



Ricerca di Sistema elettrico

Filtri catalitici di tipo *wall flow* per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida

Giovanni Stoppiello

con il contributo di:

M. Caldera, M. Gualtieri, F. Hugony, R. Roberto

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

G. Stoppiello (ENEA)

con il contributo di: M. Caldera, M. Gualtieri, F. Hugony, R. Roberto (paragrafo 2.4) (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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 C: Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e la riduzione dell'impatto ambientale

Responsabile del Progetto: Vito Pignatelli, ENEA

Si ringraziano l'ing. Giordano Villa per l'esecuzione delle analisi termogravimetriche sul combustibile di prova ed i tecnici Antonio De Sio e Francesco Viale per la preziosa collaborazione nell'esecuzione delle prove sperimentali.

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 VERIFICA SPERIMENTALE DEI FILTRI CATALITICI TIPO WALL FLOW IN SCALA DI LABORATORIO	7
2.1.1 <i>Apparato sperimentale</i>	7
2.1.1.1 Combustibile di prova.....	7
2.1.1.2 Generatore di calore.....	8
2.1.1.3 Linea sperimentale	8
2.1.2 <i>Dispositivi testati</i>	11
2.1.3 <i>Modalità di esecuzione delle prove</i>	13
2.1.3.1 Condizioni di esercizio ed emissioni della caldaia	13
2.1.3.2 Numero, tipologia e obiettivi delle prove sperimentali	14
2.1.3.3 Procedura di prova	15
2.2 RISULTATI SPERIMENTALI	15
2.2.1 <i>Perdite di carico ed efficienze di abbattimento in funzione della percentuale in massa di catalizzatore</i>	15
2.2.2 <i>Perdite di carico ed efficienze di abbattimento in funzione della porosità di base</i>	18
2.2.3 <i>Influenza del carico di inquinanti, della velocità superficiale e della velocità spaziale (ad alta T) sul funzionamento dei filtri</i>	21
2.2.4 <i>Comportamento dei filtri ad alta temperatura: filtri nuovi e usati</i>	22
2.3 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DEI SISTEMI DI FILTRAZIONE TIPO WALL FLOW	26
2.3.1 <i>Procedura analitica</i>	26
2.4 PROGETTAZIONE DELLA LINEA SPERIMENTALE PER TEST DI RIGENERAZIONE DEI FILTRI CATALITICI WALL FLOW	30
3 CONCLUSIONI.....	36
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	40
ALLEGATO A: PROCEDURA DI PROVA SPERIMENTALE PER PROTOTIPI DA LABORATORIO DI FILTRI TIPO WALL FLOW ..	41
ALLEGATO B: DIMENSIONAMENTO FILTRI TIPO WALL FLOW IN MATLAB R7.0	48
ALLEGATO C: NOMENCLATURA	53

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma per la Ricerca sul Sistema Elettrico Nazionale, stipulato tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, il progetto "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili" prevede, per quanto riguarda l'obiettivo "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e la riduzione dell'impatto ambientale", una linea di ricerca incentrata sullo sviluppo, la caratterizzazione e la verifica sperimentale di filtri ceramici porosi per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dalla combustione di biomassa solida, con particolare riferimento al particolato e ad inquinanti gassosi quali CO e Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

Riprendendo gli studi e le analisi condotte durante la prima annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2012–2014, ENEA ha effettuato ulteriori prove sperimentali su prototipi in scala di laboratorio di filtri catalitici tipo *wall flow*, esaminando il loro comportamento a contatto diretto con i fumi di combustione di una caldaia alimentata a pellet di legno.

Appurata l'efficacia di tali dispositivi nel ridurre notevolmente le emissioni di particolato e verificata la possibilità di rigenerazione dei filtri mediante azione catalitica (durante la quale si registra anche una elevata riduzione del monossido di carbonio), l'attività sperimentale è proseguita nella ricerca della migliore configurazione e nello studio delle condizioni di esercizio ottimali per una loro applicazione concreta sugli impianti di combustione a biomassa.

A tal scopo, sono state indagate le caratteristiche principali dei materiali filtranti (porosità, percentuale di catalizzatore, temperatura di attivazione) e le conseguenti modalità di funzionamento dei filtri (perdite di carico, velocità superficiale dei fumi, velocità spaziale, temperature di esercizio) nell'ottica di minimizzare le perdite di carico, ottimizzare la frequenza dei cicli di esercizio/rigenerazione, e verificare le prestazioni dei prototipi anche in seguito ad un loro primo utilizzo.

Per tali attività, ENEA si è avvalsa della collaborazione di FN S.p.A. per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali e le analisi sui campioni di IPA, e del Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.I.In.) dell'Università di Salerno per la realizzazione e la fornitura di dispositivi ceramici testati, per ulteriori analisi sui materiali utilizzati, e per lo studio di nuove sostanze ad azione catalitica atte all'abbattimento di CO e idrocarburi gassosi a temperature prossime a quelle di scarico dei fumi di combustione.

Inoltre, attraverso la collaborazione tra ENEA e Di.I.In., e a partire dai risultati sperimentali ottenuti, sono stati condotti studi preliminari per il dimensionamento e lo scale up dei sistemi filtranti testati, in vista della realizzazione di un dispositivo pilota da inserire direttamente allo scarico della caldaia.

I risultati delle prove sperimentali hanno permesso l'analisi delle perdite di carico in funzione della porosità dei materiali filtranti, della percentuale in massa di catalizzatore, della temperatura di esercizio dei filtri, del carico di particolato e della velocità superficiale dei fumi, dimostrando che quest'ultima risulta il parametro più significativo nel caso di fumi "puliti", ossia caratterizzati da basse concentrazioni di particolato.

Per quanto riguarda l'attività catalitica dei filtri, intesa come fase di rigenerazione degli stessi, i dati sperimentali sembrano evidenziare che la stessa velocità superficiale dei fumi (intesa in questo caso come tempo di residenza dei fumi a contatto col catalizzatore) riveste un ruolo maggiore della velocità spaziale per quanto riguarda l'abbattimento del CO. Infatti, pur in condizioni più svantaggiose, cioè con velocità spaziale (rapporto tra la portata in massa dell'inquinante da trattare e la quantità in massa del catalizzatore deputato a trattarlo, $\text{mg h}^{-1} / \text{mg}$) più alta (93 h^{-1} contro 42 h^{-1}) e temperatura di esercizio più bassa (430 °C contro 535 °C), i test condotti con minore velocità superficiale dei fumi (circa $0,50 \text{ m/s}$, corrispondente ad un tempo di residenza del gas pari a $0,25 \text{ sec}$) hanno mostrato efficienze di riduzione del CO notevolmente più alte.

Si conferma, invece, in tutti i casi esaminati, un'alta efficienza di ritenzione del particolato fine ($< 1 \mu\text{m}$), sempre superiore almeno al 93,5% per filtri nuovi; al contrario del CO, per cui sembra appurata la relazione diretta tra temperatura di attivazione del catalizzatore e velocità spaziale, avendo anche osservato una iniziale fase di termodistruzione della polveri organiche da parte del catalizzatore già a temperature di 335 °C , per velocità spaziali di circa $3,1 \text{ h}^{-1}$.

In base ai risultati ottenuti, ma anche in relazione a considerazioni di tipo operativo, si è individuata la percentuale ottimale del catalizzatore sul filtro pari a 20% in massa.

