



Ricerca di Sistema elettrico

Verifica sperimentale di filtri ceramici di tipo *wall flow* per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida

G. Stoppiello, M. Gualtieri, F. Hugony

VERIFICA SPERIMENTALE DI FILTRI CERAMICI DI TIPO *WALL FLOW* PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI INQUINANTI NEI FUMI DI COMBUSTIONE DI BIOMASSA SOLIDA

G. Stoppiello, M. Gualtieri, F. Hugony (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

Obiettivo: Sviluppo di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida

Responsabile del Progetto: Vito Pignatelli, ENEA

Si ringrazia particolarmente Antonio De Sio per la preziosa collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 COMBUSTIBILE DI PROVA	6
2.2 APPARATO SPERIMENTALE	7
2.2.1 <i>Generatore di calore</i>	7
2.2.2 <i>Linea generale di campionamento</i>	13
2.2.3 <i>Strumenti di campionamento e di analisi dei fumi</i>	16
2.2.3.1 Strumenti di controllo di pressione e temperatura	16
2.2.3.2 Impattore multistadio.....	17
2.2.3.3 Linea campionamento IPA.....	18
2.2.3.4 Sistema di analisi dei gas	18
2.4 DISPOSITIVI FILTRANTI TESTATI	20
2.5 MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE	22
2.5.1 <i>Numero e durata delle prove sperimentali</i>	22
2.5.2 <i>Procedura dei test sperimentali</i>	22
2.5.3 <i>Criticità riscontrate nella conduzione delle prove</i>	24
2.7 RISULTATI	25
2.7.1 <i>Dati di emissione della caldaia</i>	25
2.7.2 <i>Prove su filtri FN</i>	28
2.7.2.1 Filtri FN 60% Al ₂ O ₃	28
2.7.2.2 Filtri FN 92% Al ₂ O ₃	30
2.7.4 <i>Prove su filtri UNISA</i>	33
2.7.4.1 Prove a bassa temperatura.....	33
2.7.4.2 Prove ad alta temperatura.....	36
3 CONCLUSIONI.....	41
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	43

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico, il progetto "Energia elettrica da biomasse: sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e l'upgrading dei combustibili" prevede, per quanto riguarda l'obiettivo "Sviluppo di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida", la realizzazione, la caratterizzazione e la verifica sperimentale di filtri ceramici porosi per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dalla combustione di biomassa solida, in particolar modo CO, particolato e IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici).

A tal scopo ENEA si è avvalsa della collaborazione di FN S.p.A. e del Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.In.) dell'università di Salerno per la realizzazione e/o la fornitura di dispositivi ceramici in scala di laboratorio di tipo *wall flow*, già efficacemente testati in campo motoristico per la riduzione delle emissioni da motori diesel, per studiare e verificare la loro capacità a trattare in maniera fisica e/o catalitica anche i composti inquinanti sopra indicati presenti nei fumi prodotti dalla combustione di biomassa legnosa.

Il comportamento di tali prototipi è stato verificato presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia, dove sono state condotte prove di combustione in caldaia di pellet di legno, e dove è stata installata un'apposita linea sperimentale per la quale i filtri ceramici sono stati testati a varie condizioni di esercizio (temperatura e velocità superficiale) direttamente a contatto con una portata campionaria di fumi proveniente dal condotto fumario della caldaia.

L'osservazione dei dati sperimentali ha messo in evidenza una buona efficacia dei filtri di tipo *wall flow* per la rimozione degli inquinanti presenti nei fumi di combustione (in particolar modo CO e particolato solido) e ha confermato la possibilità di applicare tale tecnologia al settore di produzione di energia da biomasse.

Per la loro piena adozione in sistemi convenzionali di combustione della biomassa, risultano tuttavia necessarie ulteriori prove sperimentali per la definizione delle proprietà e delle condizioni di esercizio ottimali, e per l'individuazione della configurazione tecnica più idonea al fine di ottimizzare l'azione dei catalizzatori.

1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 4 marzo 2013 un Accordo di Programma in base al quale è concesso un contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2012-2014 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. Il lavoro di seguito descritto si riferisce alle linee di ricerca previste nel Piano Annuale di Realizzazione 2012, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", nell'ambito del progetto "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e l'upgrading dei biocombustibili", in relazione all'obiettivo "Sviluppo di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida".

In base a tale obiettivo, ENEA ha stipulato accordi di collaborazione con FN S.p.A. e con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.In.) dell'università di Salerno per lo sviluppo di nuovi sistemi di abbattimento delle emissioni inquinanti presenti nei fumi di combustione della biomassa solida, con particolare riferimento a CO, particolato e IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici).

Tale lavoro congiunto prevede la realizzazione, la caratterizzazione e la verifica sperimentale di prototipi in scala di laboratorio di filtri tipo *wall flow*, per i quali i gas da trattare attraversano le pareti porose di setti ceramici sulla cui superficie rimangono adese le polveri eventualmente presenti nella corrente gassosa. Le stesse superfici porose, inoltre, qualora attivate con catalizzatori, consentono a temperature adeguate la termodistruzione delle stesse polveri di natura organica e/o degli altri inquinati organici presenti in fase gassosa nei fumi.

Per la verifica sperimentale dei filtri è stata installata presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia una caldaia a biomassa multi combustibile di potenza nominale pari a 30 kW, ed è stata allestita un'apposita linea sperimentale per la quale i filtri rispettivamente forniti da FN S.p.A. e Di.In sono stati inseriti in colonne d'acciaio riscaldate, all'interno delle quali sono stati convogliati i fumi di combustione provenienti dal condotto fumario della caldaia, a diverse temperature e velocità superficiali.

Il confronto dei parametri di emissione rilevati nelle varie condizioni di esercizio ha quindi permesso di verificare l'efficacia dei prototipi testati.

Il presente documento descrive l'apparato sperimentale predisposto per i test, le modalità di esecuzione delle prove e i risultati ottenuti.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Combustibile di prova

Per le prove sperimentali è stato utilizzato pellet di abete naturale non trattato, rispondente alle normative UNI EN, le cui caratteristiche fornite dal produttore sono:

- lunghezza media: 6 mm
- potere calorifico: ~ 18684 kJ/kg
- ceneri residue: ~ 0,6 %
- umidità: ~ 7%

Da analisi calorimetriche e termogravimetriche effettuate nel laboratorio chimico del Centro ENEA di Saluggia sono state inoltre ricavate le seguenti grandezze:

Tabella 1. Proprietà del combustibile utilizzato

tenore idrico (%)	5,29
contenuto di umidità (%)	5,58
contenuto di ceneri (% tq)	0,56
potere calorifico superiore (kJ/kg tq)	18841
potere calorifico superiore (kJ/kg sul secco)	19893
potere calorifico inferiore (kJ/kg tq)	17617
potere calorifico inferiore (kJ/kg sul secco)	18737
potere calorifico inferiore netto (kJ/kg)	18847
contenuto di idrogeno (% sul secco)	5,27
contenuto di carbonio (% sul secco)	52,72
formula molecolare fittizia (sul secco)	CH _{1,20} O _{0,59}

2.2 Apparato sperimentale

2.2.1 Generatore di calore

Per le prove sperimentali è stata utilizzata una nuova caldaia a biomassa di potenza nominale pari a 30 kW, alimentabile a cippato e/o pellet, collegata al circuito idraulico di dissipazione del calore già presente all'interno della Hall Tecnologica THEXAS.

Il modello di caldaia prescelto è *KWB Multifire USV V 30*, dotato di un serbatoio di stoccaggio del combustibile solidale al corpo caldaia, con capacità di circa 1000 litri. La Figura 1 mostra l'apparecchio installato nel Centro Ricerche ENEA di Saluggia.



Figura 1. Caldaia a biomassa KWB Multifire USV V 30

La camera di combustione della caldaia è realizzata in acciaio speciale ed è composta da un piatto di combustione inferiore girevole a forma circolare, da un anello di combustione secondaria e da un sensore di livello delle braci.

La coclea di alimentazione trasporta il combustibile dal serbatoio di stoccaggio al piatto di combustione inferiore, alimentando quindi la camera di combustione dal basso. L'accensione del combustibile avviene in maniera automatica per mezzo di un dispositivo di accensione elettrico ad aria calda. Mediante l'apporto dell'aria primaria, sul piatto di combustione girevole viene quindi a formarsi un letto di braci, che subisce in tal modo un iniziale processo di gassificazione.

L'aria secondaria, immessa dall'anello di combustione secondaria, porta quindi alla combustione completa dei gas e dei composti formati precedentemente sul piatto. Il bruciatore della caldaia è chiuso superiormente da una cupola in acciaio, che garantisce la miscelazione dei gas incombusti con l'aria secondaria, e ne aumenta il tempo di residenza in camera di combustione. Il sensore di livello delle braci controlla il livello del combustibile sul piatto inferiore e determina l'opportuno dosaggio automatico da parte della coclea di alimentazione. La cenere cade dal margine del piatto di combustione su due coclee inferiori di scarico, che provvedono al trasporto fino al contenitore esterno delle ceneri.

Nella parte superiore della caldaia si trova lo scambiatore termico, costituito da un fascio di tubi verticali ad un giro di fumo. Lo scambiatore è pulito automaticamente mediante dei turbolatori girevoli posti all'interno dei tubi e azionati periodicamente da un motore a trasmissione a catena, posto sotto il coperchio della caldaia. In Figura 2 si riporta una sezione grafica esplicativa del corpo caldaia.

Attraverso un dispositivo elettronico connesso ai sensori e gli organi di alimentazione della caldaia, è possibile regolare i seguenti parametri di combustione dell'apparecchio:

- Concentrazione di ossigeno nei fumi (mediante sonda Lambda)
- Depressione in caldaia
- Livello di braci sul piatto di combustione inferiore
- Frequenza di rotazione del piatto inferiore di combustione
- Portata di aria primaria e secondaria
- Temperatura dell'acqua in caldaia
- Potenza erogata
- Potenza minima di spegnimento
- Estrazione ceneri

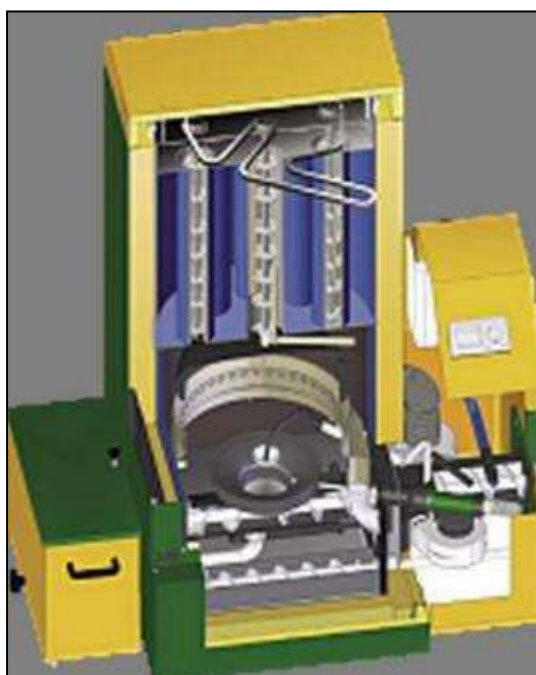


Figura 2. Schema del corpo caldaia KWB Multifire USV V 30

I dati di funzionamento forniti dal costruttore per l'apparecchio descritto e per il combustibile utilizzato sono riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Dati tecnici della caldaia forniti dal costruttore

Designazione	Unità	USV 25	USV 30*	USV 40	USV 49,5*	USV 50*	USV 60*	USV 80	USV 100**	
Potenza nominale	kW	25,0	30,0	40,0	49,5	50,0	60	82	99/101	
Carico parziale	kW	7,4	8,7	11,3	14,4	14,6	17,85	24,4	29,7/30,3	
Rendimento caldaia a potenza nominale	%	92,3	91,5	90,0	90,7	90,7	91,45	92,9	92	
Rendimento caldaia a carico parziale	%	90,1	89,9	89,5	90,0	90,0	90,5	91,5	92,2	
Potenza calorifica a potenza nominale	kW	28,6	34,6	46,7	56,2	56,7	66,6	86,5	112,9	
Potenza calorifica a carico parziale	kW	8,2	9,7	12,6	15,9	16,1	19,65	26,7	30,5	
Classe caldaia secondo EN 303-5	KI	3	3	3	3	3	3	3	3	
Dati idraulici										
Contenuto d'acqua	l	63	158	158	128	128	128	167	167	
Diametro del condotto dell'acqua	pollici	5/4	2	2	2	2	2	2	2	
Diametro del condotto dell'acqua	DN	32	50	50	50	50	50	50	50	
Diametro del dispositivo di protezione termica	pollici	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	
Resistenza idraulica a 10 K	mbar	8,1	9,2	11,5	19,4	19,4	27,3	43,1	64	
Resistenza idraulica a 20 K	mbar	2,1	2,4	3,0	5,0	5,0	6,9	10,8	16	
Temperatura della caldaia	°C	65 - 90	65 - 90	65 - 90	65 - 90	65 - 90	65 - 90	65 - 90	65 - 90	
Temperatura minima di ingresso in caldaia	°C	55	55	55	55	55	55	55	55	
Pressione d'esercizio max.	bar	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
Pressione di prova	bar	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	
Dati relativi al gas combusto										
Temperatura della camera di combustione	°C	900 - 1100								
Pressione della camera di combustione	mbar	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	
Aspirazione richiesta a potenza nominale/ a carico parziale	mbar	0,1/0,08	0,1/0,08	0,1/0,08	0,1/0,08	0,1/0,08	0,1/0,08	0,1/0,08	0,15/0,1	
Tiraggio per aspirazione necessario	si	si	si	si	si	si	si	si	si	
Temperatura del gas combusto a potenza nominale (per il calcolo della configurazione del camino)	°C	160	160	160	160	160	160	160	160	
Temp. del gas combusto a carico parziale (per il calcolo della configurazione del camino)	°C	90	90	90	90	90	90	90	100	
Portata di gas combusto a potenza nominale	kg/h	75	90	120	148,5	150	180	240	268	
Portata di gas combusto a carico parziale	kg/h	24	29	39	49,5	50	60	81	93	
Volume del gas combusto a potenza nominale	Nm³/h	58,8	70,5	94,0	116,3	117,5	141,0	188,0	209,0	
Volume del gas combusto a carico parziale	Nm³/h	18,8	22,7	30,6	38,4	38,8	47,0	63,5	72,6	
Diametro del tubo di fumo	mm	150	180	180	180	180	180	200	200	
Diametro del camino (valori indicativi)	mm	150	180	180	180	180	180	200	220	
Altezza minima di raccordo al camino	mm	1600	1900	1900	1900	1900	1900	2300	2300	
Tipo di camino		Refrattario all'umidità								
Combustibile Pellet di puro legno a norma ÖNORM M7135 o DIN Plus										
Potere calorifico	MJ/kg								17,6	
Densità	kg/m³								>650	
Contenuto d'acqua	Pes%								8-10	
Percentuale di cenere	Pes%								<0,5	
Lunghezza	cm								0,5-3	
Diametro	cm								0,5-0,6	
Contenuto in polvere prima del carico	Pes %								<1	
Materia prima	kg/kg	MS % legno puro, percentuale di corteccia < 15 %								
Cenere										
Capacità del contenitore della cenere	l	65	65	65	65	65	65	65	65	
Estrazione della cenere	si	si	si	si	si	si	si	si	si	
Impianto elettrico USV V										
Potenza di allacciamento	W	1621	1732	1824	1824	/	/	/	/	
Impianto elettrico USV D,ZI agitatore										
Potenza di allacciamento	W	2179-2379	2290-2490	2382-2582	2382-2582	2382-2582	2382-2582	2502-2702	2524-2724	
Impianto elettrico USV GS										
Potenza di allacciamento	W	3009	3120	3212	3212	3212	3212	3332	3354	

