspetto tozzo ovvero a basso rapporto altezza/diametro. Tipicamente combustori a letto fluido bollente sono caratterizzati da un'unica geometria cilindrica. In taluni casi si adotta una geometria conica nella parte bassa del combustore ma con angoli di svaso rispetto alla verticale minori di 25° [1]. Il particolare angolo di svaso adottato derivante dal processo di arrostitimento delle piriti richiede un'analisi fluidodinamica che sarà dettagliata nel seguito.



D'altra parte, l'analisi della geometria della zona di postcombustione evidenzia due principali aspetti critici che ne riducono il corretto funzionamento e non rendono il flusso dei fumi omogeneo e controllato:

- 1) Il volume al di sopra l'uscita dei fumi è significativo, circa il 20% del volume totale nel caso dei forni 2-3 e il 23% del volume totale nel caso del forno 1. Il comportamento fluidodinamico di tale regione può variare in maniera considerevole al variare delle condizioni operative. A bassa velocità del gas ovvero in condizioni di bassa potenzialità dell'impianto, può essere considerata un volume morto dal punto di vista reattoristico (non deve essere considerata nella stima del tempo medio di permanenza) ovvero un volume non interessato al flusso convettivo dei fumi dove vi è, quindi, assenza di reazione. Aumentando la velocità del gas, tale regione può essere attraversata dal flusso convettivo mediante la formazione di vortici e moti di circolazione interna che possono rendere questo volume attivo per la reazione chimica, ma non omogeneo per quanto riguarda il flusso dei fumi e la distribuzione dei tempi di permanenza.
- 2) La riduzione della sezione di passaggio dei fumi fra la zona di postcombustione e l'uscita è notevole, circa il 10% ed avviene in maniera brusca, non-simmetrica e mediante una deviazione di 90° del flusso gassoso. Tale caratteristica determina un flusso non-omogeneo dei fumi nella parte alta della zona di postcombustione.

Nel complesso la geometria della zona di postcombustione e la posizione dell'uscita non consentono un flusso omogeneo e controllato dei fumi in tale zona come previsto dalla norma. Al fine di rispettare la norma, la geometria della parte alta della zona di postcombustione andrebbe modificata in modo tale che i fumi di combustione siano convogliati gradualmente verso l'uscita interessando tutto il volume del reattore evitando la possibile formazione di regioni stagnanti o vorticosi in prossimità della sommità di tale zona.

6. Fluidodinamica di un letto fluido bollente a pareti inclinate e relative conseguenze nella gestione della zona "letto" dei forni

Il corretto funzionamento della zona "letto" necessita l'esatta conoscenza dell'altezza del letto fluidizzato che tipicamente nei combustori a letto fluido bollente è dell'ordine di 1m [1].



Dalla documentazione fornita da Scarlino Energia non si evince chiaramente né la massa iniziale di sabbia caricata nei combustori, né l'altezza di letto in condizioni di esercizio. La simulazione CFD fatta da TEA Engineering e i disegni tecnici della Scarlino Energia fanno intendere che l'altezza di letto corrisponda all'altezza della parte cilindrica al fondo, mentre la distinzione della zona "letto" al di sotto dell'alimentazione del combustibile solido fa presupporre che una parte consistente del letto fluidizzato occupi anche la parte conica. Soprattutto, la condizione di funzionamento nominale presente in tabella 1 in termini di portata nominale e velocità di fluidizzazione di 2m/s (tipicamente impiegata nei combustori a letto fluido bollente) come pure la condizione di minimo carico (Domanda di autorizzazione integrata ambientale elaborato tecnico 1 relazione tecnica allegato 9 "Manuale SMCE") fanno intendere che il letto fluidizzato sia almeno presente fino ad un'altezza di 1.6-1.7m dal piano degli ugelli occupando, di conseguenza, una parte significativa della zona a geometria a tronco di cono. Con questa configurazione la fluidodinamica del combustore a letto fluidizzato bollente e le condizioni di esercizio ottimali non sono banali e dipendono fortemente dall'inclinazione delle pareti inclinate.

Un'attività di ricerca presso l'Istituto di Ricerche sulla Combustione ha riguardato, in passato, la fluidodinamica di combustori a letto fluido bollente a pareti inclinate (tapered fluidized bed). La motivazione di tale studio risiede nell'individuare le condizioni ottimali di miscelazione di combustibili solidi ad alto tenore di volatili durante la fase di devolatilizzazione con il materiale del letto. Le figure 3 e 4 riportano alcuni dei risultati più interessanti ottenuti durante tale attività di ricerca. La figura 3 riporta una rappresentazione schematica del comportamento fluidodinamico di un letto fluidizzato a pareti inclinate con angolo di inclinazione rispetto alla verticale di 45°. Si individuano nel letto tre domini differenti: 1) il dominio A al centro del letto caratterizzato dalla presenza di bolle e moto del solido verso l'alto; 2) il dominio B caratterizzato da moto del solido verso il basso; 3) il dominio C caratterizzato dalla presenza di solido stagnante.

L'estensione del dominio B aumenta al crescere della velocità di fluidizzazione al fondo del letto. Tali evidenze hanno mostrato, quindi, che un letto fluidizzato a pareti inclinate può incrementare la miscelazione assiale del solido del letto, ma induce anche degli effetti negativi.