Per quanto concerne la variazione della dimensione dei pori del materiale ceramico, i risultati sperimentali sembrano non confermare l'ipotesi che l'aumento di tale grandezza comporti notevoli benefici in termini di

perdite di carico, né sembra influenzare positivamente l'efficienza di ritenzione del particolato o l'azione del catalizzatore.

Una prova di durata, condotta ad una temperatura simile ai valori registrati in canna fumaria ($T = 170\text{ °C}$), con filtro a porosità originaria, in condizioni di funzionamento normali della caldaia (basso carico di inquinanti), e a velocità superficiale pari a circa $0,5\text{ m/s}$, ha evidenziato delle perdite di carico crescenti mediamente lineari (pendenza costante) per tutto il periodo di campionamento, pari cioè a 180 minuti.

Si presume, quindi, che, nelle stesse condizioni operative, la frequenza di rigenerazione dei filtri, adeguatamente dimensionati per l'integrazione con i sistemi di generazione di calore, possa risultare per lo meno dello stesso ordine di grandezza.

Al fine proprio di stimare con maggior dettaglio la durata massima dei filtri (intesa come periodo di esercizio durante il quale le perdite di carico mantengono un andamento mediamente crescente e lineare) è stato sviluppato in MatLab R7.0 un modello analitico che restituisce gli andamenti delle perdite di carico e dell'efficienza di ritenzione del particolato nel tempo, in funzione delle dimensioni dei filtri e delle caratteristiche della corrente gassosa da trattare (portata, carico di particolato, dimensioni delle polveri, etc.). In base alla collaborazione tra ENEA e Di.I.In., tale modello è stato ulteriormente implementato e migliorato da parte dell'Università di Salerno, ai cui testi si rimanda quindi per le verifiche e la rappresentazione dei risultati.

Per quanto riguarda il prosieguo della presente attività di ricerca, i progressi maggiori andranno sicuramente fatti nello studio della fase di rigenerazione dei filtri: ottenute infatti le prime indicazioni su temperature, velocità spaziali e tempo di residenza del gas, risultano ancora da indagare vari aspetti, quali le modalità (basate su un sistema di generazione di micro-onde) e la velocità di riscaldamento dei filtri, la durata della fase di rigenerazione, ed eventuali effetti secondari sulla composizione dei fumi dovuti alla stessa attività catalitica.

Le prove preliminari condotte sia su filtri nuovi che usati (provati, cioè, a seguito di un loro primo utilizzo a temperatura relativamente bassa, $T = 170\text{ °C}$), hanno infatti sempre dimostrato un'efficace azione di termodistruzione delle particelle organiche (verificata mediante l'osservazione delle perdite di carico costanti durante la fase di rigenerazione), ma anche andamenti delle concentrazioni di CO (a volte anche mediamente superiori rispetto al caso di assenza totale dei filtri), che non sempre possono ricondursi alla fase di ossidazione delle particelle precedentemente adese alla superficie dei filtri.

La nuova linea sperimentale, già in fase di progettazione da parte di ENEA UTTS ENE, sarà allestita proprio in previsione dell'analisi di questi ulteriori aspetti, oltre ovviamente a prevedere il corretto inserimento del sistema di generazione di micro onde per il surriscaldamento dei filtri.

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 sulla 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 2013, 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 da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili", in relazione all'obiettivo "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica e la riduzione dell'impatto ambientale".

In base a tale obiettivo, ENEA ha stipulato accordi di collaborazione con FN S.p.A. e con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.I.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 al particolato, e con l'intento di abbattere simultaneamente, mediante sistemi combinati, anche inquinanti gassosi quali CO e Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

Tale lavoro congiunto prevede sostanzialmente lo sviluppo, 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 monoliti ceramici sulla cui superficie e all'interno dei quali rimangono adese le polveri eventualmente presenti nella corrente gassosa. In fase di rigenerazione, tali sistemi vengono riscaldati a temperature relativamente alte (450 – 550 °C) e, grazie all'azione di sostanze ad azione catalitica, le polveri di natura organica subiscono un processo di ossidazione e termodistruzione, durante il quale si nota anche un notevole effetto di ossidazione degli inquinanti gassosi, quali soprattutto il monossido di carbonio.

La tecnologia di filtrazione catalitica di tipo *wall flow* deriva dagli sviluppi condotti nel settore motoristico ed è stata già notevolmente testata in applicazioni finalizzate all'abbattimento del particolato prodotto dai motori diesel (soot), di cui lo stesso Di.I.In. vanta un'esperienza pluriennale.

Il presente lavoro ha quindi come obiettivo primario la verifica della possibilità di esportare la suddetta tecnologia anche nel campo della riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dagli impianti di combustione di biomassa solida.

Nel corso della prima annualità è stata quindi installata presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia un'apposita linea sperimentale per l'analisi diretta dei filtri a contatto con i fumi di combustione di una caldaia a pellet, e sono stati ricavati primi risultati incoraggianti sull'efficacia di tali sistemi nella riduzione delle emissioni.

Durante la seconda annualità, l'attività sperimentale è proseguita nella ricerca delle migliori caratteristiche e delle condizioni ottimali di esercizio dei filtri per un loro futuro utilizzo su larga scala in sistemi di combustione a biomassa. Oltre alla verifica dell'efficienza di abbattimento delle emissioni, sono stati quindi presi in considerazione anche aspetti più applicativi, quali soprattutto le perdite di carico.

Inoltre, dai risultati sperimentali ottenuti e mediante lo studio dei principi di funzionamento dei sistemi filtranti di tipo *wall flow*, si è proceduto a considerazioni preliminari sul dimensionamento e lo scale up dei dispositivi testati.

Il presente documento descrive quindi le attività condotte durante la seconda annualità del Piano di Realizzazione Triennale, presentandone i risultati e sintetizzando le maggiori conclusioni e considerazioni ad essi correlate.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Verifica sperimentale dei filtri catalitici tipo wall flow in scala di laboratorio

2.1.1 Apparato sperimentale

2.1.1.1 Combustibile di prova

Per le prove sperimentali sui prototipi dei filtri *wall flow* è stata utilizzata una caldaia alimentata con pellet di legno, certificato di categoria A1 in base alla normativa EN 14961-2, le cui caratteristiche fornite dal produttore sono:

- diametro: 6 mm
- lunghezza: 3,15 - 40 mm
- potere calorifico: ~ 17,7 MJ/kg
- umidità: ~ 8% in peso sul tal quale

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

Tabella 1. Proprietà del combustibile utilizzato

tenore idrico (%)	6,85
umidità (%)	7,35
contenuto di ceneri (% tq)	0,37
contenuto di ceneri (% secco)	0,40
densità apparente (g/cm ³)	0,71
potere calorifico superiore (kJ/kg tq)	18432
potere calorifico superiore (kJ/kg secco)	19787
potere calorifico inferiore (kJ/kg tq)	16915
potere calorifico inferiore (kJ/kg secco)	18159
potere calorifico inferiore netto (kJ/kg)	18232
contenuto di idrogeno (wt % secco)	6,48
contenuto di carbonio (wt % secco)	48,86
formula molecolare fittizia (secco)	CH _{1,6} O _{0,7}

2.1.1.2 Generatore di calore

Il generatore di calore utilizzato per le prove di filtrazione dei fumi è una caldaia a biomassa di potenza nominale pari a 30 kW, alimentabile a cippato e/o pellet, modello *KWB Multifire USV V 30*, collegata al circuito idraulico di dissipazione del calore presente all'interno della Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia.

Per ulteriori dettagli e per le caratteristiche tecniche dell'apparecchio si rimanda al Report RdS/2013/184, relativo alla descrizione delle attività sperimentali condotte durante la prima annualità del Piano Triennale.