Designazione	Unità	USV 25	USV 30*	USV 40	USV 49,5*	USV 50*	USV 60*	USV 80	USV 100**
Pesi									
Camicia d'acqua	kg	115	197	197	227	227	227	286	286
Corpo caldaia	kg	142	238	238	268	268	268	327	327
Peso della caldaia USV V	kg	699	785	785	-	-	-	-	-
Peso della caldaia USV D	kg	556	705	705	768	768	768	990	997
Peso della caldaia USV ZI	kg	601	750	750	813	813	813	1035	1042
Emissioni in base al verbale di collaudo									
		FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT	FJ - BLT
N° del foglio di collaudo		BLT-025/05	***	BLT-021/06	BLT-1010/09	***	***	BLT-022/06	BLT-024,023/06
Contenuto di O2 a potenza nominale	Vol%	6,1	6,4	7,1	7,0	7,0	7,0	6,8	6,7
Contenuto di O2 a carico parziale	Vol%	8,7	10,4	13,8	12,8	12,7	11,7	9,5	10,0
Contenuto di CO2 a potenza nominale	Vol%	14,3	14,0	13,4	13,4	13,5	13,5	13,6	13,8
Contenuto di CO2 a carico parziale	Vol%	11,8	10,2	6,9	7,9	7,9	9,0	11,0	10,8
Risp. 10 % O2 secco (EN303-5)									
CO a potenza nominale	mg/Nm³	26,0	52,0	104,0	91,4	90,8	77,5	51,0	7,0
CO a carico parziale	mg/Nm³	139,0	184,7	276,0	236,8	234,8	193,5	111,0	62,0
NOx a potenza nominale	mg/Nm³	115,0	132,3	167,0	175,1	175,5	184,0	201,0	184,0
NOx a carico parziale	mg/Nm³	n.m.	n.m.	156,0	161,5	161,8	167,5	179,0	n.m.
OGC a potenza nominale	mg/Nm³	1,0	1,3	2,0	1,8	1,8	1,5	1,0	<1
OGC a carico parziale	mg/Nm³	3,0	4,3	7,0	5,6	5,5	4,0	1,0	1,0
Polvere a potenza nominale	mg/Nm³	37,0	33,3	26,0	25,8	25,8	25,5	25,0	26,0
Polvere a carico parziale	mg/Nm³	32,0	40,0	56,0	53,6	53,5	51,0	46,0	n.m.
Risp. 13 % O2 secco (FJ - BLT)									
CO a potenza nominale	mg/Nm³	19,0	38,0	76,0	66,7	66,3	56,5	37,0	5,0
CO a carico parziale	mg/Nm³	101,0	134,0	200,0	171,7	170,3	140,5	81,0	45,0
NOx a potenza nominale	mg/Nm³	83,0	96,0	122,0	127,7	128,0	134,0	146,0	134,0
NOx a carico parziale	mg/Nm³	n.m.	n.m.	113,0	117,0	117,3	121,5	130,0	n.m.
OGC a potenza nominale	mg/Nm³	1,0	1,3	2,0	1,8	1,8	1,5	1,0	<1
OGC a carico parziale	mg/Nm³	2,0	3,0	5,0	4,1	4,0	3,0	1,0	<1
Polvere a potenza nominale	mg/Nm³	27,0	24,3	19,0	18,8	18,8	18,5	18,0	19,0
Polvere a carico parziale	mg/Nm³	23,0	29,0	41,0	39,3	39,3	37,5	34,0	n.m.
Ai sensi del § 15a-BVG (accordo austriaco sulle misure di protezione in riferimento agli impianti di combustione di piccole dimensioni)									
CO a potenza nominale	mg/MJ	13,0	25,3	50,0	43,8	43,5	37,0	24,0	3,0
CO a carico parziale	mg/MJ	68,0	89,0	131,0	112,5	111,5	92,0	53,0	29,0
NOx a potenza nominale	mg/MJ	56,0	64,0	80,0	83,8	84,0	88,0	96,0	87,0
NOx a carico parziale	mg/MJ	n.m.	n.m.	74,0	76,6	76,8	79,5	85,0	n.m.
OGC a potenza nominale	mg/MJ	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	<1
OGC a carico parziale	mg/MJ	2,0	2,3	3,0	2,5	2,5	2,0	1,0	<1
Polvere a potenza nominale	mg/MJ	18,0	16,3	13,0	12,8	12,8	12,5	12,0	12,0
Polvere a carico parziale	mg/MJ	15,0	19,0	27,0	25,8	25,8	24,5	22,0	n.m.

Per le prove sperimentali sui filtri catalitici, non è stata effettuata nessuna particolare regolazione della caldaia tranne l'impostazione della concentrazione di ossigeno nei fumi pari a 8%. E' stato quindi mantenuto il valore di default per tutti gli altri parametri. In tali condizioni, si sono determinati i seguenti valori medi di esercizio della caldaia¹:

¹ Il consumo di combustibile della caldaia è stato stimato attraverso la verifica indiretta del rendimento termico (secondo il metodo indicato nella UNI EN 303-5), rapportando i valori ottenuti da tale verifica alla misura diretta della potenza termica fornita al circuito idraulico.

Tabella 3. Condizioni di esercizio della caldaia

consumo combustibile ¹ (kg/h)	~ 7
potenza erogata (kW)	31
rendimento termico (%)	91
portata acqua (l/s)	2,03
temperatura di mandata (°C)	73
temperatura di ritorno (°C)	69
temperatura fumi (°C)	138
depressione in caldaia (mbar)	~ 0,25
concentrazione O ₂ nei fumi (vol %)	~ 8

Di seguito si riportano gli andamenti dei maggiori parametri di combustione, registrati durante una delle prove di esercizio della caldaia:

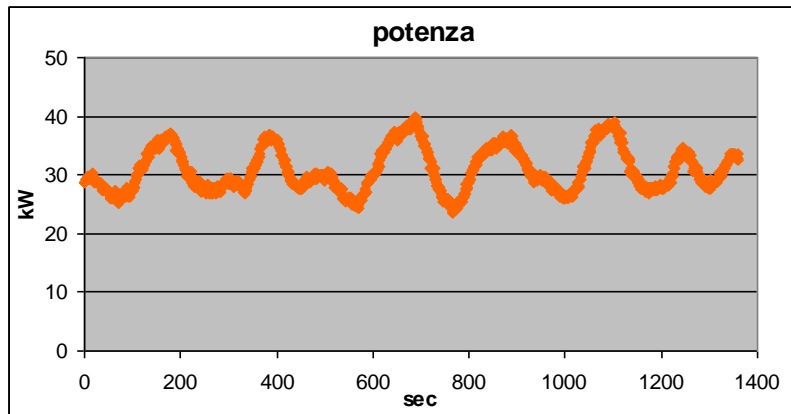


Figura 3. Potenza termica erogata dalla caldaia durante una prova di combustione

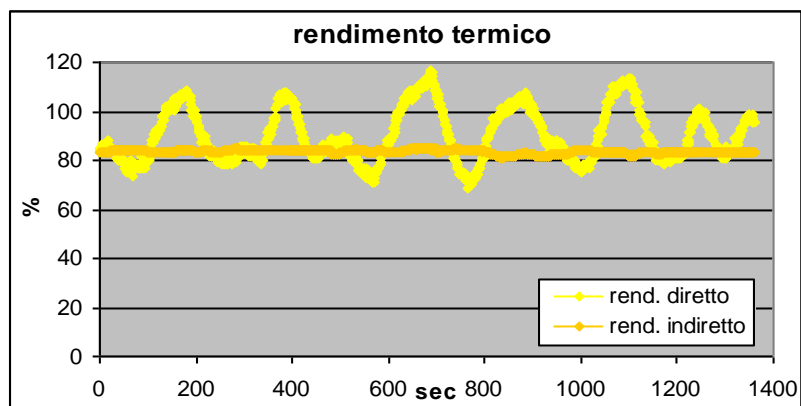


Figura 4. Rendimento termico della caldaia durante una prova di combustione

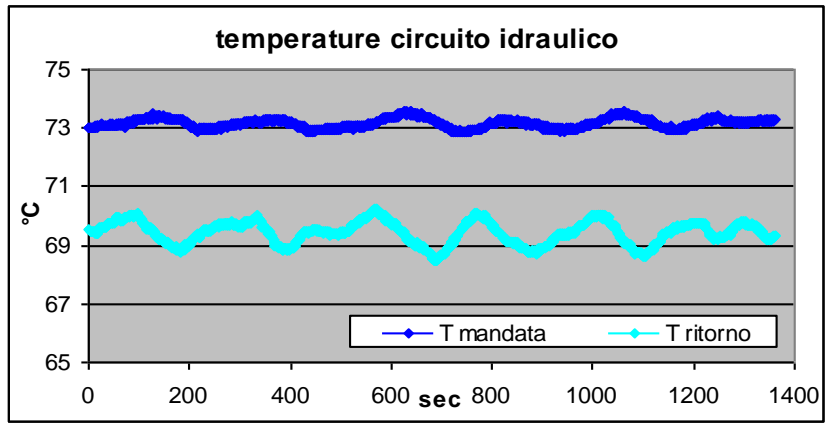


Figura 5. Temperature del circuito idraulico durante una prova di combustione

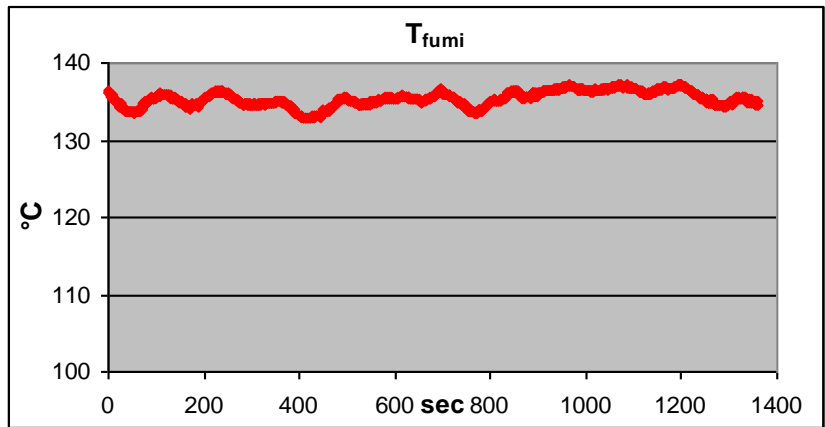


Figura 6. Temperatura dei fumi durante una prova di combustione

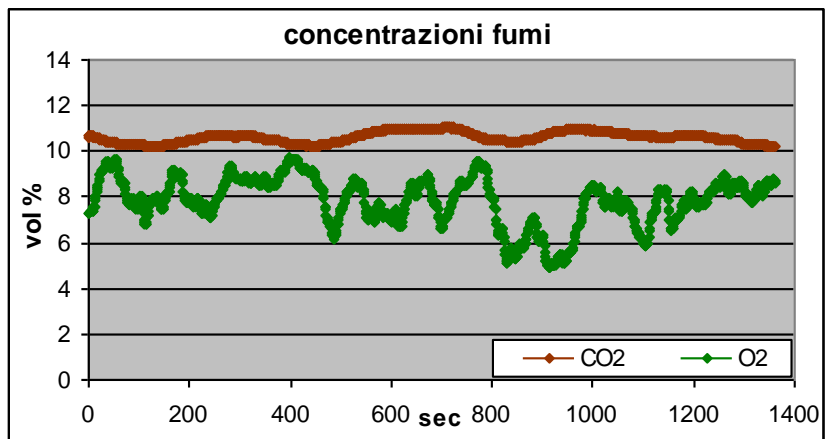


Figura 7. Concentrazioni dei fumi durante una prova di combustione

2.2.2 Linea generale di campionamento

I fumi di combustione in uscita dalla caldaia raggiungono l'ingresso del sistema di aspirazione della Hall attraverso un condotto fumario in acciaio di circa 3000 mm di lunghezza. Tale condotto è posto in posizione orizzontale ed è coibentato con lana di vetro per uno spessore di circa 20 mm. Il diametro interno è $D_i = 150$ mm, mentre il diametro esterno risulta $D_e = 190$ mm.

Lungo tale condotto, ad una distanza di circa 2500 mm dallo scarico della caldaia, una portata campionaria di fumi (circa 9 Nlitri/min) è aspirata attraverso un ugello di 12 mm di diametro, posto all'interno della canna fumaria e distante circa 11 mm dal centro della sezione di passaggio dei fumi. A valle dell'ugello è inserito un tratto tubolare orizzontale in acciaio (diametro interno = 17 mm) della lunghezza di circa 20 cm, riscaldato mediante fasce scaldanti e coibentato con lana di vetro.

A tale raccordo segue una colonna di acciaio di diametro esterno pari a 42 mm, formata da vari segmenti tubolari collegabili uno all'altro, con una lunghezza totale di circa 1600 mm.

La stessa colonna è inserita per una lunghezza di 700 mm in un forno tubolare, che ne riscalda quindi la parte centrale. Quest'ultima è dotata di manicotti anch'essi in acciaio (circa 15 cm di lunghezza), intercambiabili tra loro e connessi ai restanti segmenti della colonna, all'interno dei quali sono disposti i filtri ceramici da testare (riscaldabili quindi a varie temperature).

All'esterno del forno tubolare, a monte e a valle dei manicotti, sono disposti sulla colonna i punti di misurazione delle perdite di carico, relative quindi in massima parte ai dispositivi filtranti inseriti lungo la linea di derivazione.

A valle dei manicotti e all'esterno del forno tubolare è disposta la linea di campionamento degli IPA, composta da un ugello in acciaio (diametro interno = 6 mm) inserito nella colonna di derivazione dei fumi fino al centro della sezione, da un portafiltro in acciaio contenente un filtro in microfibra di vetro per la ritenzione del particolato, da una fiala adsorbente X-AD₂ per la cattura degli idrocarburi, da un condensatore e da una seconda pompa di aspirazione.

Alla base della colonna d'acciaio è collegato un secondo tratto orizzontale (diametro interno = 17 mm), anch'esso riscaldato mediante fasce scaldanti e alla cui altra estremità è montato il sistema di campionamento del particolato ad impattore (vedi paragrafi successivi).