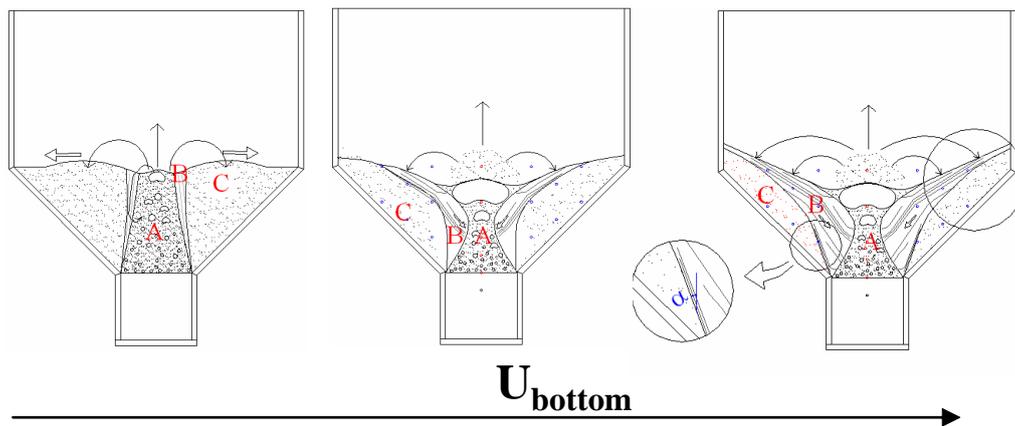


Fig. 3 – Rappresentazione schematica di un letto fluidizzato a pareti inclinate in funzione della velocità di fluidizzazione al fondo. A: dominio caratterizzato dalla presenza di bolle; B: dominio caratterizzato da solido discendente; C: dominio caratterizzato da solido stagnante. L'ingrandimento mostra l'angolo α rispetto alla verticale del confine fra il dominio B e il dominio C.

La distribuzione non uniforme della velocità del gas nel letto incrementa la produzione di fini per abrasione e determina la formazione di regioni indesiderate di solido stagnante nel letto. Al fine di limitare la presenza di regioni di solido stagnante nel letto una differente inclinazione delle pareti (minore di 45°) è suggerita dall'inclinazione della linea di confine fra il dominio B e C in figura 3. La figura 4 riporta tale angolo al variare della velocità al fondo nell'intervallo di velocità tipiche dei combustori a letto fluido bollente. Risulta evidente che per prevenire la formazione di regioni stagnanti è necessario che l'inclinazione delle pareti inclinate sia inferiore a $20-25^\circ$ in accordo con la geometria tipicamente osservata in combustori a letto fluidizzato bollente a pareti inclinate in commercio.

Le osservazioni fatte rendono molto critica la gestione dei forni 2 e 3 della Scarlino Energia, avendo un'inclinazione delle pareti rispetto alla verticale di 34° , ed ancor maggiore la criticità di gestione del forno 1, che ha per il tratto iniziale un'inclinazione di 40° . Si ritiene quindi opportuno che, onde evitare regioni stagnanti nel tratto conico, in tale zona non sia presente, in maniera assoluta, il letto fluidizzato che, di conseguenza, deve rimanere confinato alla regione cilindrica del forno caratterizzata da diametro interno da 3.5m per il forno 1 e 4.1m per i forni 2 e 3. Tale restrizione richiede un'accurata gestione del letto fluidizzato e una ridefinizione delle potenzialità dei forni:

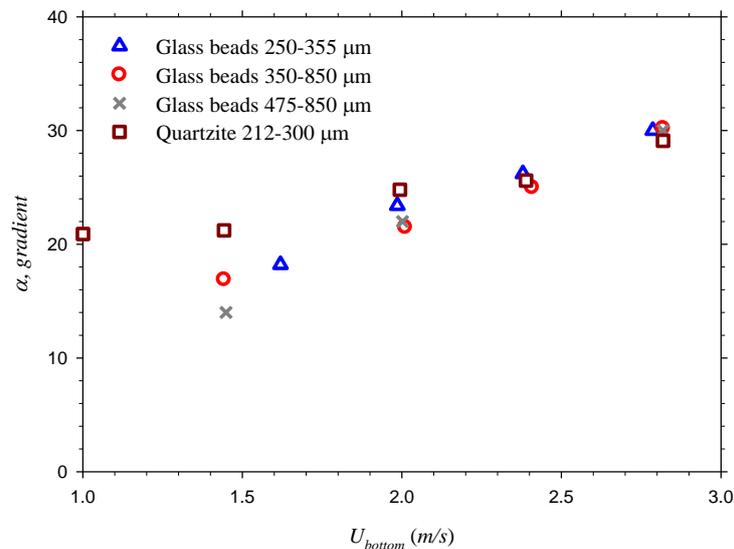


Fig. 4 – Angolo di inclinazione del confine fra il dominio C e il dominio B in funzione della velocità superficiale al fondo del letto per differenti materiali.

- 1) L'altezza del letto deve essere monitorata in continuo mediante misure di pressione e/o indicatori di livello e mantenuta costante al valore corrispondente alla zona cilindrica al fondo mediante un sistema di controllo automatizzato dello scarico delle scorie dal letto;
- 2) L'alimentazione del combustibile deve essere ottimizzata al fine che il materiale combustibile cada esattamente sulla superficie del letto (una videocamera che visualizzi la superficie del letto potrebbe rendersi necessaria) e non sulle pareti della zona a geometria troncoconica. Materiale combustibile, per esempio materiale plastico, potrebbe aderire (e non scorrere verso il letto fluidizzato) sulle pareti della zona a geometria troncoconica e ivi bruciare in maniera incontrollata con evidenti ripercussioni sull'efficienza di combustione e produzione di micro e macroinquinanti.
- 3) La potenzialità termica deve essere calcolata sulla base della superficie trasversale della parte cilindrica del fondo dei forni.