Figura 1. Caldaia a biomassa *KWB Multifire USV V 30*

2.1.1.3 Linea sperimentale

I test sui prototipi in scala di laboratorio dei filtri *wall flow* sono stati condotti utilizzando l'apposita linea sperimentale già allestita durante la precedente annualità presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia (vedi Report RdS/2013/184), adottando solo qualche lieve modifica.

Tale linea è composta, oltre che dal generatore di calore, da un sistema di riscaldamento esterno dei filtri e da diverse linee di campionamento con le quali si misurano tutte le grandezze necessarie alla verifica del loro funzionamento.

La canna fumaria della caldaia è costituita da un tratto orizzontale di tubazioni in acciaio, di lunghezza pari a circa 3 metri, con diametro interno $D_i = 150$ mm, e con uno spessore coibente in lana di vetro di circa 25 mm ($D_e = 200$ mm). A circa 2,5 metri dallo scarico della caldaia una portata campionaria dei fumi è prelevata dalla canna fumaria mediante una sonda ad ugello di diametro pari a 12 mm, e inserita all'interno del condotto per una lunghezza di 55 mm.

La portata campionaria dei fumi è quindi convogliata attraverso una linea riscaldata verso l'alloggiamento dei filtri *wall flow*, i quali si trovano inseriti in una colonna d'acciaio, a sua volta circondata dalle pareti interne di una fornace tubolare ad alimentazione elettrica.

Mediante l'utilizzo di tale dispositivo è possibile variare la temperatura di esercizio dei filtri senza modificare le condizioni operative della caldaia, assicurando cioè lo stesso carico di inquinanti da trattare.

Questi ultimi sono misurati a valle dell'alloggiamento dei filtri attraverso differenti linee di campionamento: una prima portata di fumi (circa 2 NL/min) è convogliata dalla colonna d'acciaio al sistema di analisi del gas, dove si misurano le concentrazioni volumetriche sul gas secco di O_2 , CO_2 e CO . Tale linea è composta da un filtro di guardia per il trattenimento del particolato, un condensatore a bagno di ghiaccio per la ritenuta dei condensabili, e dal sistema interno di protezione degli analizzatori, anch'esso composto da filtri di guardia e condensatore.

Similmente all'analisi del gas, anche per il campionamento degli IPA una portata campionaria dei fumi della stessa entità (2 NL/min) è prelevata attraverso un secondo punto di campionamento sulla colonna, ed è indirizzata ai sistemi di ritenuta degli idrocarburi. Questi sono composti da un filtro in fibra di vetro, una fiala di materiale adsorbente X-AD₂ e da un condensatore a bagno di ghiaccio per la raccolta del condensato.

Infine, a valle della colonna, la restante parte della portata campionaria è aspirata attraverso un sistema di campionamento a caldo (T = 200°C) del particolato, costituito da un impattore multistadio con il quale si ottengono misure gravimetriche di concentrazione negli intervalli granulometrici: PM < 1 µm; PM = 1 – 2,5 µm; PM = 2,5 – 10 µm; PM > 10 µm.

Lungo la linea sperimentale sono inoltre montate diverse termocoppie di tipo K, con le quali si misurano la temperatura dei fumi in canna fumaria, la temperatura di esercizio dei filtri all'interno della colonna d'acciaio, la temperatura di campionamento dei gas in corrispondenza dei contatori volumetrici, le temperature dell'acqua del circuito idraulico, le temperature esterne della caldaia e la temperatura ambiente.

Le perdite di carico dei filtri sono misurate attraverso un manometro a colonna d'acqua ad U, i cui punti di misura sono posti all'esterno della fornace tubolare, nel tratto superiore ed inferiore della colonna d'acciaio.

Ad eccezione delle perdite di carico (registrate manualmente), tutte le altre misure sono ricavate in tempo reale e sono acquisite e registrate mediante un sistema informatico di acquisizione ed elaborazione dati, attraverso il quale è possibile altresì determinare i maggiori parametri di esercizio dell'impianto (potenza, rendimenti, portata e velocità dei fumi, velocità superficiale dei filtri, velocità di campionamento dei gas, etc.).

In Figura 2 si riporta uno schema generale della linea sperimentale su descritta.

Per ulteriori dettagli sulle caratteristiche tecniche del forno tubolare e dei sistemi di campionamento e analisi dei gas, si rimanda al Report RdS/2013/184.