In uscita dall'impattore, i fumi di combustione vengono convogliati in un condensatore a serpentina, a cui è di seguito collegata la pompa di aspirazione del gas. Dalla stessa camera del condensatore viene inoltre prelevata una portata minima di fumi (1÷2 litri/min) che viene convogliata verso gli analizzatori dei gas. Questi ultimi ricevono quindi campioni già relativamente raffreddati e depurati delle polveri e della sostanze condensate, restituendo le concentrazioni volumetriche (sul secco) di ossigeno, anidride carbonica e monossido di carbonio.

Lungo la linea sperimentale sono inoltre presenti varie termocoppie di tipo K, con le quali si misurano le temperature in canna fumaria, in prossimità del filtro ceramico, lungo la linea di derivazione dei fumi (in corrispondenza della linea di prelievo degli IPA), e a valle del condensatore.

Tutte le misure ricavate in tempo reale durante le prove sono acquisite e registrate mediante un sistema informatico di acquisizione ed elaborazione dati, attraverso il quale è anche possibile determinare allo stesso tempo i maggiori parametri di esercizio dell'impianto (potenza, rendimenti, portata e velocità dei fumi, velocità superficiale dei filtri, etc).

Di seguito si riportano uno schema generale dell'apparato sperimentale e una sua vista all'interno della Hall Tecnologica THEXAS.

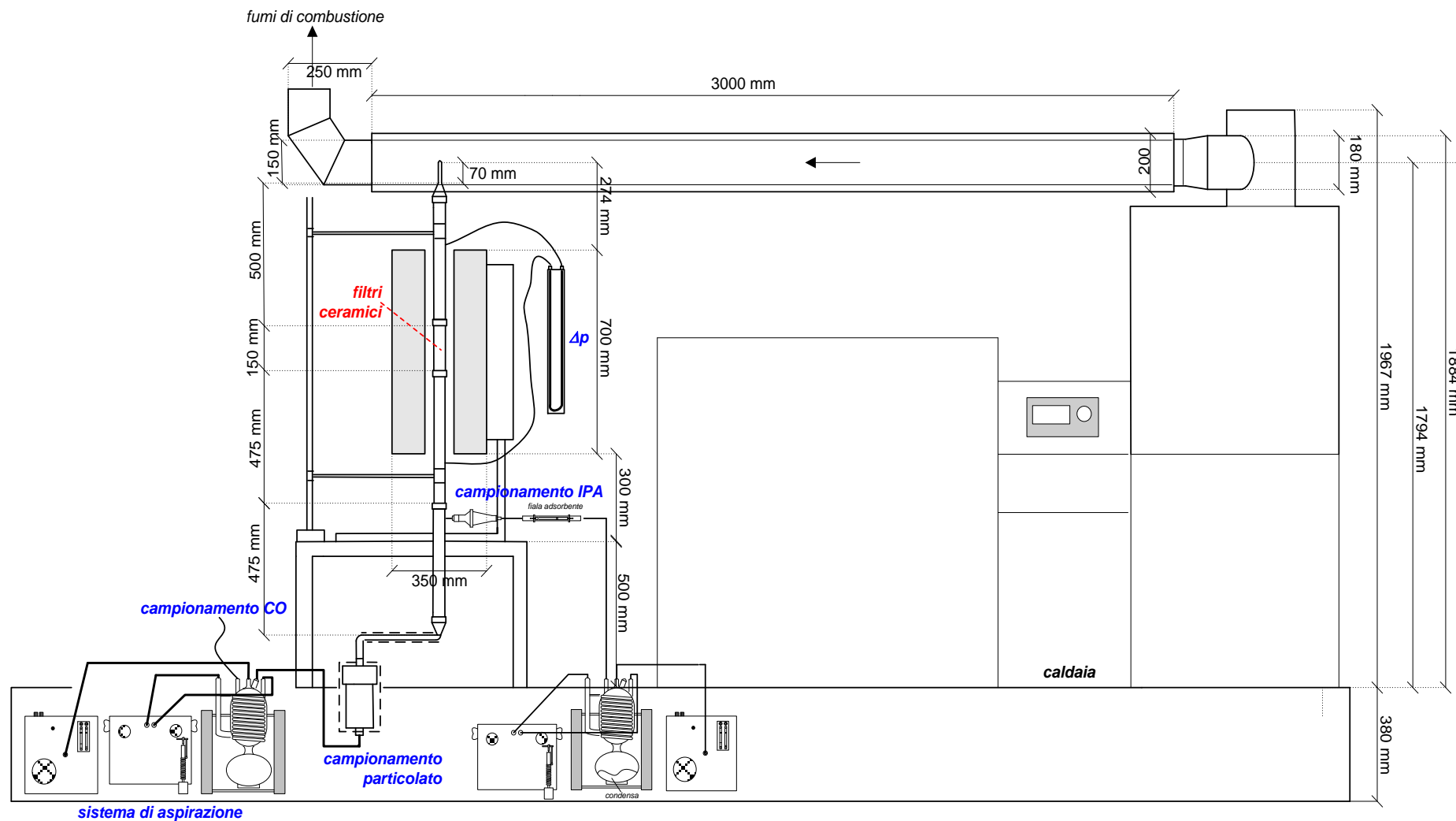


Figura 8. Schema generale dell'apparato sperimentale



Figura 9. Linea sperimentale al Centro Ricerche ENEA di Saluggia

2.2.3 Strumenti di campionamento e di analisi dei fumi

2.2.3.1 Strumenti di controllo di pressione e temperatura

I manicotti d'acciaio contenenti i filtri ceramici e connessi ai restanti segmenti della colonna di derivazione dei fumi sono, come detto, riscaldati esternamente tramite un forno tubolare elettrico, le cui caratteristiche principali sono di seguito elencate:

- altezza della zona riscaldata: 600 mm
- altezza totale dello strumento: 1000 mm
- diametro esterno: 350 mm
- diametro di lavoro: 110 mm
- temperatura massima di lavoro: 1200°C
- temperatura massima di lavoro in esercizio continuo: 1100°C
- rampa massima di riscaldamento: 100 °C/min
- rampa di raffreddamento (Tmax-100 °C): 45'
- termocoppia: tipo N
- alimentazione: 220 V (monofase)
- peso: 32 kg

Nella Figura 10 si riporta la colonna di derivazione dei fumi montata con uno dei manicotti per il contenimento dei filtri all'interno del forno tubolare.



Figura 10. Colonna di derivazione dei fumi e forno tubolare

Le fasce scaldanti per il riscaldamento dei tratti di linea non inseriti all'interno del forno hanno lunghezza pari a circa 1,8 metri e larghezza rispettivamente pari a 13 e 25 mm. Esse sono rivestite da una guaina in silicone e dotate di termostato incorporato. Raggiungono una temperatura massima di 210°C, con una potenza di assorbimento rispettivamente di 216 e 432 W.

Il manometro utilizzato per la misura delle perdite di carico all'interno della colonna di acciaio è un manometro a colonna d'acqua ad "U", con una prevalenza massima assoluta di 1000 mmH₂O.

2.2.3.2 Impattore multistadio

Lo strumento per il campionamento del particolato è l'impattore tipo *DEKATI 3-stages*, che permette la determinazione gravimetrica del particolato solido contenuto nei fumi, con distinzione delle seguenti frazioni granulometriche:

- PM < 1 µm;
- PM > 1µm; < 2,5 µm;
- PM > 2,5 µm; < 10 µm;
- PM > 10 µm.

Al fine di garantire il giusto taglio tra le diverse frazioni granulometriche, è tuttavia necessario alimentare l'impattore con una portata costante di fumi pari a 10 l/min, indipendentemente dalle condizioni isocinetiche dettate dall'esercizio della caldaia e dalla configurazione della linea di prelievo.

L'impattore è poi riscaldato esternamente mediante un involucro flessibile a resistenza elettrica, che mantiene lo strumento a temperatura costante fino a valori di 200 °C. In tal modo si evita la condensazione dell'umidità e degli idrocarburi condensabili contenuti nei fumi sui filtri dell'impattore. Questi ultimi, tranne che per la frazione granulometrica PM < 1 µm, sono costituiti da lamine in alluminio rivestite di grasso, che trattengono le particelle solide di particolato a caldo, mediante intercettazione. Nella figura seguente è riportato l'impattore utilizzato per le prove sperimentali.



Figura 11. Impattore per la misura gravimetrica del particolato

2.2.3.3 Linea campionamento IPA

Il campionamento degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) prodotti durante il processo di combustione è effettuato impiegando fiale contenenti resina X-AD₂ (figura 12), secondo quanto suggerito dal metodo TO-13 dell'Environmental Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti.

La resina polimerica X-AD₂ è composta da copolimeri di polistirene ed è ampiamente usata per adsorbire composti organici e composti alogenati presenti in fase liquida o gassosa. Inoltre, a differenza di altre resine, X-AD₂ è stabile fino a 200°C e permette il campionamento da fluidi riscaldati.

Le fiale impiegate per il campionamento hanno dimensioni 8 x 110 mm con due sezioni di campionamento contenenti rispettivamente 50 e 100 mg di resina. Un filtro di guardia in lana di vetro è posto prima della sezione adsorbente maggiore, mentre una base di vetro sinterizzato è posto tra le due sezioni e alla base della sezione minore. Il flusso di aria necessario al campionamento (2 l/min) è mantenuto costante mediante un sistema di aspirazione dedicato. A monte delle fiale è montato un portafiltra contenente un filtro in microfibra di vetro al fine di intrappolare il particolato solido ed evitare che questo intasi il sistema di adsorbimento.

Dopo ogni campionamento, i filtri in microfibra vengono associati alle corrispondenti fiale adsorbenti per l'estrazione degli IPA eventualmente condensati sulla fase particellare. A valle delle fiale è infine inserito un condensatore per il recupero della fase vapore e dei composti organici in essa presenti.



Figura 12. Fiala in vetro pre riempita con resina di tipo X-AD₂

2.2.3.4 Sistema di analisi dei gas

I maggiori gas emessi durante la combustione della biomassa sono campionati a valle dei filtri ceramici e analizzati con strumenti dedicati posti in linea in un sistema di analisi ad armadio (figura 13).

L'analizzatore *Enox II*, basato sulla spettroscopia non dispersiva nell'infrarosso, è utilizzato per la misura contemporanea di CO e CO₂, mentre l'analizzatore ossigeno estrattivo *E 705* ad ossidi di zirconio è dedicato all'analisi di O₂.

Il gas aspirato dalla linea di campionamento, dopo aver attraversato l'impattore, è convogliato verso un condensatore dal quale viene estratta una minore portata campionaria (1÷2 l/min) diretta verso gli analizzatori. A guardia dei sistemi ottici, il sistema ad armadio dispone di una pompa peristaltica per la rimozione di eventuale condensato, di un filtro in cellulosa per la ritenzione della fase particellare residua, e di una cella peltier per il successivo raffreddamento dei gas e l'ulteriore rimozione della fase condensabile. I gas sono quindi diretti all'analizzatore a infrarosso per CO e CO₂ e in linea all'analizzatore per O₂.

Il principio di funzionamento dell'analizzatore *Enox II* si basa sulla capacità delle molecole di gas di interagire con la radiazione infrarossa ed assorbire in modo specifico alcune lunghezze d'onda. Grazie alla preventiva taratura del sistema di analisi, è quindi possibile determinare la concentrazione del gas di interesse valutando l'assorbimento della radiazione all'interno di una cella di analisi. I range di analisi per gli analizzatori utilizzati sono stati rispettivamente 0 – 10.000 ppm per CO e 0 – 21% per CO₂.

L'analizzatore *E 705* per l'analisi di O₂ si basa sulla proprietà dell'ossido di zirconio, stabilizzato con ittrio, di condurre ioni O²⁻ e generare quindi una corrente elettrica. Il gas campionato è condotto in una cella ad alta temperatura dove, grazie alla pressione differenziale parziale di O₂ tra il gas analizzato e un gas di riferimento (normalmente aria ambiente) un elettrodo in platino restituisce il valore di corrente elettrica a cui corrisponde il valore di concentrazione di O₂. Il range di misura dell'analizzatore è preimpostato a 0 – 21%.



Figura 13. Sistema di analisi dei gas ad armadio

2.4 Dispositivi filtranti testati

I dispositivi filtranti testati durante la campagna di prove sperimentali seguono la tecnologia *wall flow*, cioè sono costituiti da monoliti ceramici porosi (attivati o meno con catalizzatori), attraverso le cui superfici laterali la corrente gassosa da trattare (fumi) è costretta a passare. Si realizza di conseguenza un processo di filtrazione basato sia sui meccanismi di massa (inerziale, di intercettazione e di diffusione) che di superficie (“cake filtration”).

In presenza di catalizzatori e ad adeguate temperature di esercizio le particelle carboniose adese alla superficie dei filtri e le molecole di gas organici che ne oltrepassano le pareti vengono quindi termodistrutte e convertite in composti più leggeri e meno inquinanti dal punto di vista ambientale.

I prototipi testati hanno tutti forma cilindrica piena, con altezza pari a 125 mm, al cui interno sono stati creati dei canali longitudinali a sezione quadrata, paralleli al flusso di gas che li investe. Tali canali sono alternativamente tappati con della pasta cementizia in corrispondenza di varie sezioni trasversali, in maniera quindi da costringere il passaggio dei fumi attraverso le loro pareti laterali. Di seguito si riporta lo schema funzionale dei filtri tipo *wall flow*.

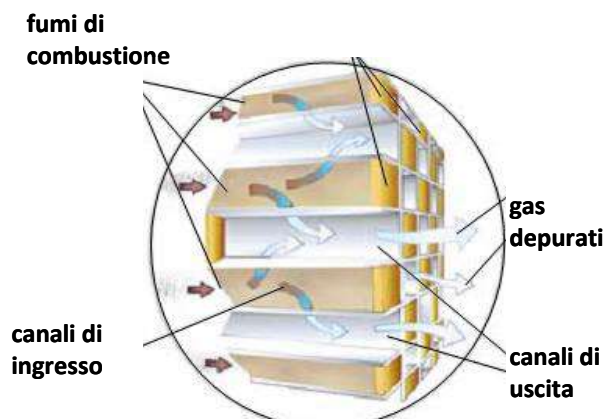


Figura 14. Schema funzionale dei filtri tipo *wall flow*

Le tipologie di filtri sottoposte ad analisi sono state essenzialmente due, rispettivamente fornite da FN S.p.A. e dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’università di Salerno (Di.In.). Di seguito si riportano le sezioni trasversali delle due tipologie.