La potenzialità termica del combustore si calcola sulla base della portata nominale di aria comburente che è possibile alimentare al combustore. In particolare, considerando condizioni tipiche di funzionamento di un combustore a letto fluido bollente ovvero una temperatura di funzionamento del letto di 850°C ed una velocità di fluidizzazione di 2m/s si



stima, considerando la sezione cilindrica del fondo del forno, una portata nominale di aria di fluidizzazione (aria primaria) di circa 16800 Nm³/h per il forno 1 e 23100 Nm³/h per i forni 2 e 3. Considerando che il 10-15% dell'aria comburente è inviata ai forni come aria secondaria e terziaria come indicato da Scarlino Energia S.r.l., la portata d'aria nominale risulta essere pari a circa 19200 Nm³/h per il forno 1 e 26400 Nm³/h per i forni 2 e 3. Nota la portata nominale d'aria da alimentare ai forni è possibile stimare la portata di combustibile assumendo una composizione chimica tipica di un CSS da RS (tabella 3) avente stesso potere calorifico da specifiche della Scarlino Energia (13.67MJ/kg) ed un eccesso d'aria del 70% come indicato da Scarlino Energia.

Tabella 3 *Caratteristiche tipiche di CSS da RS avente 13.67MJ/kg*

Composizione elementare in peso su base secca, %	
carbonio	45.8
Idrogeno	6
azoto	0.87
Cloro	0.58
Zolfo	0.21
Ceneri	18.4
Ossigeno (diff)	28.14
Umidità sul tal quale, %	22.25

La portata di combustibile calcolata è pari al 3.04t/h per il forno 1 e 4.18t/h per i forni 2 e 3, corrispondentemente la potenzialità termica si riduce a 9.9Gcal/h (il 52% della potenza termica proposta) per il forno 1 e a 13.6Gcal/h (il 59% della potenza termica proposta) per i forni 2 e 3.

D'altronde, un'elevata riduzione di potenzialità termica è confermata anche se si assume lo stesso rapporto fra portata d'aria nominale e potenzialità termica del forno secondo specifiche date da Scarlino Energia (ovvero che a 40000 Nm³/h per il forno 1 corrisponde una potenzialità termica di 19Gcal/h e a 48000 Nm³/h per i forni 2 e 3 corrisponde 23Gcal/h).



Sulla base di questo rapporto, la potenzialità termica del forno 1 si riduce al 48% portandola da 19 a 9.1Gcal/h e dei forni 2 e 3 al 55% portandola da 23 a 12.6Gcal/h.

Nel complesso l'attuale potenzialità termica proposta da Scarlino Energia porta ad un sovraccarico notevole dei forni ed una difficoltà di gestione della zona principale di combustione in termini di efficienza di miscelazione del combustibile con il materiale del letto a causa della possibile presenza di regioni stagnanti nella zona conica ed una velocità di fluidizzazione del gas al fondo troppo elevata dell'ordine di 3-4m/s, valori prossimi a quelli di un combustore a letto fluido circolante piuttosto che a un combustore a letto fluido bollente. Il sovraccarico dal punto di vista termico e le elevate velocità di fluidizzazione hanno conseguenze negative nella conversione del combustibile solido e determinano una maggiore produzione di particolato solido che, trascinato dalla corrente gassosa al di fuori del forno, intasa le apparecchiature della linea di trattamento fumi come anche evidenziato dai rapporti ispettivi ARPAT. Inoltre, la presenza di particolato solido in dispositivi eserciti nella finestra di temperatura di riformazione delle diossine ne incrementa la produzione per sintesi "de novo".

7. Comportamento reattoristico della zona di postcombustione

La fluidodinamica e il comportamento reattoristico della zona di postcombustione è valutata sulla base di ipotesi semplificative e conservative mediante valutazioni concettuali e numeriche di numeri adimensionali, di funzioni di distribuzioni dei tempi di permanenza e di cinetica chimica. Si assume, come volume di reazione, tutto il volume a disposizione comprensivo della regione al di sopra dell'uscita fumi, immaginando che la geometria del reattore e l'uscita dei fumi dal forno siano correttamente modificate. Pertanto si assume che la zona di postcombustione abbia una geometria cilindrica di dimensioni 6.5m diametro interno e ed altezza 5.1m per il forno 1 e 7.24m e 5.7m per i forni 2 e 3. Si assumono inoltre le condizioni operative presenti nella documentazione tecnica prodotta da Scarlino che considera una portata nominale dei fumi 49000 e 60000Nm³/h, rispettivamente per il forno 1 e i forni 2 e 3 e temperature di esercizio possibili 850 e 1000°C. La valutazione del numero di Reynolds (Re) permette di individuare le condizioni fluidodinamiche presenti nella regione di postcombustione:

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



$$Re = \frac{\rho u d_t}{\mu}$$

dove ρ , μ , u e d_t sono, rispettivamente, la densità e la viscosità dei fumi, la velocità superficiale del gas e il diametro interno della zona di postcombustione. Assumendo per semplicità che le proprietà dei fumi siano assimilabili a quelle dell'aria, Re al crescere della temperatura si riduce da circa 70000 a circa 64000 per il forno 1 e da circa 78000 a circa 71000 per i forni 2 e 3. Tale valutazione conferma che il moto della zona di postcombustione è di tipo turbolento con profilo assimilabile ad un profilo piatto di velocità (flusso a pistone), ma non assicura il comportamento di reattore a flusso a pistone. Infatti, anche in condizioni di moto con flusso a pistone, il flusso turbolento genera strutture vorticosi che tendono ad uniformare la concentrazione del fluido lungo l'asse del reattore (fenomeni di retromiscelazione del gas) discostando il comportamento del reattore dal comportamento ideale di reattore con flusso a pistone. Per tenere in conto dei fenomeni di miscelazione assiale indotti dal moto turbolento, le prestazioni dei reattori tubolari possono essere valutate mediante il modello a dispersione assiale. Tale modello sovrappone al flusso convettivo a pistone un flusso di materia dispersivo nella medesima direzione del flusso convettivo modellato con una legge di tipo fickiana, dove il flusso di materia è proporzionale al gradiente di concentrazione mediante un fattore, detto coefficiente di dispersione assiale. Tale modello permette la stima della funzione di distribuzione dei tempi di permanenza di un reattore tubolare e le sue prestazioni reattoristiche al variare del processo chimico in esame. La figura 5 mostra la funzione di distribuzione dei tempi di permanenza adimensionalizzata in funzione del tempo di permanenza adimensionalizzato predetta dal modello a dispersione assiale nel caso di recipiente chiuso (ipotesi conservativa) al variare del numero di dispersione ($\frac{D}{uL}$). Si ricorda che l'area sottesa alla curva di distribuzione dei tempi di permanenza fra due tempi t_1 e t_2 rappresenta la frazione di fluido che ha tempo di permanenza compreso fra t_1 e t_2 . Il numero di dispersione è un numero adimensionale, dato dal rapporto tra il tempo caratteristico di convezione forzata, ovvero il tempo medio di permanenza (\bar{t}), e il tempo di dispersione assiale (t_D):

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



$$\frac{D}{uL} = \frac{\bar{t}}{t_D} = \frac{L}{\frac{u}{L^2} D}$$

dove L è la lunghezza della zona di postcombustione e D è il coefficiente di dispersione assiale. Il tempo di dispersione assiale indica quanto sono veloci i fenomeni di miscelazione lungo la direzione assiale del reattore.

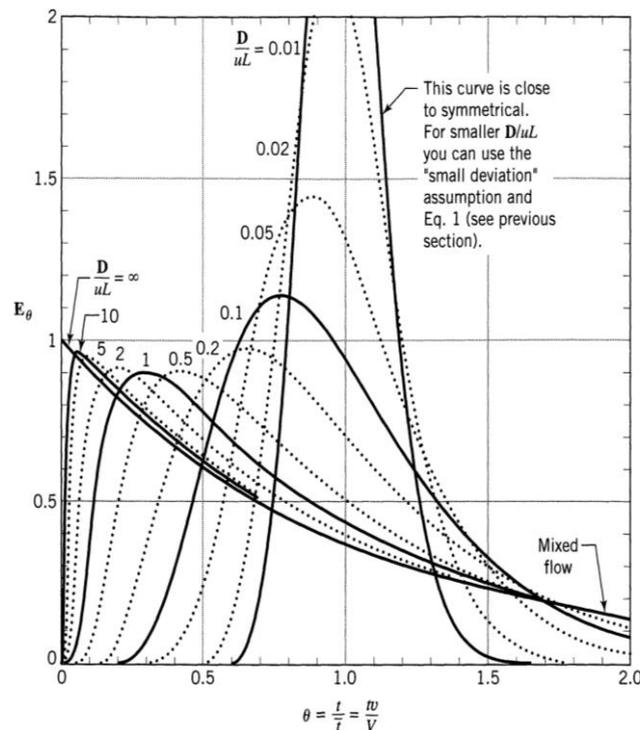


Fig. 5 – Funzione di distribuzione dei tempi di permanenza in forma adimensionalizzata per il modello a dispersione assiale nel caso di recipiente chiuso e per consistenti scostamenti dal reattore a flusso a pistone [2].

È evidente che a parità di tempo medio di permanenza (\bar{t}) per numero di dispersione infinito (tempo di dispersione molto minore del tempo convettivo) la funzione di distribuzione è un decadimento esponenziale, di conseguenza il comportamento del reattore è assimilabile ad un reattore continuo a perfetta miscelazione, mentre, per valori bassi del numero di dispersione, la funzione di distribuzione tende ad una delta di Dirac, caratteristica del reattore a flusso a pistone. Per valori del numero di dispersione minori di 0.01, la curva diventa simmetrica rispetto al tempo di permanenza medio ed approssimabile ad una gaussiana ed il comportamento del reattore tubolare risulta molto prossimo a quello del



reattore a flusso pistone. Per caratterizzare la zona di postcombustione dal punto di vista reattoristico, risulta necessaria la valutazione del numero dispersione e, di conseguenza, la valutazione del coefficiente di dispersione assiale. A tal fine è possibile impiegare il diagramma in figura 6 che riporta in forma adimensionalizzata il coefficiente di dispersione assiale in funzione del numero di Reynolds. Risulta evidente che, nel caso di moto turbolento ($Re > 2100$), al crescere del numero di Reynolds il coefficiente di dispersione si riduce e con esso si riducono i fenomeni di miscelazione assiale, avvicinando il comportamento del reattore tubolare a quello di reattore a flusso a pistone. Per i valori di Reynolds calcolati per la zona di post combustione, il coefficiente di dispersione è ben descritto dalla correlazione di Taylor (1954) la cui corrispondente curva è riportata in figura ed è descritta dalla seguente legge:

$$\frac{D}{ud_t} = Re^{-1/8}$$

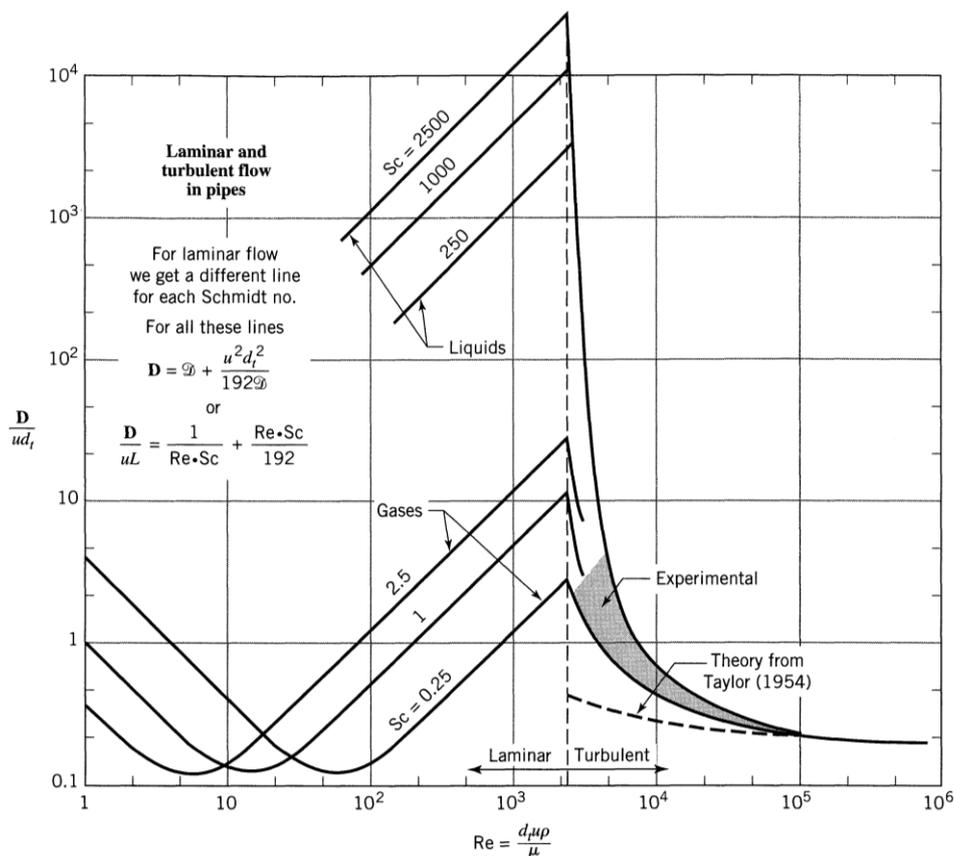


Fig. 6 – Correlazione per la dispersione assiale in flussi intubati [2].



Nel caso in esame tale numero adimensionale varia molto poco nell'intervallo di condizioni operative considerate e rimane pressoché invariato per i tre forni. Il numero di dispersione per la zona di post combustione può essere, quindi, valutato mediante la seguente espressione:

$$\frac{D}{uL} = \frac{D}{ud_t} \frac{d_t}{L} = Re^{-1/8} \frac{d_t}{L}$$

Tale numero è dell'ordine di 0.31-0.32 ed è anch'esso pressoché indifferente alle condizioni operative e al tipo di forno essendo essi caratterizzati praticamente dal medesimo rapporto d'aspetto ($\frac{L}{d_t}$). Il valore del numero di dispersione ottenuto è relativamente alto per cui la zona di postcombustione non può essere approssimata ad un reattore a flusso a pistone. La funzione di distribuzione dei tempi di permanenza, come risulta evidente dalla figura 5, è asimmetrica, con un massimo che corrisponde ad un valore di molto inferiore a quello medio e, nel complesso, si discosta in maniera significativa dall'andamento relativo al reattore a flusso a pistone. In tali condizioni di flusso, quindi, si innescano in maniera significativa flussi di miscelazione assiale del gas che rende il flusso gassoso nella zona di postcombustione non omogeneo, con una distribuzione dei tempi di permanenza che si discosta in maniera significativa dal tempo medio di permanenza. Tale comportamento è attribuibile principalmente al basso rapporto di aspetto, inferiore all'unità, della zona di postcombustione. A parità di volume (che fissata la portata di gas significa a parità di tempo medio di permanenza) un reattore snello, cioè avente un elevato valore del rapporto di aspetto, è maggiormente assimilabile a un reattore a flusso a pistone rispetto a un reattore tozzo, caratterizzato da un basso valore del rapporto di aspetto, come è il caso in esame. Tipicamente, la zona di postcombustione di combustori a letto fluido bollente di potenzialità simile a quelli in esame ha un rapporto d'aspetto circa il doppio rispetto a quello della zona di postcombustione dei forni della Scarlino Energia.

8. Confronto con la simulazione CFD condotta da TEA Engineering

Si ritiene che sarebbe importante confrontare la funzione dei distribuzione dei tempi di permanenza calcolata mediante i numeri adimensionali con quella stimata da un modello di fluidodinamica computazionale analogo a quello sviluppato da TEA Engineering. Purtroppo