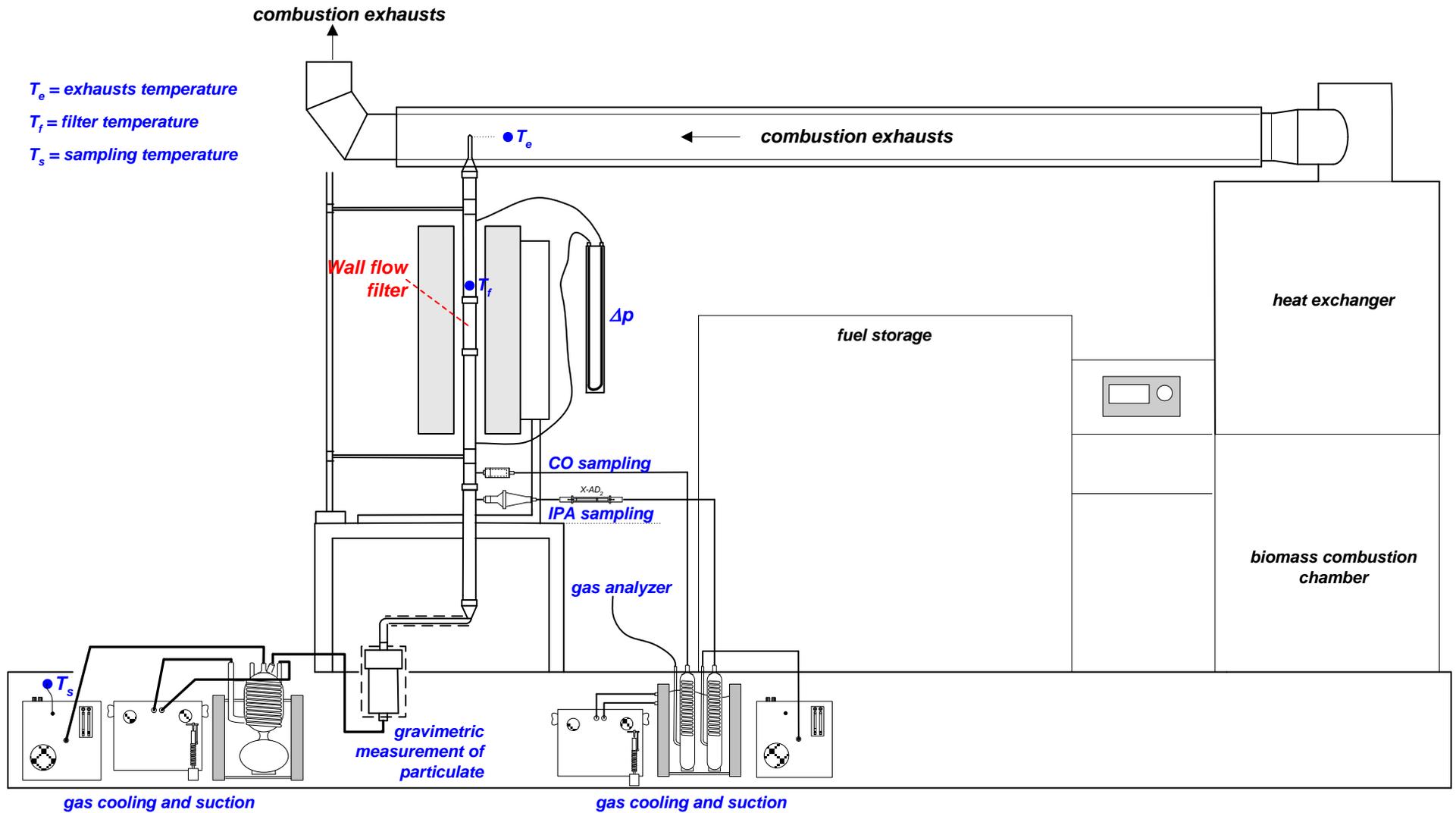


Figura 2. Linea sperimentale

2.1.2 Dispositivi testati

I sistemi filtranti testati durante le prove sperimentali rappresentano dei prototipi della tecnologia *wall flow*, sono cioè costituiti da monoliti ceramici porosi con geometria a canali, le cui basi sono alternativamente occluse ai due lati in maniera da forzare il passaggio della corrente gassosa (fumi) attraverso le superfici laterali (vedi Fig. 3). In base alla porosità dei materiali, 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”).

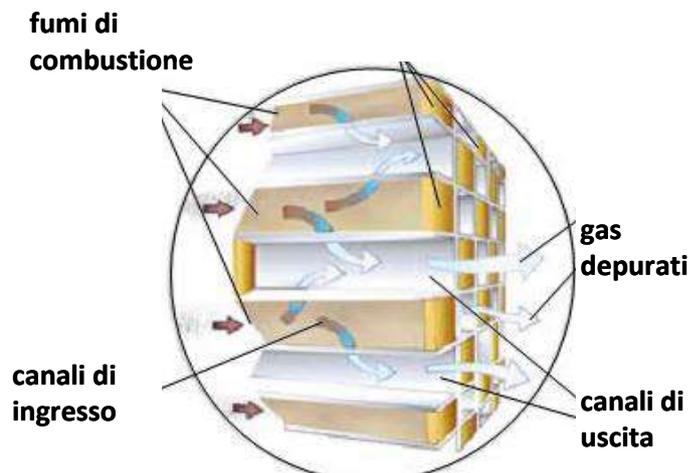


Figura 3. Schema funzionale dei filtri tipo *wall flow*

In fase di rigenerazione, i filtri vengono riscaldati a temperature relativamente alte (450 – 550 °C) e, grazie alla presenza di catalizzatori tra i pori, le particelle carboniose adese alla superficie dei filtri subiscono un processo di ossidazione e termodistruzione, mentre le molecole di gas organici che oltrepassano le pareti sono convertite in composti più leggeri e meno inquinanti dal punto di vista ambientale.

Questo stesso obiettivo sarebbe da raggiungere anche in fase di esercizio dei filtri, ossia a temperature di lavoro più basse. A tal scopo, studi futuri della presente attività di ricerca (a cura di Di.I.In.) prevedono l’analisi di ulteriori sostanze ad azione catalitica, capaci di attivare i processi di ossidazione dei composti organici a temperature prossime a quelle di scarico dei fumi (circa 150 - 200 °C).

I prototipi testati durante la presente annualità sono stati invece tutti attivati con la stessa tipologia di catalizzatore, a base cioè di ferrite di rame (CuFe_2O_4), variando tuttavia la percentuale in massa caricata all’interno di essi. Sono stati infatti provati filtri con 0% (filtri “bianchi”), 15%, 20% e 25% in massa di catalizzatore.

Inoltre, sono stati esaminati filtri aventi diverse porosità di base e dimensioni dei pori (relative cioè ai filtri “bianchi”, senza o prima dell’aggiunta di catalizzatore), partendo in un caso dal materiale originario (a base di carburo di silicio, SiC, della *Pirelli EcoTechnology*, 150 cpsi) e nell’altro immergendo gli stessi materiali in soluzione acida, provocandone quindi l’aumento della porosità per corrosione. Alcune caratteristiche fisiche e porosimetriche dei suddetti dispositivi sono indicate nella seguente Tabella 2:

Tabella 2. Caratteristiche porosimetriche dei filtri testati

	filtri a porosità originaria				filtri a porosità più alta
% catalizzatore in massa	0	15	20	25	20
porosità totale (%)	53	43	40	23	44 - 45
dimensione dei pori (μm)	17	14,7	13,3	12,3	18
area superficiale (m^2/g)	0,35	0,52	0,93	-	1,2

Dal punto di vista geometrico, i prototipi utilizzati nelle prove sperimentali hanno avuto tutti le stesse dimensioni, con altezza pari a 125 mm e diametro di 26 mm. Ulteriori caratteristiche geometriche sono indicate nella Figura 4 e nella corrispondente Tabella 3.

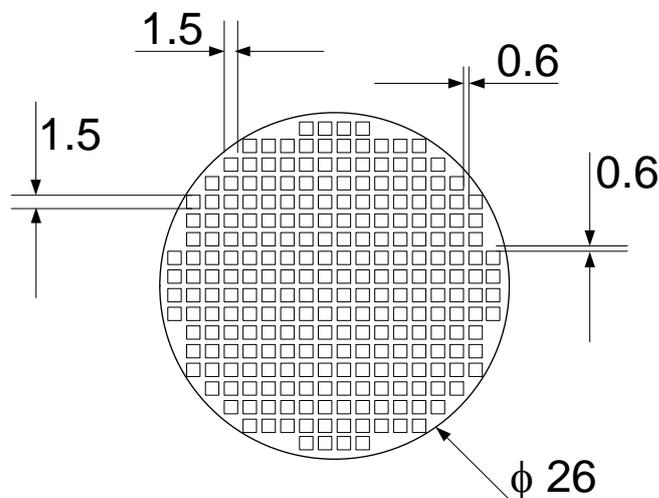


Figura 4. dimensioni in pianta dei prototipi wall flow in scala di laboratorio

Tabella 3. Caratteristiche geometriche dei prototipi wall flow in scala di laboratorio

diametro	D	26	mm
lunghezza complessiva	L_{tot}	125	mm
lunghezza canali	L	117	mm
dimensione cella	α	1,5	mm
spessore parete	w_s	0,6	mm
densità di cella	σ	22,7	cm^{-2}
numero di celle	N	120	-



Figura 5. Prototipi in scala di laboratorio di filtri wall flow in SiC

2.1.3 Modalità di esecuzione delle prove

2.1.3.1 Condizioni di esercizio ed emissioni della caldaia

Durante le prove sperimentali la caldaia è stata esercita in due diverse condizioni, corrispondenti rispettivamente a percentuali di ossigeno nei fumi pari a 8% e 10%, e contraddistinte dal mantenimento dei valori di default per tutte le altre regolazioni relative alla combustione del pellet.

In tal modo si sono definite due differenti modalità di prova: una ad alto carico di inquinanti (con $O_2 = 8$ vol%), e l'altra rappresentativa delle normali condizioni di lavoro della caldaia (con $O_2 = 10$ vol%), nel rispetto quindi dei limiti di emissione previsti per la corrispondente tipologia di impianto.