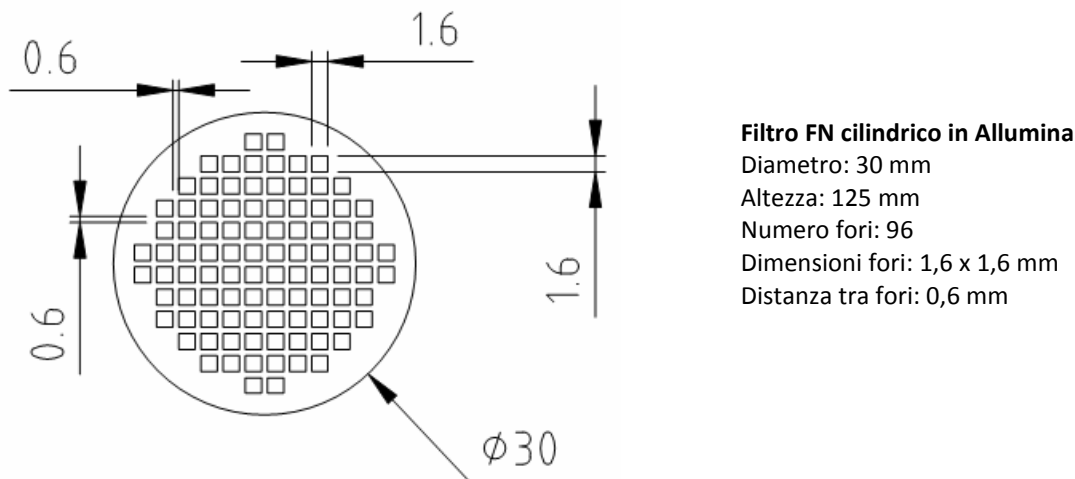
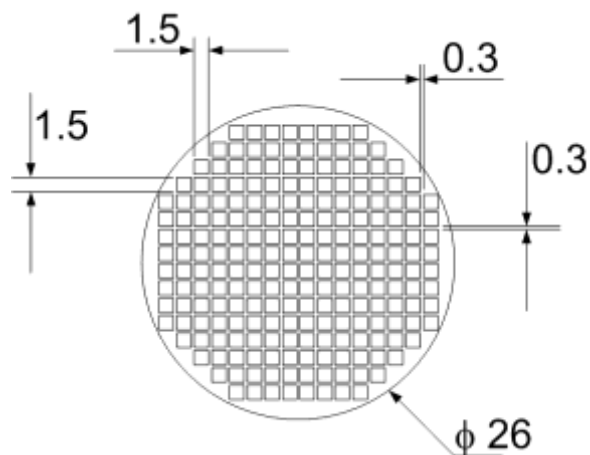


Figura 15. Sezione trasversale filtri FN



Filtro UNISA cilindrico in SiC

Diametro: 260 mm

Altezza: 125 mm

Numero fori: 216

Dimensioni fori: 1,5 x 1,5 mm

Distanza tra fori: ~ 0,3 mm

Figura 16. Sezione trasversale filtri UniSA

Per quanto riguarda i filtri forniti da FN S.p.A., sono state testate due differenti mescole ceramiche, rispettivamente con contenuti di Allumina (Al_2O_3) pari a 60% e 92%.

I filtri UniSA, invece, sono stati forniti tutti con la stessa composizione di base in SiC, ma additivati con diverse percentuali di catalizzatore a base di ferrite di rame ($CuFe_2O_4$). Tali percentuali sono state rispettivamente: 0% (filtri bianchi), 15% e 25%.

Di seguito si riportano alcuni dei dati principali di caratterizzazione dei filtri, derivanti dalle analisi effettuate da FN S.p.A.

Tabella 4. Proprietà dei filtri ceramici sperimentati

	FN 60% Al_2O_3	FN 92% Al_2O_3	UNISA (SiC) 0% cat.	UNISA (SiC) 15% cat.	UNISA (SiC) 25% cat.
Densità ad He (g/cm^3)	3,90	3,97	3,2	3,3	3,5
Densità di bulk (g/cm^3)	2,23	2,12	1,8	1,9	2,4
Diametro medio dei pori (μm)	0,62	0,56	21,2	24,6	-
Porosità aperta (%)	43,7	46,6	44	43	29



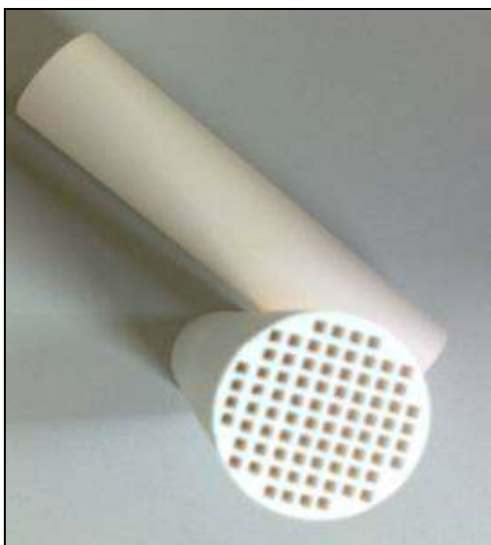


Figura 17. Filtri ceramici UniSA

Figura 18. Filtri ceramici FN

2.5 Modalità di esecuzione delle prove

2.5.1 Numero e durata delle prove sperimentali

Per l'attività sperimentale sono state condotte complessivamente 25 prove, distinte tra quelle relative alla verifica funzionale dell'apparato sperimentale e alla ricerca delle condizioni di base della caldaia (prove di "zero"), e i test propriamente dedicati all'osservazione dei filtri.

Nel primo caso, la durata dei campionamenti è stata compresa tra 30 e 60 minuti circa, mentre per la verifica dei filtri si è cercato, quando possibile, di raggiungere 120 minuti di campionamento.

La complessità dell'apparato sperimentale, la necessità di ripulire gli strumenti e le linee di campionamento alla fine di ogni prova, i tempi necessari per il raggiungimento delle condizioni di regime da parte della caldaia, non hanno consentito di svolgere di regola più di una prova al giorno, che in media è durata complessivamente 8 ore.

2.5.2 Procedura dei test sperimentali

Le prove sperimentali seguono lo stesso iter procedurale sia per la ricerca delle condizioni di base ("zeri") che per la verifica dei filtri ceramici.

All'inizio di ogni prova, la camera di combustione della caldaia è ripulita dalla fuliggine rimasta adesa alle pareti e dalle ceneri deposte sugli organi di movimento (piatto di combustione inferiore, sensore di livello braci, etc.), in maniera da evitare che tra una prova e l'altra si verifichino differenze di prestazioni e di sviluppo del processo di combustione.

Di seguito viene caricato il combustibile nel serbatoio di stoccaggio e quindi accesa la caldaia, contemporaneamente al sistema di aspirazione fumi e al circuito idraulico.

L'esercizio della caldaia è mantenuto costantemente a pieno regime, ossia al 100% della potenza disponibile, grazie alla regolazione automatica del sistema di raffreddamento del circuito idraulico, per il quale l'acqua di ritorno in caldaia è mantenuta sempre inferiore a 70°C.

Viene quindi azionato il sistema di analisi dei gas ad aradio, la cui completa operabilità avviene dopo circa un'ora, cioè in seguito al raggiungimento delle corrette temperature di esercizio da parte delle celle degli

analizzatori. Il sistema di campionamento dei gas continua quindi ad aspirare aria ambiente fino all'inizio del prelievo dei fumi di combustione.

Alla fase di accensione degli strumenti segue la pulizia del tratto orizzontale della linea di derivazione dei fumi, all'interno del quale si suppone possano concentrarsi le polveri e le sostanze condensate derivanti dalla combustione del pellet durante la prova precedente.

Il tratto in questione è quindi staccato dalla base della colonna d'acciaio, riscaldato esternamente mediante l'utilizzo delle fasce scaldanti e flussato con aria per circa un'ora.

Dopo tale operazione, la linea di derivazione dei fumi è rimontata nella sua posizione d'esercizio, aggiungendo nella sua zona centrale uno dei manicotti contenente il filtro ceramico da testare (nel caso di una prova di "zero", il manicotto viene ovviamente lasciato vuoto).



Figura 19. Filtro ceramico inserito nel manicotto

Montata la colonna, viene azionato intorno ad essa il forno tubolare, preimpostando la temperatura al valore desiderato. Sono quindi azionate le fasce scaldanti nei tratti non inseriti nel forno ed è montato alla base della colonna l'impattore, all'interno del quale vengono inseriti i rispettivi filtri condizionati precedentemente in essiccamento per almeno 24 ore. L'impattore viene quindi avvolto nel suo involucro riscaldante, a cui viene impostata una temperatura di 200 °C.

L'acquisizione dei dati sperimentali e il campionamento dei gas inizia dopo circa 5 ore dall'accensione della caldaia, a seguito del raggiungimento delle temperature di esercizio del forno e dell'impattore, e verificata la condizione di prova, dettata dalla UNI EN 303-5, per la quale:

$$\frac{T_{rit} + T_{man}}{2} - T_{amb} \geq 40$$

T_{rit} : temperatura di ritorno dell'acqua in caldaia (°C);

T_{man} : temperatura di mandata dell'acqua in caldaia (°C);

T_{amb} : temperatura ambiente (°C).

Nelle condizioni "a freddo", ossia per le prove di zero e in caso di verifica dei filtri ceramici a bassa temperatura, il forno tubolare è impostato in maniera tale che i fumi di combustione fluiscano nella colonna di derivazione ad una temperatura di poco superiore a quella registrata in canna fumaria, e all'incirca pari al valore indicato nei dati di esercizio forniti dal costruttore della caldaia (160 °C, vedi Tabella 2).

Per le prove "a caldo", cioè in caso di verifica dei filtri catalizzati, la temperatura del forno tubolare è invece regolata affinché i fumi fluiscano nella colonna di derivazione ad una temperatura comunque superiore a 400 °C, valore indicativo fornito da UNISA per l'attivazione dei catalizzatori.

La portata di aspirazione dei fumi per la linea di campionamento degli IPA è mantenuta costantemente pari a 2 l/min, mentre la pompa di aspirazione principale è regolata in maniera che l'impattore sia sempre investito da un flusso di gas uguale a 10 l/min, come indicato sul manuale d'uso dello strumento.

In base alle condizioni indicate, per ogni prova è quindi calcolata la velocità superficiale con la quale i fumi di combustione investono i filtri ceramici all'interno dei manicotti.

2.5.3 Criticità riscontrate nella conduzione delle prove

L'attività sperimentale è stata condizionata da alcune difficoltà operative, prima fra tutte il notevole ritardo, rispetto alla data di fine annualità, con il quale sono stati recapitati al Centro ENEA di Saluggia gli strumenti necessari alla sperimentazione. Ciò ha purtroppo impedito che venisse svolta con maggior dettaglio l'analisi del funzionamento della nuova caldaia, e che venissero operati interventi migliorativi sulla linea di campionamento, a seguito di una prima verifica funzionale.

Altre difficoltà riscontrate durante le prove sono:

- L'inaspettata sensibilità dell'analizzatore O₂ ad ossidi di zirconio rispetto al contenuto di CO nei fumi, a causa della quale si sono spesso registrate concentrazioni di O₂ più basse e non rispondenti ai valori impostati in caldaia (controllati mediante sonda lambda). E' risultato quindi maggiormente difficoltoso verificare le condizioni reali di esercizio della caldaia.
- La non perfetta efficacia dei dispositivi di deumidificazione dei fumi presenti nel sistema di analisi ad armadio (scaricatore di condensa, refrigeratore a peltier), con la conseguente alimentazione agli analizzatori dei fumi di campioni non perfettamente anidri.
- Le perdite di carico dei filtri ceramici inaspettatamente alte (soprattutto per i filtri FN), le quali hanno comportato il verificarsi di infiltrazioni di aria all'interno della colonna di derivazione dei fumi, pur essendo quest'ultima realizzata a tenuta e resistente alle alte temperature. Presumibilmente tali infiltrazioni si sono verificate, a causa del grosso carico dovuto ai filtri, attraverso i punti di inserimento delle sonde per il campionamento (linea IPA), nei punti di giunzione dei vari tratti della colonna e in corrispondenza degli allacciamenti dell'impattore. Il verificarsi di tale inconveniente ha ovviamente inficiato il valore dei dati sperimentali acquisiti, per cui molte delle prove effettuate sono state per tale ragione invalidate.
- La corrispondenza tra la risoluzione della bilancia di precisione utilizzata per le pesate dei filtri dell'impattore (0,1 mg), e i quantitativi di particolato campionati durante le prove (soprattutto per PM > 1; PM > 2,5; PM > 10), la cui determinazione quantitativa risente quindi in alcuni casi di un grado di incertezza non trascurabile.

2.7 Risultati

I risultati di seguito riportati si riferiscono alle determinazioni effettuate per la misura di CO e del particolato solido (nelle sue frazioni granulometriche), nei casi di singolo funzionamento della caldaia e in relazione all'utilizzo dei filtri ceramici forniti da FN S.p.A. (filtri FN) e Di.In. (filtri UNISA), con presenza o meno del catalizzatore a base di ferrite di rame.

I dati si riferiscono alle sole prove sperimentali per le quali le difficoltà descritte nel paragrafo precedente non hanno inficiato il corretto svolgimento delle stesse, per cui le misure effettuate possono considerarsi valide.

Al momento della redazione del presente documento, non sono ancora disponibili i dati relativi all'analisi dei campioni di IPA (in fase di realizzazione da parte di FN S.p.A.), per i quali si rimanda ai successivi report inerenti la stessa attività di ricerca.

L'elaborazione dei dati è stata principalmente finalizzata ad una prima verifica dell'applicabilità e dell'efficacia dei filtri tipo *wall flow* quali sistemi di abbattimento degli inquinanti organici e a base carboniosa presenti nei fumi di combustione della biomassa solida.

Al valore assoluto dei dati di seguito riportati va quindi affiancata un'osservazione di confronto degli stessi, le cui considerazioni finali vengono espresse nel capitolo successivo.

2.7.1 Dati di emissione della caldaia

Le emissioni di particolato solido della caldaia sono di seguito riportate come concentrazioni in massa nei fumi (riportate al 10% O₂) delle diverse frazioni granulometriche distinte dall'impattore. Le misure si riferiscono a 5 diversi campionamenti effettuati in tre giorni di prova, ad una temperatura media dei fumi in canna fumaria compresa tra 135°C e 145°C, e ad una temperatura di campionamento pari a 190 °C.