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



l'attività modellistica da loro sviluppata ha valore principalmente qualitativo e inerente alla miscelazione dell'aria secondaria e terziaria all'interno del forno e non fornisce sufficienti risultati sul tracciamento dei fumi necessario ad analizzare il comportamento fluidodinamico della zona di postcombustione al di sopra dell'ultima immissione di aria. Il modello presenta valutazioni errate in ingresso, quali la composizione dei fumi (la somma della concentrazione della CO₂ e dell'ossigeno non può superare il 20.9% a meno di non usare aria arricchita in ossigeno) e condizioni al contorno approssimative: sicuramente la distribuzione di velocità alla sommità del letto non può essere uniforme, a causa dell'eruzione delle bolle provenienti dal letto. Mentre il tracciamento dei fumi, presumibilmente, avviene seguendo il moto di particelle prive di massa immesse nella sezione orizzontale in corrispondenza dell'ultima immissione dell'aria a partire da tale sezione fino all'uscita in corrispondenza del tratto di congiungimento fra il forno e la caldaia. Tale procedura soffre di una criticità evidente dettata dallo specifico campo di moto presente in tale sezione. L'interazione fluidodinamica dell'aria secondaria e terziaria ad alta velocità e a temperatura ambiente con il flusso gassoso caldo dei fumi genera strutture vorticosi irregolari che da un lato favoriscono la miscelazione in fase gassosa dall'altro generano un campo di moto del gas non uniforme. Di conseguenza, la posizione iniziale delle particelle traccianti in tale sezione diventa estremamente critica e rende necessario l'impiego di un numero notevole di particelle uniformemente distribuite lungo la sezione orizzontale di immissione per poter caratterizzare il moto dei fumi in maniera statisticamente significativa e determinare una corretta funzione di distribuzione dei tempi di permanenza. L'analisi di TEA Engineering non dà informazioni a riguardo, ma solo un valore medio di tempo di permanenza che risulta essere non affidabile. L'inconsistenza dei valori di tempo medio stimati si evince dal fatto che sono addirittura maggiori del tempo-spazio dell'intero volume modellato della camera di combustione (rapporto fra il volume computazionale considerato e la portata dei fumi, valore massimo di tempo medio di permanenza possibile). Si ritiene opportuno sottolineare che la presenza di ricircoli interni di grande scala come evidenziato da tale analisi fluidodinamica allontanano il comportamento reattoristico della zona di postcombustione da quello ottimale corrispondente al reattore a flusso a pistone.

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



Nel complesso, l'analisi di fluidodinamica computazionale di TEA Engineering dimostra soltanto che i flussi di aria secondaria e terziaria si miscelano bene con i fumi nella zona di immissione, cosa triviale e non messa in discussione e che esistono delle regioni stagnanti nella parte alta del forno cosa che farebbe ridurre il tempo medio di permanenza dei fumi nella zona di postcombustione.

9. Valutazioni esemplificative sulle prestazioni reattoristiche della zona di postcombustione

A titolo esemplificativo della rilevanza dello scostamento della zona di postcombustione dal comportamento reattoristico di reattore a flusso a pistone si riporta, in forma di diagramma in figura 7, le prestazioni di un reattore a dispersione assiale confrontate con quelle di un reattore a flusso a pistone.

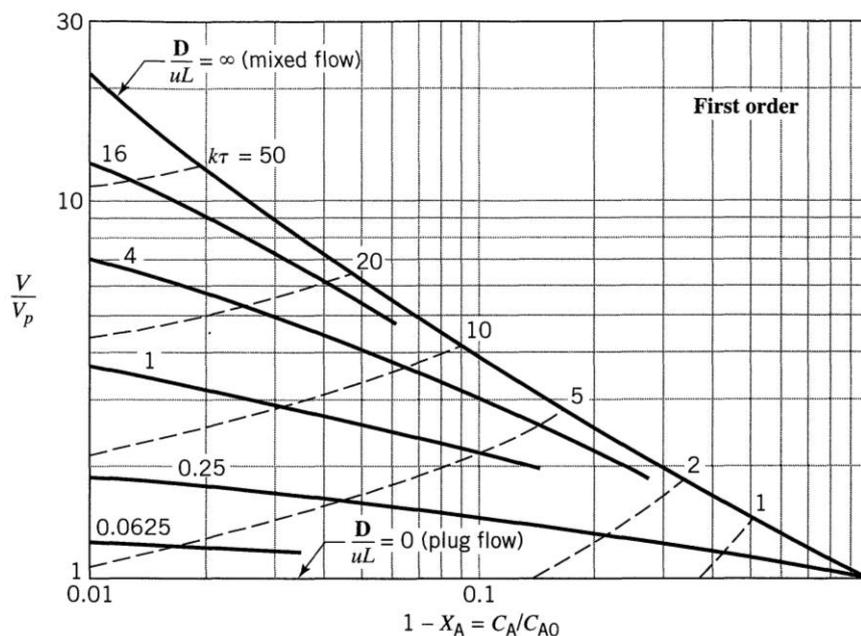


Fig. 7 – Confronto fra un reattore a dispersione assiale ed un reattore a flusso pistone per reazione del primo ordine [2].

In figura 7 è riportato il rapporto fra il volume di un reattore a dispersione assiale e il volume di un reattore a flusso a pistone in funzione di $1-X_A$ (X_A , grado di conversione) sotto forma di curve parametriche nel numero di dispersione e del numero di Damköhler (numero adimensionale che confronta la cinetica chimica con il flusso convettivo) per una generica



cinetica lineare nel reagente generico A. La curva relativa al comportamento del reattore a flusso a pistone è l'asse delle ascisse. È evidente che, a parità di grado di conversione il volume di un reattore a dispersione assiale è più grande di quello di un reattore a flusso a pistone. In particolare, a titolo di esempio per ottenere una conversione del 99% un reattore a dispersione assiale, caratterizzato da un numero di dispersione pari al numero di dispersione che caratterizza la zona di post combustione, dovrà avere un volume pressoché doppio rispetto a quello di un reattore a flusso a pistone. Sempre in tale condizione, se è necessario un tempo medio di permanenza di 2s per fare avvenire il processo reattivo in un reattore a flusso pistone, ne saranno necessari 4s in un reattore a flusso a dispersione assiale con numero di dispersione corrispondente a quello stimato per la zona di postcombustione dei forni della Scarlino Energia.