Alcuni dei parametri medi di funzionamento, nelle due menzionate condizioni di esercizio, sono espressi nella seguente Tabella 4:

Tabella 4. Condizioni di esercizio della caldaia

	basso carico	alto carico
consumo combustibile (kg/h)	~ 7	~ 7
potenza erogata (kW)	26	31
rendimento termico (%)	79	92
portata acqua circuito idraulico (l/s)	1,8	0,9
temperatura mandata acqua (°C)	67	77
temperatura ritorno acqua (°C)	63	69
temperatura fumi in canna fumaria (°C)	115	135
pressione in caldaia (mbar)	0,25	0,25
tiraggio (Pa)	~ 10	~ 10
concentrazione O_2 nei fumi (vol %)	10	8

Dal punto di vista delle emissioni, il regime di combustione ad alto carico ha dato origine a concentrazioni molto elevate di CO, come riporta la sottostante Figura 6, in cui è indicato l'andamento della concentrazione di CO in mg/Nm^3 (ricondata al 10% O_2 nei fumi) durante una prova di "zero" della caldaia (prova per la determinazione dei valori di riferimento e dei parametri standard della caldaia).

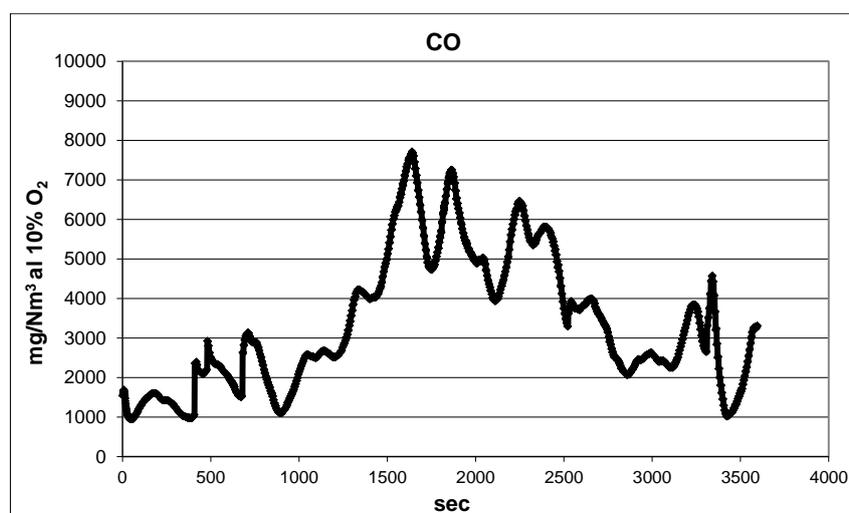


Figura 6. Concentrazione di CO nei fumi durante una prova di "zero" ad alto carico di inquinanti

Al contrario, nelle normali condizioni di esercizio della caldaia (basso carico di inquinanti, con% O₂ = 10%), le concentrazioni di CO sono risultate relativamente basse e al di sotto dei limiti di emissione stabiliti dalla norma di riferimento (EN 303/5) per la classe più alta (classe 5).

Di seguito si riporta l'andamento della concentrazione di CO ottenuto durante una prova di combustione di "zero" a basso carico di inquinanti.

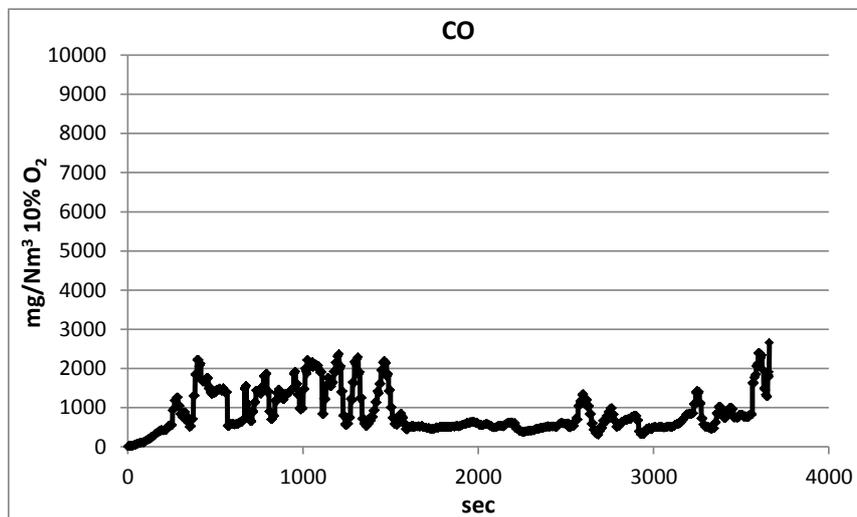


Figura 7. Concentrazione di CO nei fumi durante una prova di "zero" a basso carico di inquinanti

Riguardo al particolato, le misure gravimetriche effettuate con il sistema di campionamento ad impattore (vedi paragrafo precedente) hanno mostrato anche in questo caso concentrazioni diverse per le due differenti condizioni di esercizio della caldaia.

Prendendo in considerazione il solo intervallo granulometrico PM < 1 µm (per gli altri intervalli, infatti, le quantità di particolato campionate sui filtri dell'impattore sono risultate troppo basse per ottenere misure attendibili di concentrazione), si sono determinati valori medi di concentrazione per le due differenti modalità di prova rispettivamente pari a 53 mg/Nm³ e 123 mg/Nm³ (ricondotte entrambe al 10% di O₂ nei fumi) per basso ed alto carico di inquinanti.

2.1.3.2 Numero, tipologia e obiettivi delle prove sperimentali

L'attività sperimentale sui filtri wall flow si è composta sostanzialmente di due differenti set di prove, il primo effettuato in condizioni della caldaia ad alto carico di inquinanti, e l'altro con la caldaia a basso carico.

Durante la prima campagna di prove sono stati effettuati n. 7 test significativi, utilizzando filtri con la stessa porosità di base e adoperando all'incirca la stessa portata totale di aspirazione dei fumi (Q_{gas} ~ 6,2 NL/min). Di conseguenza i filtri sono stati sottoposti allo stesso carico di particolato e di CO (M_{PM} ~ 52 mg/h, M_{CO} ~ 1243 mg/h) e, in caso di prove effettuate alla stessa temperatura, anche alla stessa velocità superficiale dei fumi.

Scopo di questa prima attività sperimentale è stata infatti la verifica dell'influenza della percentuale di catalizzatore sui filtri, rispetto all'efficienza di ritenzione del particolato e alle perdite di carico. La procedura di deposizione del catalizzatore sui filtri e la sua stessa presenza tra i pori della matrice ceramica producono infatti lievi modifiche strutturali del materiale, i cui effetti sono stati quindi oggetto di indagine. In tal modo si è cercato di stabilire la percentuale ottimale di catalizzatore sui filtri, prendendo in esame la sola fase di esercizio e tralasciando inizialmente quella di rigenerazione. Quest'ultima è stata in seguito considerata solo in termini di temperatura di attivazione del catalizzatore, in funzione ancora della sua percentuale in massa sul filtro (in termini quindi di velocità spaziale).

Non sono stati invece effettuati test sui tempi di rigenerazione dei prototipi, in quanto il sistema e la conseguente velocità di riscaldamento caratteristici dell'attuale linea sperimentale presentano differenze troppo marcate rispetto ai sistemi da utilizzare in un'ipotetica applicazione concreta dei dispositivi (riscaldamento a microonde), per cui si è ritenuto che i risultati eventualmente ottenuti sarebbero stati comunque affetti da un'eccessiva approssimazione.

In definitiva, durante la prima campagna di prove, sono stati esaminati filtri in scala di laboratorio *wall flow* con percentuali di catalizzatore rispettivamente pari a: 0%, 15%, 20% e 25%.