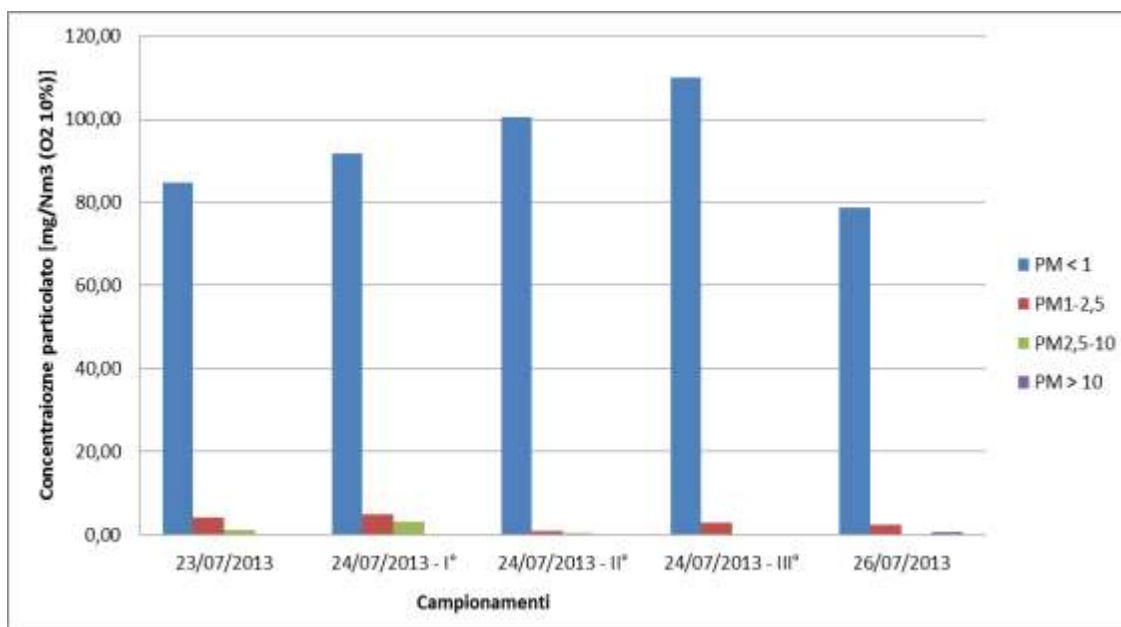


Figura 20. Concentrazioni di particolato solido misurate nelle prove di “zero”, secondo le diverse frazioni granulometriche

Nella tabella successiva vengono espresse media e deviazione standard² delle stesse misure, distinte anch'esse per frazione granulometrica³, e riportate ad una concentrazione di O₂ nei fumi pari a 10%. I dati su riportati mostrano chiaramente che la maggioranza del particolato solido prodotto in caldaia dalla combustione del pellet ha dimensioni inferiori al micron (circa il 95% in peso), e che invece non si riscontrano frazioni di particolato superiori a 10 µm.

Tabella 5. Media e deviazione standard delle concentrazioni di particolato della caldaia, distinte per frazione granulometrica

■ PM < 1		■ PM1-2,5		■ PM2,5-10		■ PM > 10	
Media (mg/Nm ³)	Dev.St (mg/Nm ³)	Media (mg/Nm ³)	Dev.St (mg/Nm ³)	Media (mg/Nm ³)	Dev.St (mg/Nm ³)	Media (mg/Nm ³)	Dev.St (mg/Nm ³)
93,19	12,43	3,10	1,56	1,57	1,38	N.D.	N.D.

Il valore massimo di concentrazione riscontrato è pari a 110 mg/Nm³, in base al quale la caldaia può essere annoverata in classe 3 secondo la UNI EN 303-5 (valore limite 150 mg/Nm³).

In aggiunta ai valori numerici, per una maggiore comprensione della tipologia di particolato emessa, vengono di seguito riportati in figura i filtri dell'impattore dopo il campionamento, distinti per prova e per frazione granulometrica.



Figura 21. Filtri dell'impattore a seguito del campionamento (prova 23/07/2013)

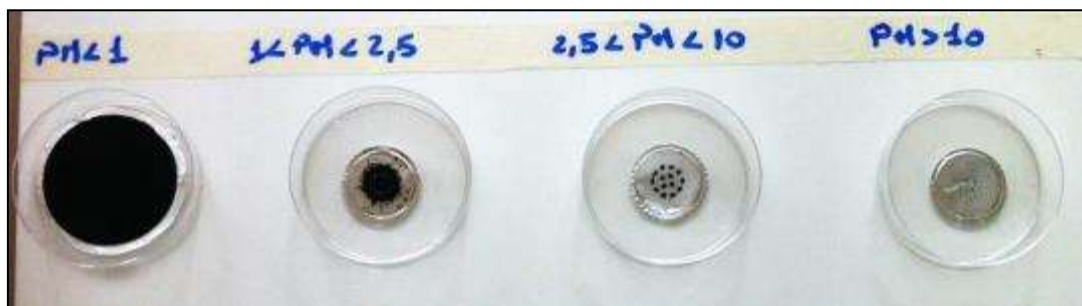


Figura 22. Filtri dell'impattore a seguito del campionamento (prova 26/07/2013)

² Pur non essendo significativa, dato l'esiguo numero di determinazioni effettuate, la deviazione standard è riportata in tabella come valore indicativo del range di variazione delle misure di concentrazione.

³ Per le determinazioni di particolato di dimensione superiore a 1 µm, dati i bassi quantitativi riscontrati sui filtri, assume un'importanza non trascurabile la risoluzione della bilancia pari a 0,1 mg.

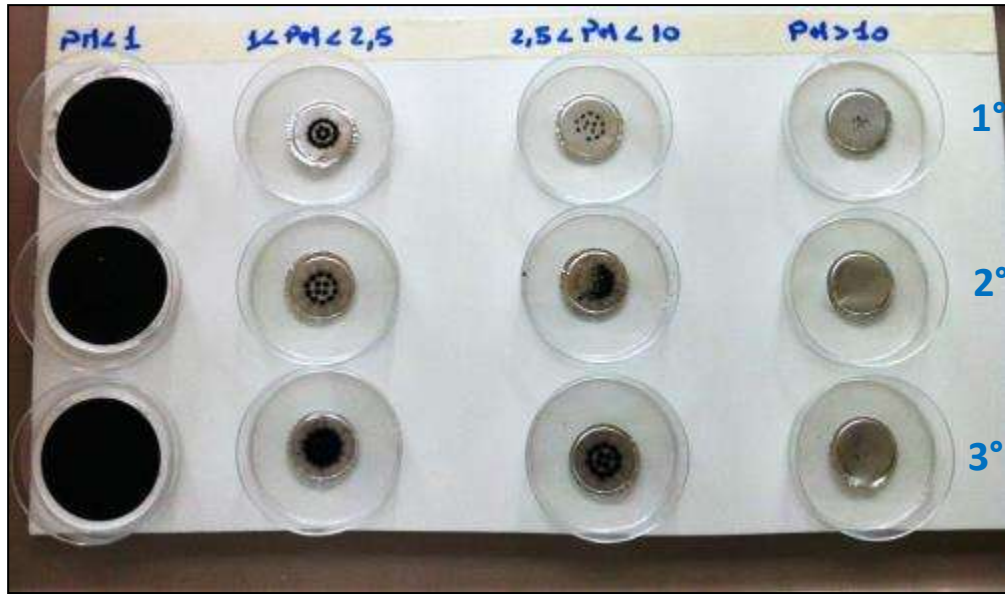


Figura 23. Filtri dell'impattore a seguito del campionamento (prova 24/07/2013 - 1°, 2°, 3° campionamento)

Per quanto riguarda il monossido di carbonio, durante le prove di "zero" si è rilevata una buona ripetibilità degli andamenti di concentrazione, con un ciclo di combustione pari a circa 45÷50 minuti (dipendente dalle regolazioni della caldaia). Si riporta quindi l'andamento del CO durante una sola prova di combustione, quale rappresentativo di tutte le determinazioni effettuate per la verifica delle emissioni della caldaia alle stesse condizioni di esercizio.

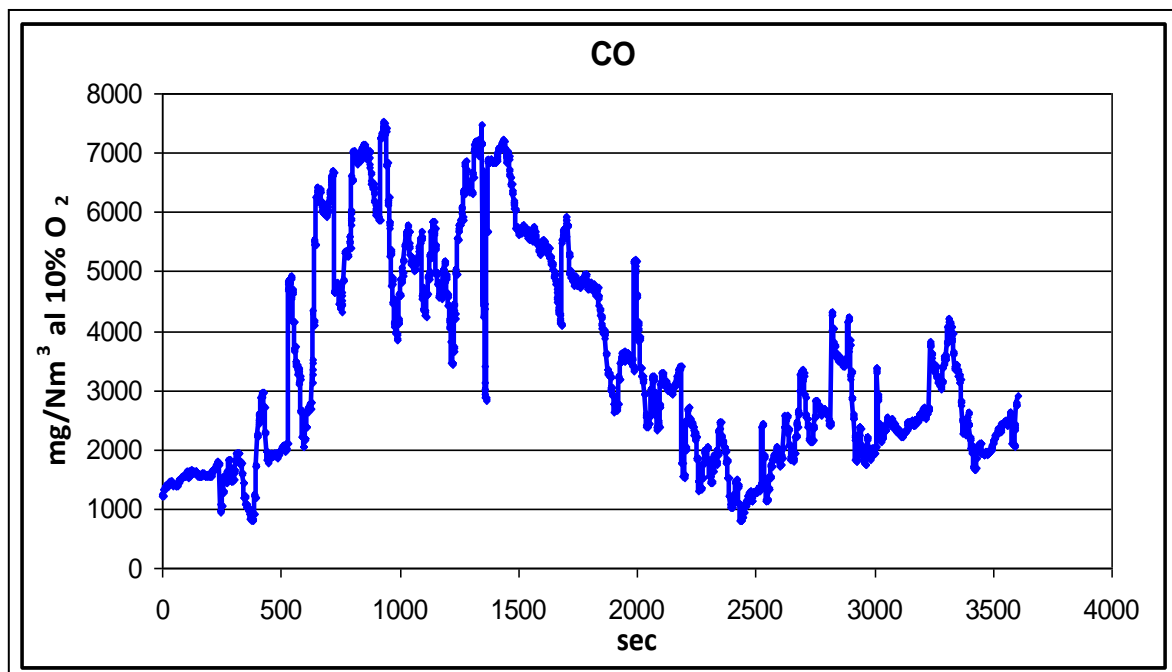


Figura 24. Andamento del CO durante una prova di "zero" della caldaia

I dati su esposti si riferiscono ad una prova di combustione (26/07/2013) durante la quale la temperatura dei fumi è rimasta compresa tra 130°C e 140°C, e la concentrazione di O₂ nei fumi è stata fissata in caldaia pari a 8%. Si evince una elevata variabilità dei valori di concentrazione, compresi tra 800 e 7500 mg/Nm³ (al 10% O₂).

2.7.2 Prove su filtri FN

Per i filtri FN si presentano i risultati di due prove per ogni miscela ceramica proposta, cioè rispettivamente contenenti il 60% e il 92% di Allumina (Al₂O₃).

2.7.2.1 Filtri FN 60% Al₂O₃

Prova 08/08/2013

T_{fumi} = 126 °C

T_{filtro} = 165 °C

V_{superf} = 0,25 m/s

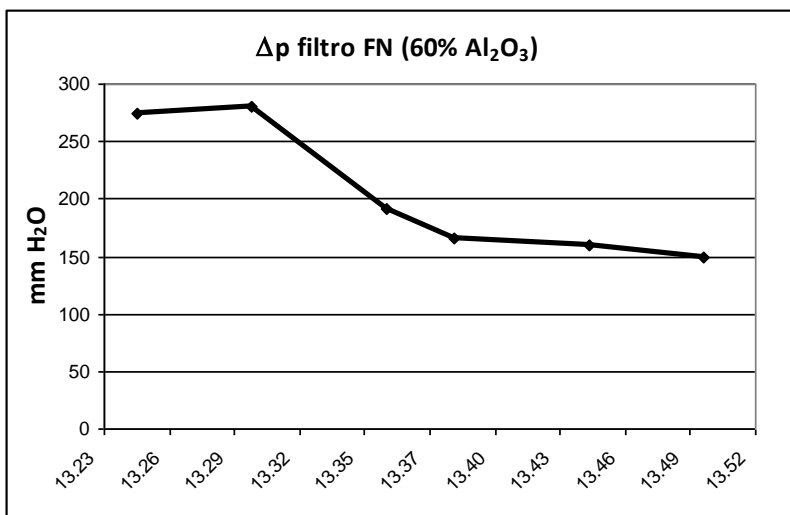


Figura 25. Perdite di carico per filtri FN 60% Al₂O₃

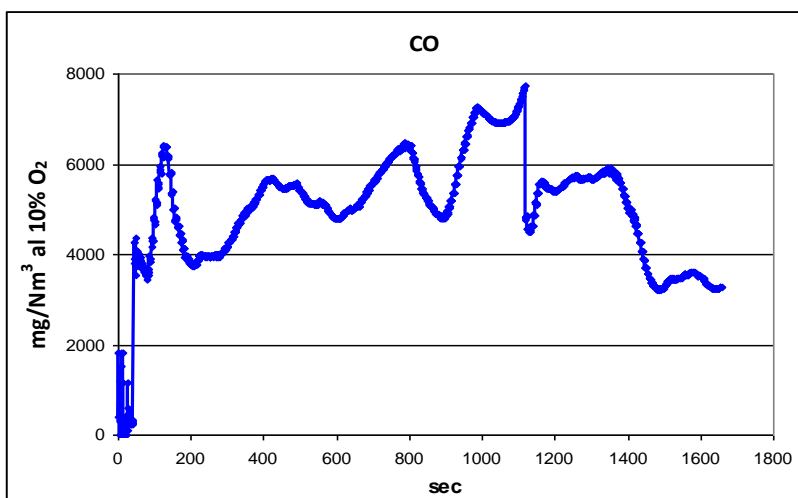


Figura 26. Andamento del CO durante la prova con filtri FN 60% Al₂O₃

Tabella 6. Concentrazioni di particolato solido a valle dei filtri FN 60% Al₂O₃

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	201	2,6	2,9	-

Prova 05/09/2013

T_{fumi} = 126 °C

T_{filtro} = 476 °C

V_{superf} = 0,37 m/s

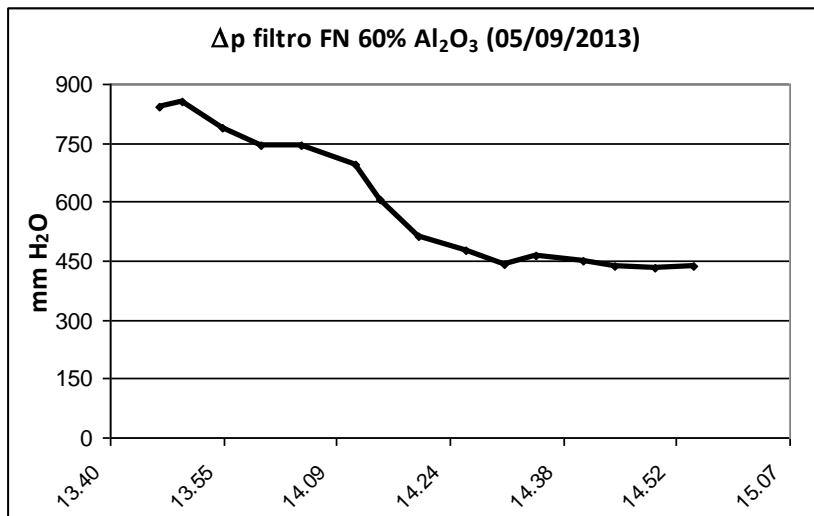


Figura 27. Perdite di carico per filtri FN 60% Al₂O₃

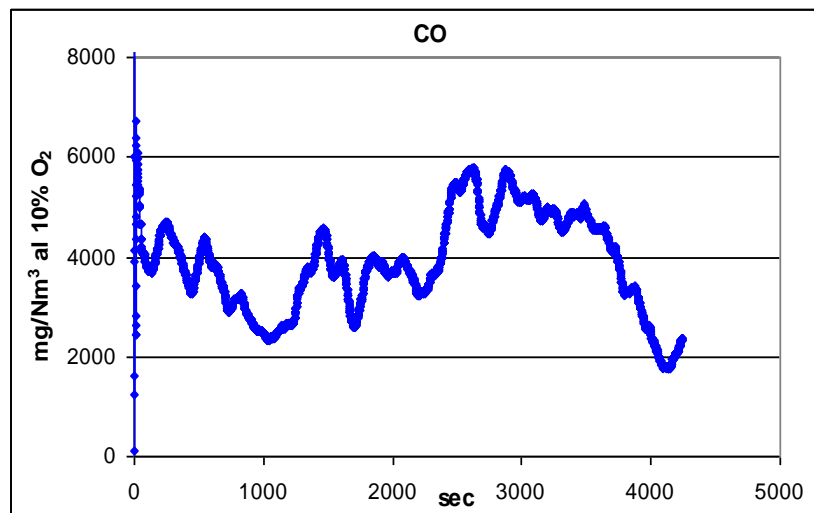


Figura 28. Andamento del CO durante la prova con filtri FN 60% Al₂O₃

Tabella 7. Concentrazioni di particolato solido a valle dei filtri FN 60% Al₂O₃ (05/09/2013)