10. Conclusioni

La zona principale di combustione dei forni della Scarlino Energia presenta delle caratteristiche geometriche e delle condizioni di esercizio che non rispecchiano le tipiche condizioni fluidodinamiche e di processo dei combustori a letto fluidizzato bollenti. Ne consegue che i forni risultano essere fortemente sovraccaricati dal punto di vista termico e, di conseguenza, sono non adeguati ad operare a potenze termiche di 19Gcal per il forno 1 e 23 Gcal per i forni 2 e 3. Valutazioni teoriche basate sulle condizioni tipiche di esercizio di inceneritori a letto fluido bollente e sulla geometria dei forni della Scarlino Energia suggeriscono una potenzialità termica di circa 9.5Gcal/h per il forno 1e di circa 13.1Gcal/h per i forni 2 e 3.

La zona di postcombustione dei forni della Scarlino Energia, anche se fosse caratterizzata da un tempo medio di permanenza superiore ai 2s (assenza di volumi morti nella regione sovrastante l'uscita del reattore), non ottempera alla norma in virtù del fatto che il flusso gassoso in tale regione non è né controllato né permane in maniera omogenea in quanto:

1. La geometria di tale zona determina che i fumi non siano convogliati in maniera controllata ed omogenea verso l'uscita. Risulta al contrario probabile la formazione



di regioni stagnanti o di ricircolo nella regione superiore della zona di postcombustione;

2. In ogni caso anche adottando un flusso convogliato dei fumi di combustione questi non fluirebbero in maniera omogenea nella zona di postcombustione per un medesimo tempo di permanenza, in quanto, il rapporto altezza/diametro della zona del combustore in esame e la relativa velocità dei fumi in uscita fa sì che la funzione di distribuzione dei tempi di permanenza si discosterebbe in maniera significativa da quella di un reattore a flusso a pistone, unica condizione per cui tutto il fluido permane nel reattore un tempo pari al tempo medio di permanenza.

La possibile presenza di regioni stagnanti o ricircolo da un lato e lo scostamento significativo dalla condizione di reattore a flusso a pistone dall'altro determinano una considerevole riduzione delle prestazioni reattoristiche della zona di postcombustione con inevitabile conseguenza sull'emissioni delle specie chimiche meno reattive nei confronti dei processi ossidativi, ma altamente inquinanti quali fuliggine, IPA e diossine.

Va inoltre considerato che le conclusioni riportate si basano sulla geometria dei forni e sulle condizioni di processo proposte da Scarlino Energia confrontate con quelle tipicamente impiegate nei combustori a letto fluidizzato bollente tipicamente in commercio, di conseguenza non necessitano di ulteriori conferme sperimentali ottenute dall'esercizio dell'impianto.

11. Modifiche costruttive e di esercizio necessarie per i forni di Scarlino Energia

Di seguito si riportano alcuni possibili interventi relativi alla zona di principale combustione dei forni della Scarlino Energia al fine di una migliore gestione del letto fluidizzato:

- 1) La possibile formazione di agglomerati nel letto, che pregiudicano la corretta fluidizzazione del letto, deve essere evitata mediante un'accurata preselezione del combustibile solido (assenza di metalli basso fondenti) in ingresso e mediante l'aggiunta di agenti solidi antiagglomeranti che limitino la formazione di eutettici bassofondenti generati dall'interazione fra la sabbia silicea e metalli alcalini per esempio K;



- 2) L'altezza del letto deve essere monitorata in continuo mediante misure di pressione e/o indicatori di livello e mantenuta costante al valore corrispondente alla zona cilindrica al fondo mediante un sistema di controllo automatizzato dello scarico delle scorie dal letto;
- 3) L'alimentazione del combustibile deve essere ottimizzata al fine che il materiale combustibile cada sulla superficie del letto e ivi si misceli efficientemente con il solido granulare che costituisce il letto;
- 4) Il letto fluidizzato deve essere esercito alla tipica velocità di fluidizzazione dei combustori a letto fluidizzato bollente ovvero 2m/s nella zona cilindrica al fondo del letto comportando una riduzione della potenzialità dell'impianto sulla base dell'attuale ripartizione fra l'aria primaria e l'aria secondaria e terziaria. Velocità di fluidizzazione superiori a 3m/s determinano un'eccessiva produzione e fuoriuscita dai forni di polveri a scapito del corretto funzionamento della linea di trattamento fumi e della formazione di diossine mediante sintesi "de novo".

La zona di postcombustione dei forni della Scarlino Energia necessita delle seguenti modifiche costruttive:

- 1) la posizione dell'uscita dei fumi va collocata alla sommità della zona di postcombustione;
- 2) i fumi vanno convogliati verso l'uscita in maniera graduale in modo da evitare volumi morti o zone di ricircolo;
- 3) l'altezza della zona di postcombustione va, in via cautelativa, raddoppiata in modo da avere un rapporto di aspetto simile a quello tipicamente riscontrato in combustori a letto fluido bollente di pari potenzialità e ottenere un tempo medio di permanenza tale da compensare lo scostamento dal comportamento di reattore a flusso a pistone.

Si intende, inoltre, precisare che la sola riduzione della potenzialità dei forni non fornisce le stesse prestazioni reattoristiche previste dalle modifiche costruttive suggerite in quanto:

- 1) la conseguente riduzione della velocità nella zona di postcombustione comporterebbe un'ulteriore riduzione del numero di Reynolds e, di conseguenza, un maggiore scostamento dal comportamento del reattore a flusso a pistone;



- 2) l'entità dei volumi morti e delle zone di ricircolo nella sommità dei forni incrementerebbe.