Il secondo set di prove (numero di test significativi pari a 16) è stato condotto a basso carico di inquinanti ($M_{PM} \sim 33,5$ mg/h, $M_{CO} \sim 567$ mg/h), con filtri tutti al 20% in massa di catalizzatore ma con porosità di base differente. In questo caso, infatti, si è voluto verificare innanzitutto se l'aumento della porosità e della dimensione dei pori provocasse effetti sostanziali sulle perdite di carico e sui tempi di esercizio dei filtri, senza tuttavia inficiare l'efficienza di ritenzione del particolato. E' stata quindi ricercata, a partire dalle caratteristiche del prodotto commerciale, la porosità ottimale per il materiale ceramico da utilizzare nella particolare applicazione in esame.

Inoltre, in questa seconda serie di prove, si è cercato anche di simulare una sorta di fase di rigenerazione dei filtri, effettuando delle prove a temperatura d'esercizio relativamente alta (T_{filtro} fino a circa 550°C) con filtri in precedenza già utilizzati a temperature più basse. In tal caso si è cercato di investigare, mediante l'osservazione delle perdite di carico e delle emissioni a valle del filtro, i meccanismi di termodistruzione delle particelle e di ossidazione degli inquinanti gassosi, con particolare attenzione ad eventuali reazioni secondarie indotte dalla stessa azione catalitica del filtro.

Infine, mediante il confronto dei dati sperimentali ottenuti nel primo e nel secondo set di prove, considerando le prove effettuate sui filtri a uguale porosità di base e con la stessa percentuale di catalizzatore (20% in massa), si sono potuti verificare gli effetti del carico di particolato e della velocità superficiale dei fumi sul funzionamento dei filtri.

A seconda degli obiettivi e delle modalità di esecuzione delle prove, e in base anche a vincoli operativi vigenti all'interno del laboratorio, il periodo di campionamento e di misura delle grandezze prese in esame ha avuto una durata compresa tra 60 e i 180 minuti.

2.1.3.3 Procedura di prova

Per poter ottenere risultati sperimentali il più possibile confrontabili tra loro, è stata seguita una rigorosa e precisa procedura di prova (anche in termini di tempi di accensione, spegnimento e pulizia della caldaia), con la quale si è cercato di far fronte alle inevitabili variazioni di condizioni operative tra una prova e l'altra, ad un non sempre adeguato livello di risoluzione degli strumenti di misura, e alla possibilità di effettuare i campionamenti solo a valle dei filtri.

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 della caldaia, non hanno consentito di svolgere di regola più di una prova al giorno, che in media è durata complessivamente 8 ore.

Per i dettagli tecnico-operativi relativi alla procedura su citata si rimanda all'allegato A del presente documento, quale promemoria utilizzato in laboratorio per l'esecuzione corretta delle prove.

2.2 Risultati sperimentali

2.2.1 Perdite di carico ed efficienze di abbattimento in funzione della percentuale in massa di catalizzatore

I primi risultati che si presentano in questo capitolo riguardano le prove condotte per la verifica dell'influenza della deposizione del catalizzatore sul funzionamento dei filtri in fase di esercizio.

Di seguito si riportano quindi gli andamenti delle perdite di carico e i valori di efficienza di abbattimento per i prototipi con la stessa porosità di base, sottoposti alle stesse condizioni operative, e aventi percentuali in massa di catalizzatore rispettivamente di 20%, 15%, e 0%.

Filtro 20% cat.
 $T_{fumi} = 131\text{ °C}$
 $T_{filtro} = 368\text{ °C}$
 $Q_{gas} = 6,16\text{ NL/min}$
 $v_s = 0,46\text{ m/s}$
 $M_{PM} = 51,71\text{ mg/h}$
 $e = 97,0\%$

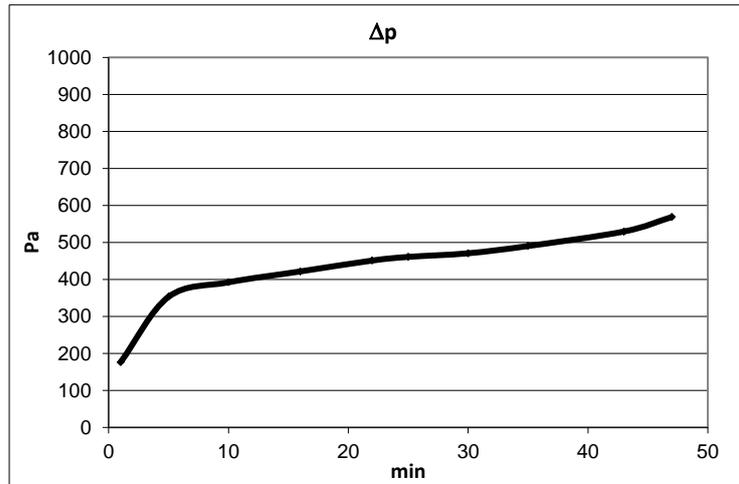


Figura 8. Perdite di carico per filtro con 20% in massa di catalizzatore (T = 368°C)

Filtro 15% cat.
 $T_{fumi} = 137\text{ °C}$
 $T_{filtro} = 368\text{ °C}$
 $Q_{gas} = 6,20\text{ NL/min}$
 $v_s = 0,46\text{ m/s}$
 $M_{PM} = 52,06\text{ mg/h}$
 $e = 98,4\%$

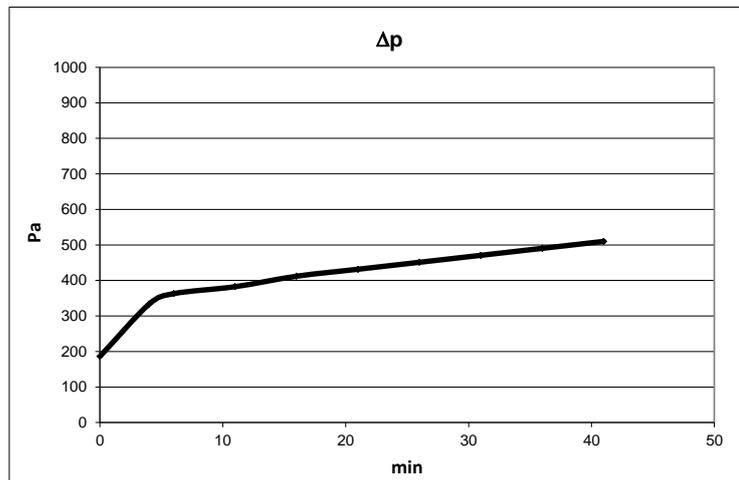


Figura 9. Perdite di carico per filtro con 15% in massa di catalizzatore (T = 368°C)

Filtro 0% cat.
 $T_{fumi} = 135\text{ °C}$
 $T_{filtro} = 375\text{ °C}$
 $Q_{gas} = 6,17\text{ NL/min}$
 $v_s = 0,46\text{ m/s}$
 $M_{PM} = 51,80\text{ mg/h}$
 $e = 99,8\%$