PM (μm)	< 1	1 - 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	311	3,7	2,3	-

2.7.2.2 Filtri FN 92% Al₂O₃

Prova 02/08/2013

T_{fumi} = 119 °C

T_{filtro} = 170 °C

V_{superf} = 0,30 m/s

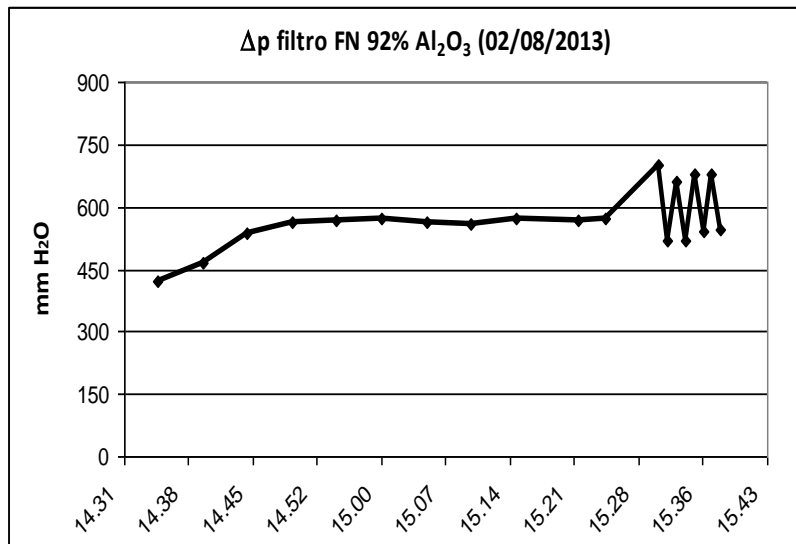


Figura 29. Perdite di carico per filtri FN 92% Al₂O₃

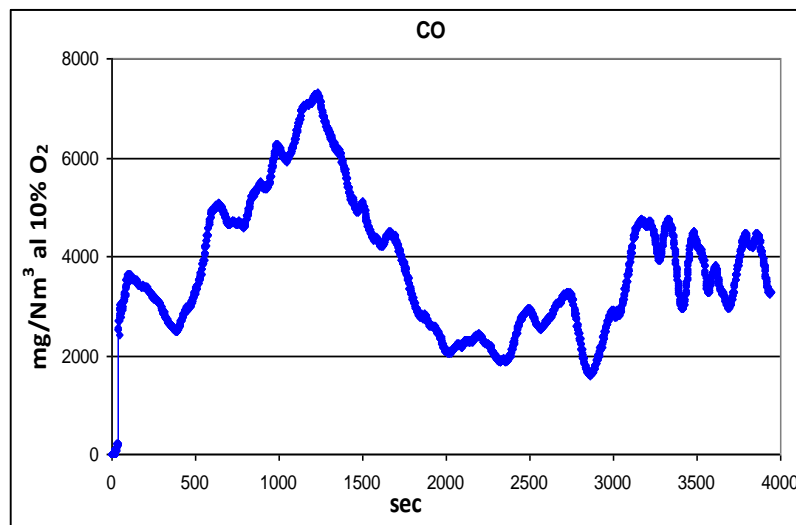


Figura 30. Andamento del CO durante la prova con filtri FN 92% Al₂O₃

Tabella 8. Concentrazioni di particolato solido a valle dei filtri FN 92% Al₂O₃

PM (μm)	< 1	1 - 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	50	0,9	0,7	-

Prova 08/08/2013

T_{fumi} = 132 °C

T_{filtro} = 106 °C

V_{superf} = 0,23 m/s

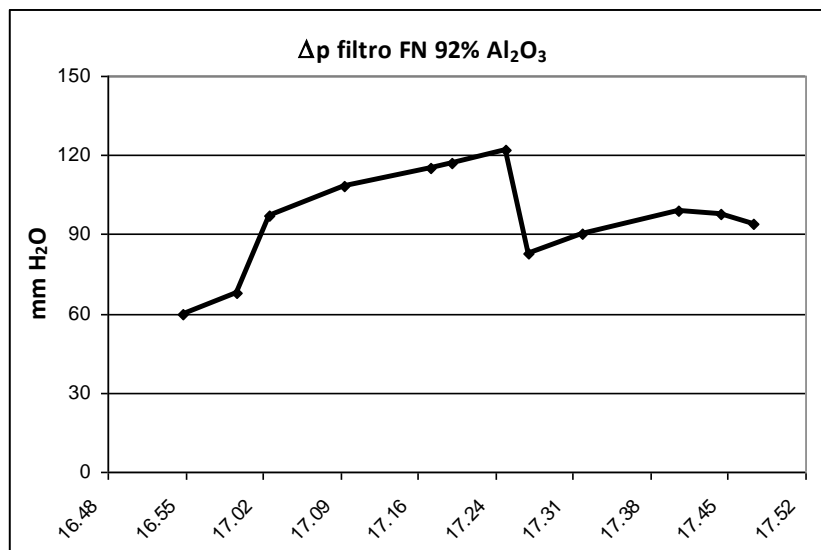


Figura 31. Perdite di carico per filtri FN 92% Al₂O₃

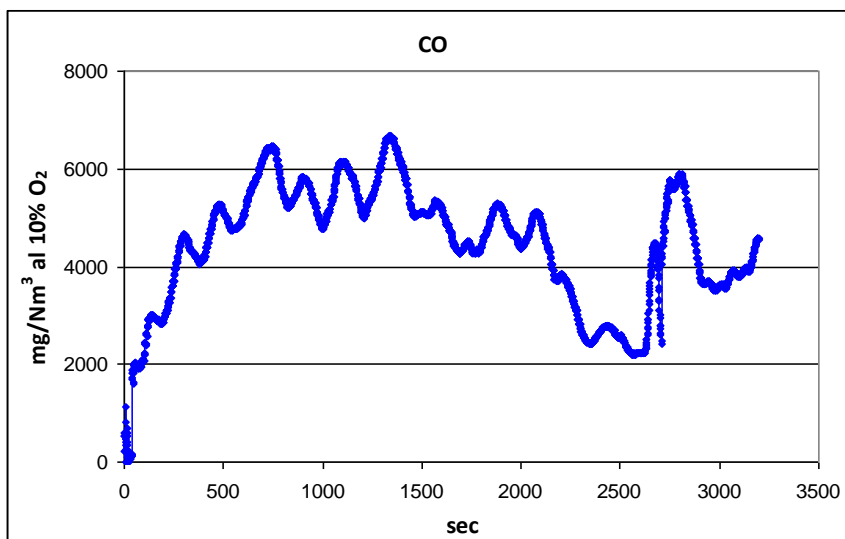


Figura 32. Andamento del CO durante la prova con filtri FN 92% Al₂O₃

Tabella 9. Concentrazioni di particolato solido a valle dei filtri FN 92% Al₂O₃

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	167	1,3	2,6	-

Le prove sui filtri FN sono state caratterizzate da una pressoché assente ripetibilità delle misure nei vari test, con conseguente scarsa attendibilità dei risultati ottenuti.

Si sono tuttavia evidenziate perdite di carico molto elevate (vedi soprattutto figure 27 e 29), casi di apertura dei canali dei filtri (figura 33), infiltrazioni di aria, e in alcune prove una graduale diminuzione della portata di aspirazione dovuta all'ingente carico applicato (in corrispondenza, per esempio, della diminuzione delle perdite di carico mostrate in figura 27).

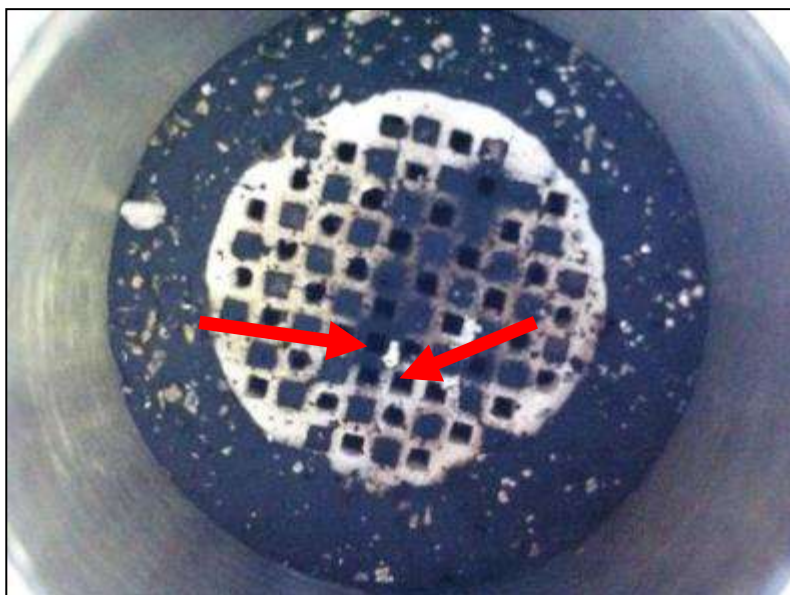


Figura 33. Rottura dei canali dei filtri durante una prova di combustione (08/08/2013)

Anche le differenze di concentrazione riscontrate per il particolato a valle dei filtri nelle varie prove (vedi tabelle 6, 7, 8, 9) è attribuibile principalmente alla incostanza e alla variabilità dei flussi lungo la linea sperimentale.

Le caratteristiche dei filtri FN, individuate soprattutto nella dimensione dei pori eccessivamente piccola per entrambe le mescole esaminate (vedi tabella 4), sembrano quindi non essere adatte alla particolare applicazione per cui essi sono stati testati.

Tuttavia, per poter confermare tale assunzione, sono necessari ulteriori test e soprattutto l'allestimento di un linea sperimentale capace di sopportare maggiormente gli stress dovuti alle perdite di carico molto elevate.

2.7.4 Prove su filtri UNISA

2.7.4.1 Prove a bassa temperatura

Per i filtri UNISA è stata innanzitutto effettuata una verifica del loro comportamento fluidodinamico (perdite di carico e ritenzione fisica del particolato) mettendo a confronto i prototipi additivati con catalizzatore e i filtri “bianchi”, quelli cioè senza aggiunta di catalizzatore sulla loro superficie.

Sono stati quindi testati nelle stesse condizioni di esercizio un filtro bianco e un filtro con percentuale in massa di catalizzatore pari a 15%, mantenendo in entrambi i casi la temperatura in colonna ad un valore relativamente basso (160 °C), per il quale si suppone non si inneschino di conseguenza reazioni catalitiche ad opera della sostanza attiva (CuFe_2O_4). Di seguito si riportano i risultati delle due prove a confronto.

Prova UNISA Bianco (26/08/2013)

$T_{\text{fumi}} = 120 \text{ °C}$

$T_{\text{filtro}} = 160 \text{ °C}$

$V_{\text{superf}} = 0,38 \text{ m/s}$

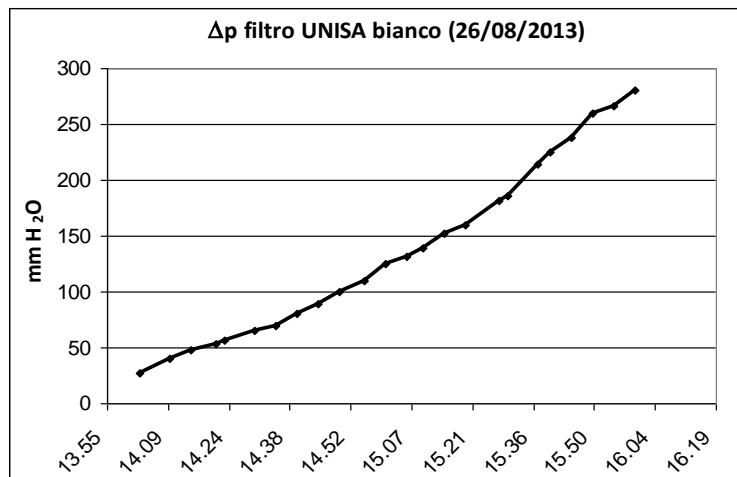


Figura 34. Perdite di carico per filtro UNISA bianco

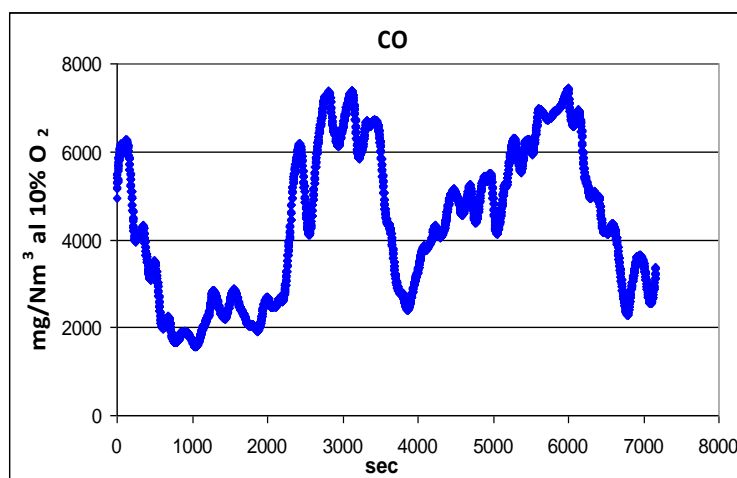


Figura 35. Andamento del CO per filtro UNISA bianco

Tabella 10. Concentrazioni di particolato solido a valle del filtro UNISA bianco

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	-	0,6	0,07	0,4

Prova UNISA cat. 15% (07/08/2013)
 Tfumi = 136 °C
 Tfiltro = 160 °C
 Vsuperf = 0,40 m/s

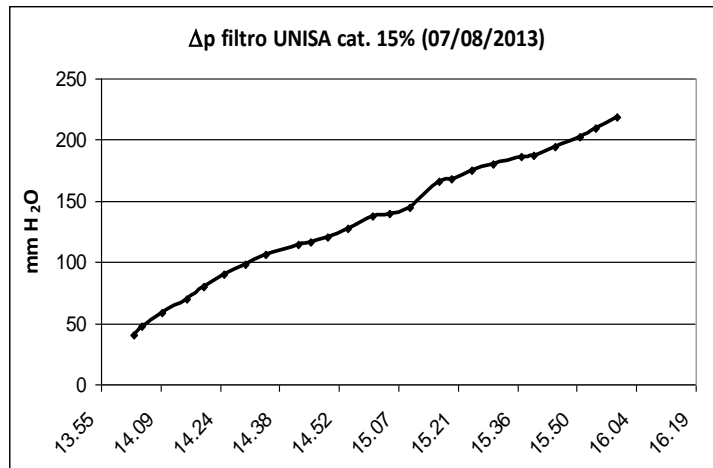


Figura 36. Perdite di carico per filtro UNISA cat. 15%

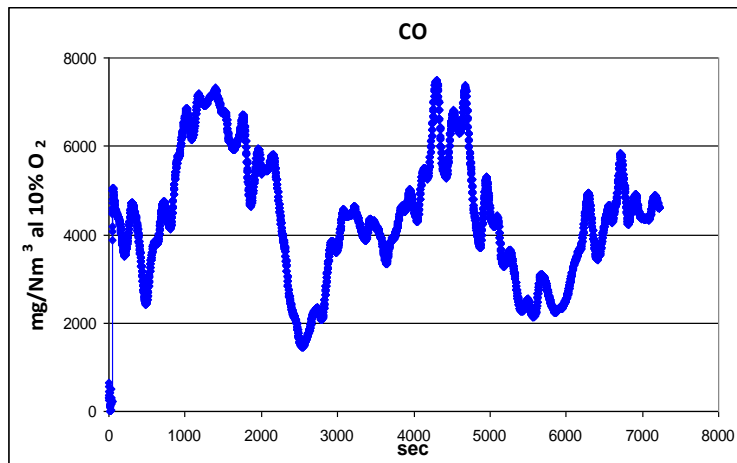


Figura 37. Andamento del CO per filtro UNISA cat. 15%

Tabella 11. Concentrazioni di particolato solido a valle del filtro UNISA cat. 15%

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	6,0	0,09	0,09	-

I risultati su esposti risultano essere molto simili tra loro, facendo quindi supporre una buona attendibilità degli stessi e un comportamento analogo (a $T = 160^{\circ}\text{C}$) tra i filtri non catalizzati e i filtri con invece una certa percentuale di catalizzatore sulla loro superficie.