Riferimenti Bibliografici

- 1 Bo Leckner, Atmospheric (non-circulating) fluidized bed (FB) combustion. In: Scala, F. (Ed.), Fluidized-bed Technologies For Near-zero Emission Combustion and Gasification. Woodhead Publishing, Chapter 14, 2013.
- 2 Octave Levenspiel, Chemical Reaction Engineering, Third Edition, John Wiley & Sons, 1999.

30/04/2018

Riccardo Chirone
Direttore f.f.
Istituto di Ricerche sulla Combustione IRC-CNR
Piazzale Tecchio, 80 - 80125 Napoli (Italy)
Tel. +39 081 7682242
Fax +39 081 5936936
Email: chirone@irc.cnr.it
Webpage: <http://www.irc.cnr.it/istituto/r-chirone>

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



CONSIGLIO
NAZIONALE
DELLE
RICERCHE

ISTITUTO DI RICERCHE SULLA COMBUSTIONE

Descrizione dell'Istituto di Ricerche sulla Combustione del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Storia: L'Istituto di Ricerche sulla Combustione nasce a Napoli nel 1968 dal lungimirante progetto di Leopoldo Massimilla, che ha dapprima fondato e poi diretto l'Istituto fino alla scomparsa, avvenuta nel 1993. Alla Direzione dell'Istituto si sono poi succeduti l'ing. Federico Beretta, il prof. Gennaro Russo, il prof. Piero Salatino, la dr.ssa Anna Ciajolo. L'Ing. Riccardo Chirone é l'attuale Direttore dell'Istituto.

Le attività, che inizialmente erano circoscritte agli studi sulla dinamica di sistemi multifase e granulari e ai processi plasmochimici, si sono poi ampliate includendo la diagnostica ottica ed i meccanismi di formazione di fasi condensate in fiamme, aspetti della dinamica di sistemi reagenti, processi ossidativi di idrocarburi a bassa temperatura, processi ossidativi catalitici ed alla fiamma, aspetti dell'aerodinamica e dello scambio radiativo in camere di combustione. Alla fine degli anni settanta, l'Istituto ha trovato nuovi ed importanti stimoli di ricerca dettati dall'esigenza di diversificare le fonti energetiche primarie: si sono approfonditi, pertanto, studi nel campo della combustione e gassificazione di combustibili solidi (in primis carbone) soprattutto con tecnologie di conversione a letto fluidizzato. Altre linee di attività di interesse dell'Istituto sono quelle legate alla sicurezza delle operazioni dell'industria chimica: stoccaggio di sostanze combustibili od esplosive, prevenzione e del controllo dell'impatto ambientale, processi di combustione instazionaria in motori a combustione interna. Le ultime attività, in ordine cronologico, ad essere oggetto di ricerca dell'Istituto sono lo sviluppo di tecnologie di conversione basate sulle fonti rinnovabili e lo studio di processi di conversione energetica di combustibili fossili compatibili con la cattura ed il sequestro della CO₂.

L'Istituto di Ricerche sulla Combustione ha goduto sin dalla nascita dell'apporto di figure di calibro nazionale ed internazionale che hanno contribuito a fornire indirizzamento scientifico e revisione critica delle linee di sviluppo. Hanno fatto parte del Consiglio Scientifico dell'Istituto eminenti studiosi di statura internazionale quali il prof. Alfred Gaydon dell'Imperial College di Londra, il prof. John Beér del MIT, il prof. Klaus Hein dell'Università di Stoccarda. Sono stati accolti a Napoli, per periodi sabbatici di studio e ricerca, i professori Adel Sarofim del MIT e Roland Clift dell'Università del Surrey. Sono stati resi partecipi dello sviluppo dell'Istituto Umberto Colombo, Ezio Colombo, Ettore Molinari, Livio Antonelli, Pierluigi Reborà, Aurelio Reiter, Gennaro De Michele.

Missione: L'Istituto di Ricerche sulla Combustione svolge attività di ricerca in aree prioritarie per l'innovazione del Paese con applicazione in molti settori produttivi: energia, ingegneria industriale, sicurezza, ambiente, nuovi materiali. Le attività, a carattere teorico e sperimentale, sono rivolte allo studio dei processi di combustione a basso impatto ambientale per l'innovazione delle tecnologie di produzione dell'energia elettrica e termica, delle tecnologie di termovalorizzazione di rifiuti, di biomasse e di combustibili alternativi. Nell'ambito di tali ricerche vengono inoltre, condotti studi sulle tecniche avanzate di caratterizzazione dei combustibili fossili, delle miscele combustibili ottenute dal trattamento di combustibili fossili e dei prodotti di combustione inquinanti in forma gassosa e particellare. La caratterizzazione si estende anche ai parametri rilevanti per i rischi industriali quali l'infiammabilità e esplosività di materiali combustibili. La finalità generale è quella di un

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709



CONSIGLIO
NAZIONALE
DELLE
RICERCHE

ISTITUTO DI RICERCHE SULLA COMBUSTIONE

continuo aggiornamento, in un'ottica di eco-compatibilità, delle tecnologie di combustione tradizionali e la messa a punto di tecnologie alternative ed innovative per l'ottimizzazione dei processi di combustione sia in termini di una maggiore efficienza del processo di produzione energetica che in termini di riduzione dell'impatto ambientale relativamente alle emissioni di inquinanti atmosferici e di gas climalteranti.

Piazzale V. Tecchio, 80	80125, Napoli - Italia	Tel. (39) 081.768.2245	Fax (39) 081.593.6936
Via Diocleziano, 328	80124, Napoli - Italia	(39) 081.762.2673	(39) 081.762.2915
Via Metastasio, 17	80125, Napoli - Italia	(39) 081.593.1567	(39) 081.593.1567
Via Claudio, 21	80125, Napoli - Italia	(39) 081.2391709	(39) 081.239.1709