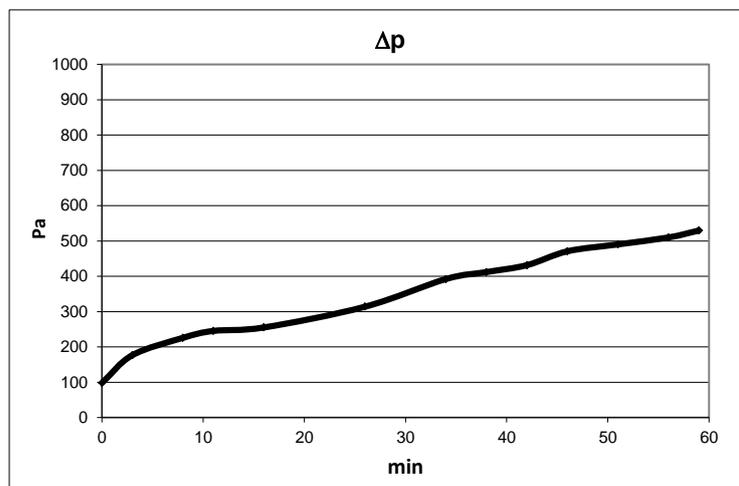


Figura 10. Perdite di carico per filtro bianco (T = 375 °C)

I tempi di prova riportati nei grafici su esposti corrispondono ai periodi in cui le perdite di carico mantengono un andamento crescente, lineare ed uniforme. Successivamente, dal manometro a colonna si evincono delle fluttuazioni della colonna d'acqua, i cui valori medi, tuttavia, continuano ad avere un andamento crescente, seppur meno accentuato rispetto al precedente. La distinzione tra questi due differenti comportamenti delle perdite di carico fa pensare ad una prima fase in cui sostanzialmente si verifica una fase di filtrazione di massa, con la parziale e continua occlusione dei pori del materiale ceramico (fase regolare delle perdite di carico), ed un secondo meccanismo per il quale invece si assiste presumibilmente ad un processo di *cake filtration*, con passaggio più difficoltoso del gas.

Nei grafici su esposti si presenta solamente la prima fase delle due su descritte, avendo interrotto la misura in concomitanza con il verificarsi delle fluttuazioni. Essendo infatti l'obiettivo di tali test la verifica dell'influenza del catalizzatore sulle perdite di carico, si è trascurato il fenomeno di filtrazione a superficie, non potendo quest'ultimo essere influenzato dalla presenza del catalizzatore all'interno del filtro. Si è cercato in tal modo anche di stimare la durata della prima fase di filtrazione, che in questi casi è risultata compresa tra 40 e circa 55 minuti (Figure 8, 9 e 10).

Dagli stessi grafici si nota un andamento simile delle perdite di carico per i filtri a diversa percentuale di catalizzatore, con pendenze pressoché uguali per i filtri al 20% e al 15% (Figure 8 e 9).

Il tratto iniziale a pendenza maggiore è imputabile alla regolazione delle pompe di aspirazione, benché la più netta evidenza nei casi dei filtri attivati con catalizzatore (Fig. 8 e 9), farebbe pensare anche ad un effetto dovuto alla deposizione del catalizzatore, soprattutto in termini di riduzione della porosità e della dimensione dei pori (vedi Tabella 2).

In termini di valori assoluti, non si registrano tuttavia sostanziali differenze per le perdite di carico dei filtri a percentuale diversa e non nulla di catalizzatore, testati nelle stesse condizioni di esercizio (Fig. 8 e 9).

Confrontando invece i dati di prove effettuate con la stessa percentuale di catalizzatore (15%, $v_{sp} \sim 5,2 \text{ h}^{-1}$) ma a differenti temperature di esercizio (Fig. 9 e 11), sembrerebbe che alla temperatura di circa 370 °C ci sia già stato un iniziale effetto di termodistruzione delle particelle organiche da parte del catalizzatore depositato sul filtro.

Filtro 15% cat.

$T_{fumi} = 133 \text{ °C}$

$T_{filtro} = 303 \text{ °C}$

$Q_{gas} = 6,13 \text{ NL/min}$

$v_s = 0,41 \text{ m/s}$

$M_{PM} = 51,49 \text{ mg/h}$

$e = 93,8\%$

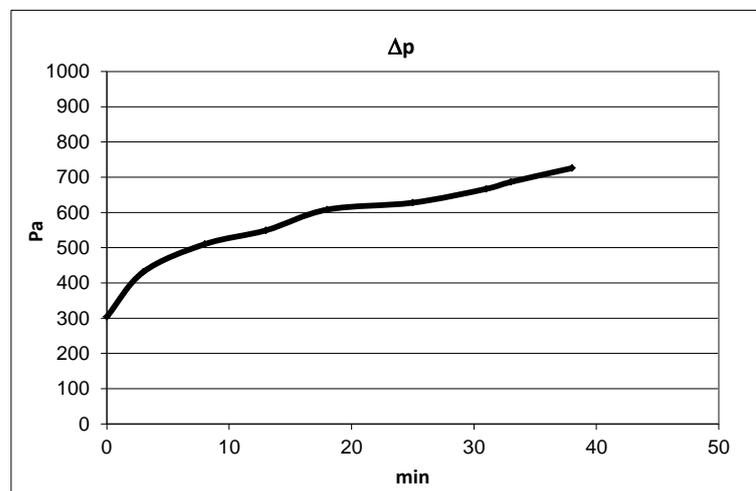


Figura 11. Perdite di carico per filtro con 15% in massa di catalizzatore ($T = 300\text{°C}$)

Risulta infatti evidente che a $T_{filtro} = 368 \text{ °C}$ (Fig. 9) le perdite di carico sono minori rispetto alla prova condotta a $T_{filtro} = 303 \text{ °C}$ (Fig. 11), pur essendo stati i filtri sottoposti allo stesso carico di particolato ($M_{PM} \sim 52 \text{ mg/h}$), e pur avendo il filtro a più bassa temperatura anche una velocità superficiale minore.

Infine, osservando anche i dati relativi alla prova condotta con percentuale ancora maggiore di catalizzatore (25%, $v_{sp} \sim 3,1 \text{ h}^{-1}$), e in condizioni operative leggermente differenti dalle precedenti (Fig. 12), si ritrovano perdite di carico ulteriormente più basse.

25% cat.
 $T_{fumi} = 134 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_{filtro} = 335 \text{ }^\circ\text{C}$
 $Q_{gas} = 6,20 \text{ NL/min}$
 $v_s = 0,44 \text{ m/s}$
 $M_{PM} = 52,12 \text{ mg/h}$
 $e > 99,9\%$ ¹

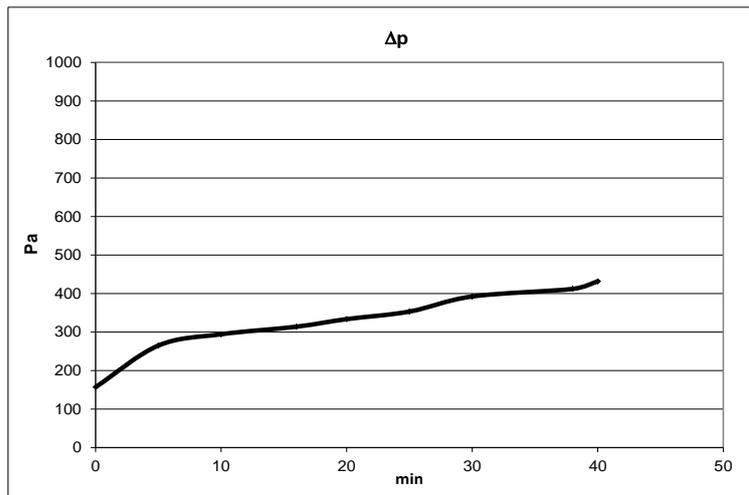


Figura 12. Perdite di carico per filtro con 25% in massa di catalizzatore (T = 335 °C)

Ciò confermerebbe quindi l'ipotesi che, a temperature superiori a circa 350 °C, il catalizzatore eserciti già una certa azione di ossidazione sulle particelle organiche, in funzione della sua percentuale in massa sul filtro, e quindi della velocità spaziale riferita al particolato.