Soprattutto i grafici relativi alle concentrazioni di CO nei fumi (figure 27a e 27b) mostrano andamenti e picchi del tutto confrontabili tra loro, e in linea con quanto misurato nei test di emissione della caldaia (prove di "zero", figura 20).

Risulta quindi confermato che alla temperatura preimpostata di 160°C (pari al valore indicato tra i dati tecnici della caldaia dal costruttore) il catalizzatore non svolge alcuna azione sull'ossidazione del CO e/o sulla termodistruzione degli inquinanti organici⁴.

Gli stessi andamenti delle perdite di carico (figure 26a e 26b), anch'essi simili per le due prove a confronto, mostrano dei trend costantemente crescenti che sono tipici di un processo di filtrazione di particelle basato su meccanismi di natura prevalentemente fisica.

Relativamente ai tempi di prova sostenuti (circa 2 ore), il contenuto di particolato nei fumi risulta essere notevolmente ridotto rispetto alle condizioni di zero della caldaia, soprattutto nel caso della prova effettuata con filtro bianco (vedi figure 28 e 29)⁵.



Figura 38. Filtri dell'impattore dopo la prova del filtro bianco UNISA a bassa temperatura

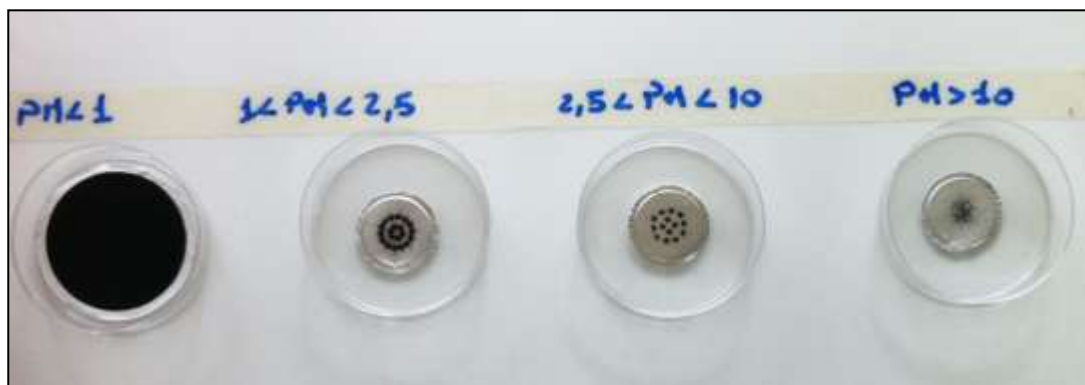


Figura 39. Filtri dell'impattore dopo la prova del filtro UNISA cat. 15% a bassa temperatura

⁴ A meno di risultati contrastanti derivanti dall'analisi in corso sui campioni di IPA

⁵ Date le quantità minime di particolato ritrovate sui filtri dell'impattore, risulta ancora una volta consigliabile tenere anche in considerazione la risoluzione della bilancia, di ordine pari alle stesse quantità misurate.

2.7.4.2 Prove ad alta temperatura

Al fine di verificare l'efficacia del catalizzatore a base di Ferrite di Rame (CuFe_2O_4), sono state condotte ulteriori prove sui filtri UNISA in SiC, utilizzando prototipi additivati con percentuali in massa di catalizzatore rispettivamente pari a 15% e 25%.

Per questi test la temperatura dei filtri in colonna è stata mantenuta superiore a 400 °C, quale valore indicativo fornito da UNISA per l'attivazione del catalizzatore⁶.

Di seguito sono riportati i risultati relativi alla prova effettuata con catalizzatore al 15% in massa.

Prova UNISA cat. 15% (27/08/2013)

$T_{\text{fumi}} = 127 \text{ °C}$

$T_{\text{filtro}} = 424 \text{ °C}$

$V_{\text{superf}} = 0,63 \text{ m/s}$

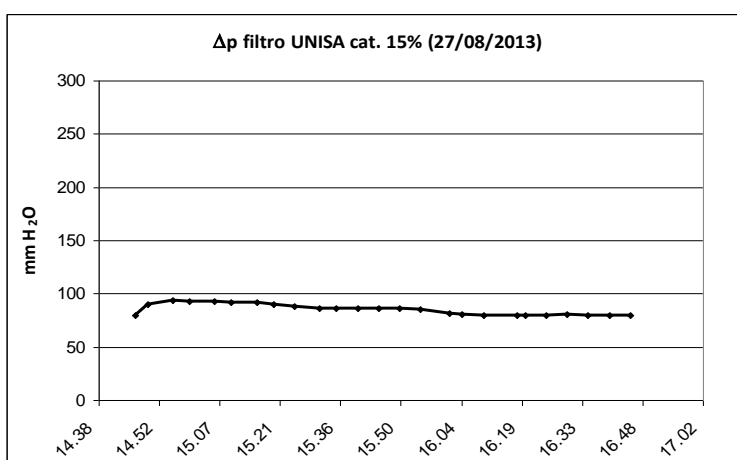


Figura 40. Perdite di carico del filtro UniSA cat. 15% durante una prova ad alta temperatura

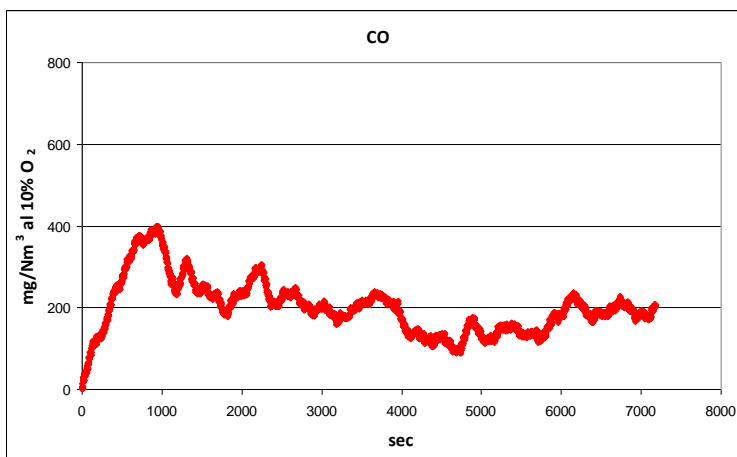


Figura 41. Andamento del CO per filtro UniSA cat. 15% ad alta temperatura

Per un errore strumentale e a causa della risoluzione della bilancia comparabile con i quantitativi pesati sui filtri dell'impattore, non sono purtroppo disponibili per questa prova i valori numerici delle concentrazioni di particolato nei fumi, campionati a valle del filtro catalitico.

⁶ Test finora effettuati da parte del Dipartimento di ingegneria Industriale dell'università di Salerno per l'abbattimento delle emissioni derivanti da motori diesel.

Di conseguenza di seguito è riportata la sola visualizzazione, da cui si evince un quantitativo quasi nullo di particolato sui filtri di alluminio ($PM > 1$), e comunque quantitativi di particolato minori rispetto ai casi di sola misura delle emissioni della caldaia (vedi figure 19a, 19b, 19c).

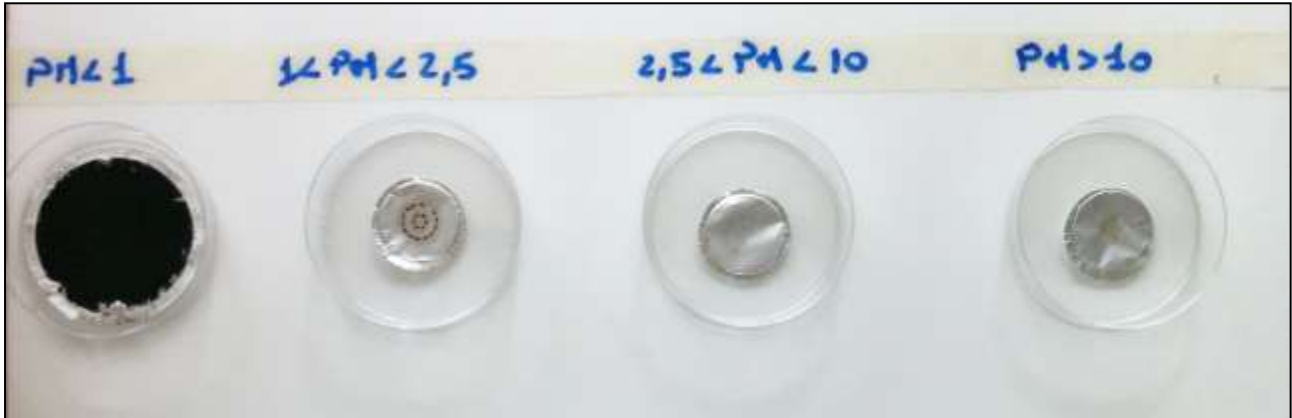


Figura 42. Filtri dell'impattore dopo la prova del filtro UniSA cat. 15% ad alta temperatura

Rispetto ai risultati ottenuti dalle prove a bassa temperatura (vedi paragrafo precedente), i grafici su riportati mostrano un diverso andamento delle perdite di carico, che rimangono in questo caso pressoché costanti nel tempo e/o addirittura decrescenti (Figura 30).

Data l'evidente ritenzione del particolato da parte del filtro catalitico, tale risultato è in parte spiegabile attraverso l'ipotesi per la quale le particelle solide carboniose che si depositano sulla superficie del filtro sono simultaneamente termo distrutte. Da ciò si deduce una prima riprova dell'azione ossidativa del catalizzatore rispetto al particolato solido contenuto nei fumi.

Ancora più evidente risulta invece essere l'azione del catalizzatore rispetto al monossido di carbonio, per il quale si nota una netta riduzione di concentrazione nei fumi durante la prova (Figura 31), sia rispetto ai casi di sola verifica delle emissioni della caldaia (Figura 20) che delle prove effettuate sui filtri a bassa temperatura (Figure 27a e 27b).

Considerando la media di concentrazione di CO (al 10% di O_2 nei fumi) durante le prove, risulta infatti un'efficienza di abbattimento di circa il 95% rispetto alle prove di bianco.

Gli stessi grafici su menzionati denotano inoltre che, per tutto il periodo di prova di circa 2 ore, l'azione e l'efficacia del filtro sono rimaste costanti

Per i filtri con percentuale in massa di catalizzatore pari al 25%, sono state condotte due diverse prove sperimentali, i cui risultati sono di seguito riportati.

Prova UNISA cat. 25% (29/08/2013)

$T_{fumi} = 122 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_{filtro} = 443 \text{ }^\circ\text{C}$

$V_{superf} = 0,63 \text{ m/s}$

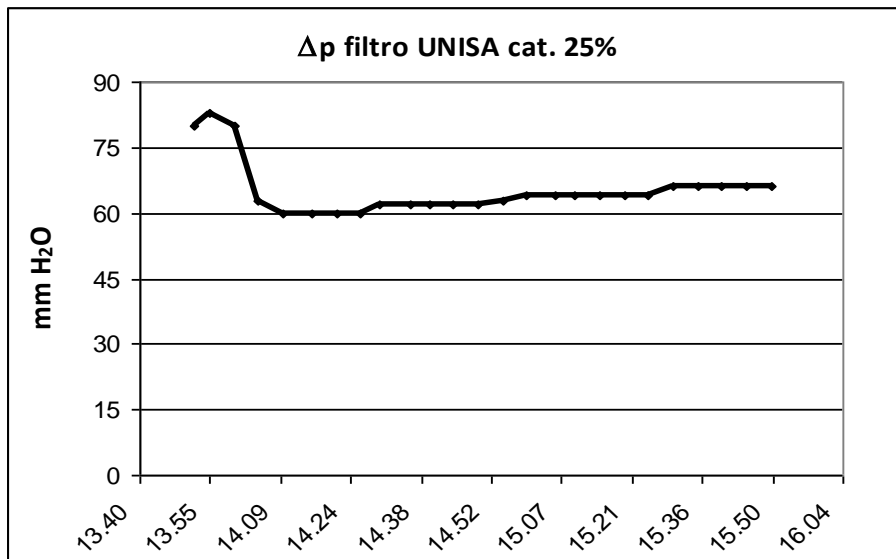


Figura 43. Perdite di carico per filtro UniSA cat. 25%

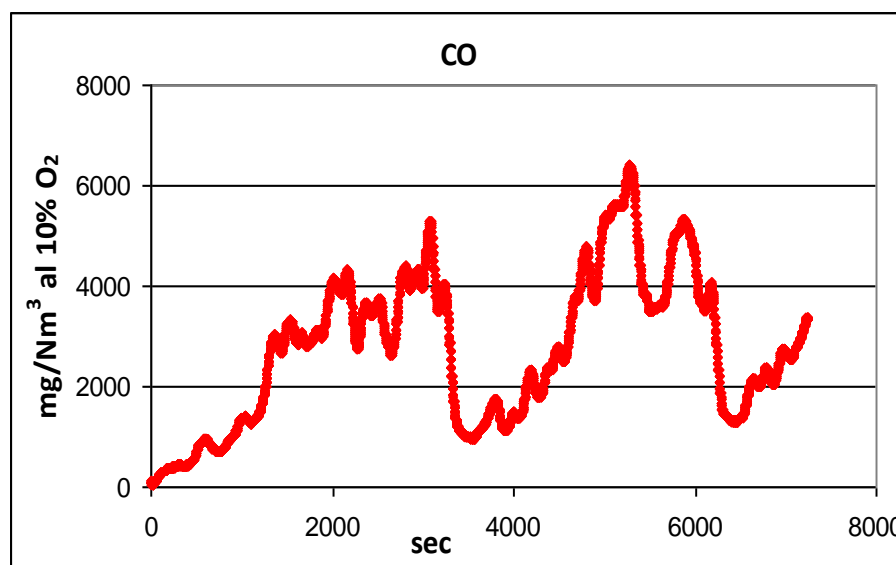


Figura 44. Andamento del CO per filtro UniSA cat. 25%

Tabella 12. Concentrazioni di particolato solido a valle del filtro UniSA cat 25% (29/08/2013)

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	3,3	0,034	0,1	-

Prova UniSA cat. 25% (03/09/2013)

$T_{fumi} = 123 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_{filtro} = \sim 450 \text{ } ^\circ\text{C}$

$V_{superf} = 0,69 \text{ m/s}$

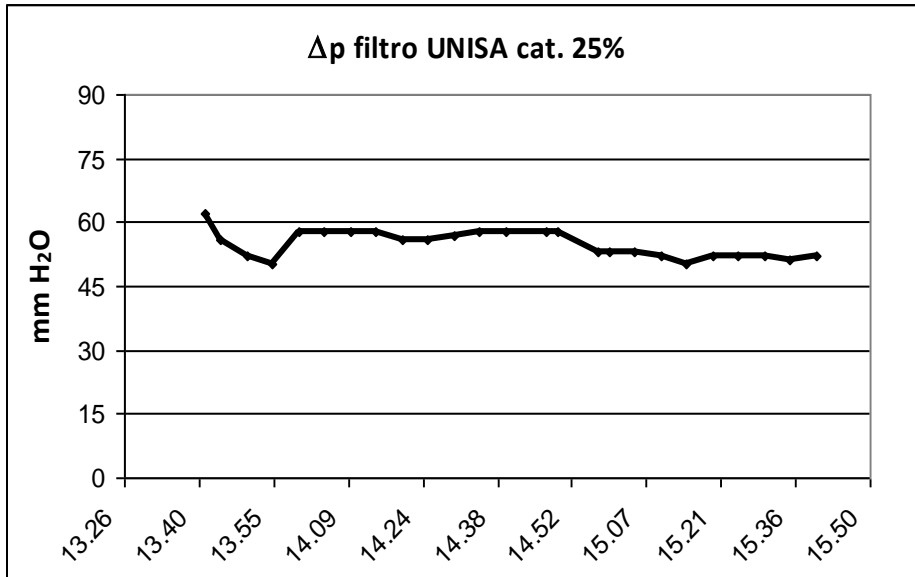


Figura 45. Perdite di carico per filtro UniSA cat. 25%

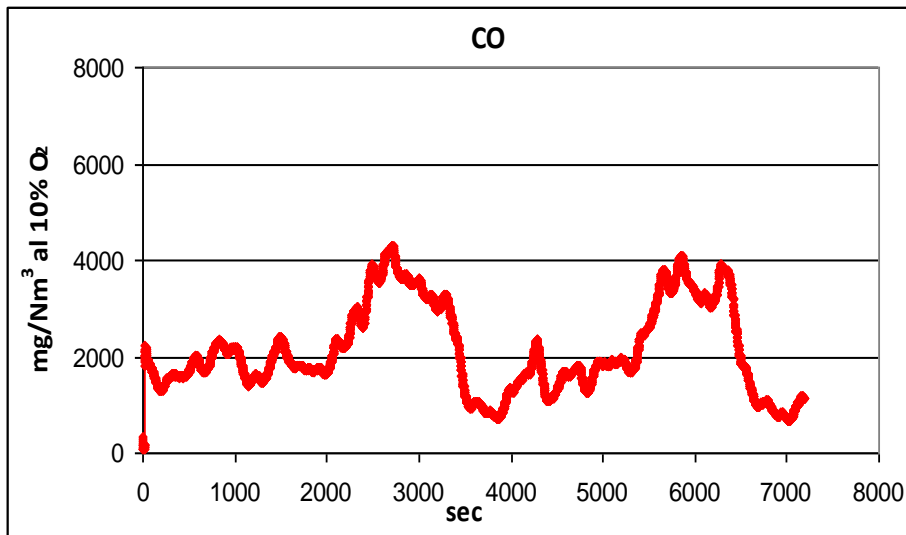


Figura 46. Andamento del CO per filtro UniSA cat. 25%

Tabella 13. Concentrazioni di particolato solido a valle del filtro UniSA cat 25%

PM (μm)	< 1	1 – 2,5	2,5 - 10	> 10
mg/Nm ³ (10% O ₂)	7,0	0,6	-	0,5

Rispetto alle prove condotte sui filtri al 15% di catalizzatore, i risultati su esposti mostrano una minore attività del filtro, soprattutto in relazione all'abbattimento del CO.

In particolar modo per la prova del 29/08/2013, l'andamento della concentrazione di monossido di carbonio (Figura 34a) risulta essere analogo ai trend di concentrazione rilevati durante le prove condotte con i filtri bianchi e/o a bassa temperatura (vedi Figura 27a e 27b).

Il brusco abbassamento delle perdite di carico nelle fasi iniziali della prova (Figura 33a) potrebbe far pensare ad una rottura di qualche canale interno del filtro, che tuttavia non avrebbe inficiato l'efficacia del filtro stesso sulla riduzione del particolato (vedi tabella 9a e Figura 35).

Considerando la sola frazione granulometrica minore di 1 μm , la prova mostra infatti un'efficienza di abbattimento del particolato di circa 96%, rispetto alle condizioni di zero della caldaia.

Gli andamenti delle perdite di carico per entrambe le prove considerate confermerebbero inoltre una certa attività di termodistruzione delle particelle da parte del catalizzatore, dati i profili pressoché costanti del carico.

Per la prova del 03/09/2013, invece, si potrebbe ipotizzare una certa attività del catalizzatore anche sull'ossidazione del CO (Figura 34b), comunque non comparabile con i risultati ottenuti con il filtro al 15%.

In questo caso, inoltre, l'efficienza di abbattimento del particolato (per $\text{PM} < 1 \mu\text{m}$) si ridurrebbe a 92%.

In definitiva, quindi, si ritiene che i risultati ottenuti sui filtri al 25% di catalizzatore, pur evidenziando una certa attività sull'abbattimento degli inquinanti considerati, non sono sufficienti a stimarne l'effettiva efficacia, né a instaurare un effettivo confronto con i filtri al 15%, per il quale si possa contemplare anche l'influenza del processo di deposizione del catalizzatore e dell'occlusione dei pori.



Figura 47. Filtri dell'impatto dopo la prova del filtro UniSA cat. 25% ad alta temperatura



Figura 48. Filtri dell'impatto dopo la prova del filtro UniSA cat. 25% ad alta temperatura

3 Conclusioni

Per l'annualità in corso, l'attività di ricerca è stata principalmente incentrata sulla verifica della possibilità di adottare una tecnologia già in parte consolidata nel settore del contenimento delle emissioni da motori diesel, vale a dire la tecnologia di filtrazione *wall flow*, per l'abbattimento degli inquinanti maggiormente presenti nei fumi di combustione di impianti alimentati a biomassa solida.

A tal scopo, ENEA UTTS, FN S.p.A. e il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno (Di.In.) hanno svolto un lavoro congiunto per definire proprietà e condizioni di esercizio ottimali, affinché sistemi filtranti inizialmente ideati per applicazioni in campo motoristico potessero essere utilizzati efficacemente anche nel settore delle biomasse.

Mediante tali collaborazioni, ed in particolar modo avvalendosi delle competenze di Di.In., già da tempo coinvolto in studi e ricerche sui filtri di tipo *wall flow* per l'abbattimento delle emissioni da motori diesel, è stato possibile mettere a punto e testare dei prototipi in scala di laboratorio di filtri ceramici porosi, eventualmente additivati con catalizzatori, capaci di ridurre le concentrazioni dei maggiori inquinanti presenti nei fumi di combustione della biomassa, vale a dire CO, particolato solido e idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

L'attività di sperimentazione condotta presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia è stata quindi finalizzata alla prova di tali dispositivi, ed ha infine dimostrato che la tecnologia di filtrazione *wall flow* può essere applicata efficacemente anche ai sistemi di pulizia dei fumi provenienti dalla combustione della biomassa solida.

Appurato dalle prove sperimentali che il tipo di particolato emesso da impianti a biomassa è essenzialmente formato da particelle di dimensioni inferiori a 1 micron, la caratteristica essenziale che si suppone debbano avere i filtri tipo *wall flow* per poter essere applicati ai sistemi di combustione della biomassa è appunto quella di essere costituiti da materiali porosi con dimensione dei pori superiore a 1 micron.

Tale assunzione è stata in parte verificata dalla campagna di prove sperimentali effettuate, le quali hanno prodotto risultati soddisfacenti per i filtri ceramici in SiC (forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'università di Salerno) con diametro medio dei pori superiore a 20 μm , mentre hanno evidenziato il verificarsi di condizioni di esercizio non compatibili con l'applicazione presa in esame (instabilità e aumento eccessivo delle perdite di carico) per i filtri in Alumina (forniti da FN S.p.A.), le cui dimensioni dei pori sono inferiori a 1 μm .

Dal punto di vista teorico, la conclusione su esposta può essere in qualche modo avvalorata dalla tesi per cui pori di dimensioni maggiori delle particelle permettono l'instaurarsi di un processo di filtrazione di massa ("depth filtration") invece che di sola superficie ("cake filtration"). Ciò significa che le particelle solide carboniose contenute nella corrente da trattare (fumi) non si depositano solamente sulla superficie esterna dei filtri (formando uno strato man mano più impenetrabile) ma riescono più facilmente a penetrare anche attraverso le pareti, depositandosi di conseguenza anche al loro interno, senza tuttavia occludere completamente il passaggio del gas.

Qualora poi la matrice porosa del filtro sia anche additivata con catalizzatori, i siti attivi che ne derivano su tutta la superficie hanno di gran lunga maggiore possibilità di contatto con le particelle carboniose e con le molecole di gas, rispetto a quanto possa accadere nel caso di sola filtrazione a superficie. L'azione dei catalizzatori sulle reazioni di ossidazione e/o termodistruzione degli inquinanti ne risulta quindi notevolmente aumentata.

I test sperimentali sui filtri ceramici in SiC (denominati nel testo filtri UNISA) sono stati quindi di seguito finalizzati alla verifica dell'efficacia del catalizzatore a base di ferrite di rame (CuFe_2O_4 , lo stesso utilizzato in precedenza per il trattamento degli scarichi dei motori diesel), riguardo all'abbattimento delle emissioni di CO, particolato solido e IPA presenti nei fumi di combustione della biomassa.

A tal scopo sono state inizialmente condotte prove a "bassa" temperatura, cioè a temperatura simile a quella di uscita dei fumi dallo scarico della caldaia (160 °C), che tuttavia non hanno evidenziato alcuna attività da parte del catalizzatore. Si sono infatti registrate perdite di carico dei filtri crescenti nel tempo e

concentrazioni di CO nei fumi pari a quelle riscontrate per le prove di sole emissioni della caldaia (prove di “zero”) e per i filtri senza catalizzatore.

Prove ad “alta” temperatura, cioè per valori di temperatura dei filtri superiori a 400 °C, hanno invece evidenziato una risposta più che soddisfacente del catalizzatore:

Utilizzando un filtro con percentuale in massa del catalizzatore pari al 15%, si è riscontrato un netto calo della concentrazione di CO nei fumi durante le prove, corrispondente ad un’efficienza di abbattimento di circa il 95% (considerando le medie di concentrazione durante le prove).

Per tutte le prove condotte ad alta temperatura si evincono andamenti delle perdite di carico dei filtri pressoché costanti, le quali fanno supporre il verificarsi di processi di termodistruzione delle particelle carboniose simultanei alla loro deposizione sui filtri.

Prove eseguite sui filtri con 25% in massa di catalizzatore mostrano un’efficienza di abbattimento del particolato (PM < 1) superiore a 90% (rispettivamente 92% e 96% per le due prove effettuate), con tempi di campionamento di circa 2 ore. Le stesse prove, tuttavia, denotano un’azione minore del catalizzatore rispetto alla riduzione del CO.

In base a tali promettenti risultati si ritiene opportuno proseguire l’attività di ricerca sperimentale sui prototipi da laboratorio, considerando soprattutto i seguenti ulteriori aspetti:

- Verifica della temperatura minima di attivazione del catalizzatore finora utilizzato.
- Individuazione della percentuale ottimale di catalizzatore da deporre sui filtri, anche in base a considerazioni sui processi di deposizione e di occlusione dei pori.
- Analisi di nuovi materiali ad azione catalitica che presentino una temperatura di attivazione maggiormente compatibile con le condizioni di uscita dalla caldaia dei fumi di combustione.
- Studio del comportamento dei filtri catalitici tipo wall flow in relazione alle fasi transitorie della caldaia (accensione, pulizia e spegnimento).
- Verifica degli eventuali fenomeni di invecchiamento dei filtri e prove di rigenerazione

Per quanto riguarda, invece, lo sviluppo ingegneristico di veri e propri sistemi filtranti, da integrare eventualmente negli impianti di combustione della biomassa solida, gli aspetti da prendere maggiormente in considerazione sono:

- Individuazione della posizione ottimale per l’alloggiamento dei filtri, all’interno del corpo caldaia o lungo la linea di pulizia dei fumi, in dipendenza soprattutto della temperatura di attivazione dei catalizzatori.
- Definizione delle dimensioni e della configurazione geometrica dei filtri, in relazione alla loro posizione, alla velocità superficiale dei fumi e agli effetti che le loro dimensioni producono sull’efficienza di abbattimento degli inquinanti.
- Sviluppo di sistemi di pulizia e/o rigenerazione dei filtri, poco dispendiosi dal punto di vista energetico e tecnicamente compatibili con gli usuali assetti impiantistici dei sistemi di combustione a biomassa.

4 Riferimenti bibliografici

- AA.VV., "Caldaie per combustibili solidi, con alimentazione manuale e automatica, con una potenza termica nominale fino a 300 kW", UNI EN 303-5, 2004.
- AA.VV., "Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air. Compendium Method TO-13A Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)EPA/625/R-96/010b" U.S. Environmental Protection Agency, pp 1- 84, 1999.
- Lee K.W., Mukund R., "Filter Collection, Aerosol Measurement Principles, Techniques and Applications", 2nd ed., Wiley Interscience inc., 2001.
- Seville J.P.K., "Gas cleaning in demanding applications", Blackje Academic & Professional (in print of Chapman and Hall), 1997.