Ritornando invece ai soli dati relativi alle prove eseguite nelle stesse condizioni di esercizio (Fig. 8, 9 e 10), si evince che, se pur sempre molto alta, l'efficienza di ritenzione del particolato aumenta leggermente al diminuire della percentuale di catalizzatore sul filtro.

Tale risultato è probabilmente imputabile agli shock termici a cui sono sottoposti i materiali ceramici durante la fase di impregnazione del catalizzatore, con conseguente formazione di microfratture all'interno di essi, responsabili di una minima perdita di efficienza in fase di filtrazione.

Considerando solo questo aspetto, trascurando in questa sede le considerazioni fatte in precedenza sull'eventuale azione del catalizzatore a temperature relativamente basse, e vista la irrilevante differenza delle perdite di carico nel caso delle diverse percentuali di catalizzatore, si potrebbe optare per la scelta della minima percentuale testata (15%) quale soluzione ottimale da adottare sui filtri.

Tuttavia, nell'ottica di una piena rigenerazione dei filtri e di una totale ossidazione del particolato, e immaginando che i tempi per tale operazione (surriscaldamento dei filtri) aumentino al diminuire della percentuale di catalizzatore utilizzata, si è preferito considerare la soluzione più cautelativa del 20%, quale percentuale effettiva di catalizzatore da impiegare nelle reali applicazioni dei filtri *wall flow*.

2.2.2 Perdite di carico ed efficienze di abbattimento in funzione della porosità di base

In questa sezione si riportano i risultati delle prove sperimentali condotte su filtri a diversa porosità di base e attivati con la stessa percentuale in massa di catalizzatore, pari al 20%.

Scopo di questi test è stato infatti verificare gli effetti dell'aumento della porosità e della dimensione dei pori (vedi Tab. 2), rispetto ai materiali ceramici originari, sul funzionamento dei filtri, in termini soprattutto di perdite di carico ed efficienze di ritenzione del particolato (e). I test sono stati tutti condotti in condizioni di basso carico di particolato ($M_{PM} \sim 33,5 \text{ mg/h}$) e con portata di aspirazione costante ($Q_{gas} \sim 10 \text{ NL/min}$).

Inizialmente gli stessi filtri sono stati testati con un flusso di aria, della stessa portata di aspirazione dei fumi ($Q_{aria} \sim 10 \text{ NL/min}$, $v_s \sim 0,52 \text{ m/s}$) e ad una temperatura di esercizio ($T_{filtro} \sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$)² mantenuta poi costante anche per le prime prove di esercizio dei filtri a bassa temperatura. Tale operazione ha avuto come scopo la

¹ Nei casi in cui la quantità residua di particolato campionata sui filtri dell'impattore sia risultata troppo bassa per poter essere misurata adeguatamente, si è deciso di attribuire un'efficienza di abbattimento dei filtri *wall flow* superiore a 99,9 %.

² Il valore di tale temperatura rispecchia il limite minimo più vicino alla temperatura dei fumi in canna fumaria, in base alla velocità di riscaldamento/raffreddamento del forno e in relazione ai tempi da rispettare per l'esecuzione delle prove.

misura delle perdite di carico iniziali dei filtri, senza l'effetto del carico di particolato, per una prima stima sulle differenze tra le due diverse porosità prese in esame. Di seguito si riportano alcuni dei risultati più significativi:

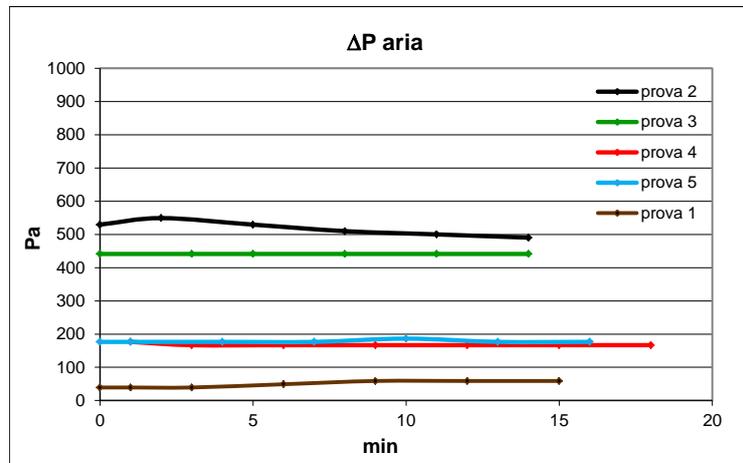


Figura 13. Perdite di carico con flusso di aria per filtri a porosità originaria

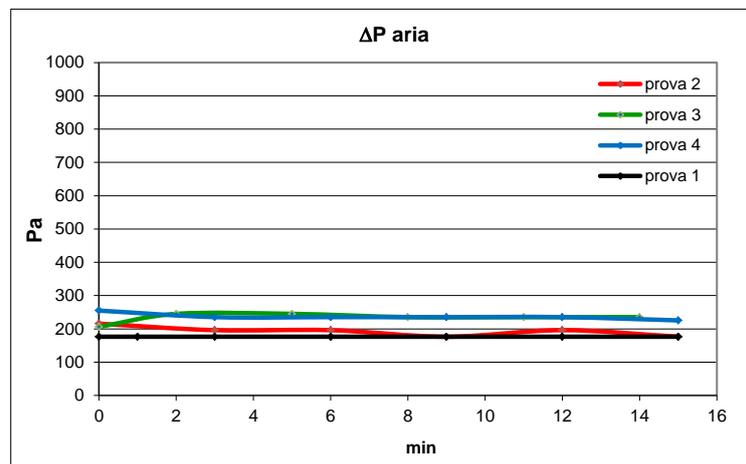


Figura 14. Perdite di carico con flusso di aria per filtri ad alta porosità

Per i filtri a porosità originaria ($\epsilon_o = 40\%$, $d_{pori} = 13,3 \mu m$) si sono ricavati risultati anche abbastanza discordanti tra loro, con perdite di carico comprese mediamente tra 50 e 500 Pa (Fig. 13). I filtri a porosità più alta ($\epsilon_o = 45\%$, $d_{pori} = 18,0 \mu m$) presentano invece dati uniformi, con perdite di carico comprese tra i 180 e i 250 Pa (Fig. 14).

Si sospetta di conseguenza una diversa conformazione strutturale dei filtri utilizzati durante le prove con porosità originaria. Per alcuni di essi, tuttavia, le perdite di carico con flusso di aria risultano pressoché uguali a quelle relative ai filtri a porosità più alta (prova 4 e 5 in Figura 13).

Quest'ultimo risultato sembra essere confermato anche dalle prove di esercizio dei filtri a contatto con i fumi di combustione, durante le quali si è ovviamente calcolata anche l'efficienza di ritenzione del particolato (Figure 15 e 16)

Si può notare da entrambi i grafici che con l'aumentare del periodo di prova aumenta anche l'efficienza di ritenzione del particolato (e), a riprova dell'effetto positivo prodotto dallo stesso strato di polveri sulla superficie esterna dei filtri (cake).

A parte il dato anomalo relativo ad una prova con porosità originaria (in rosso in Fig. 15), negli altri casi non si evincono differenze sostanziali tra le due differenti porosità dei filtri, né in termini di efficienza né per quanto riguarda le perdite di carico. Risulterebbero anzi leggermente superiori le perdite di carico relative ai filtri a più alta porosità.

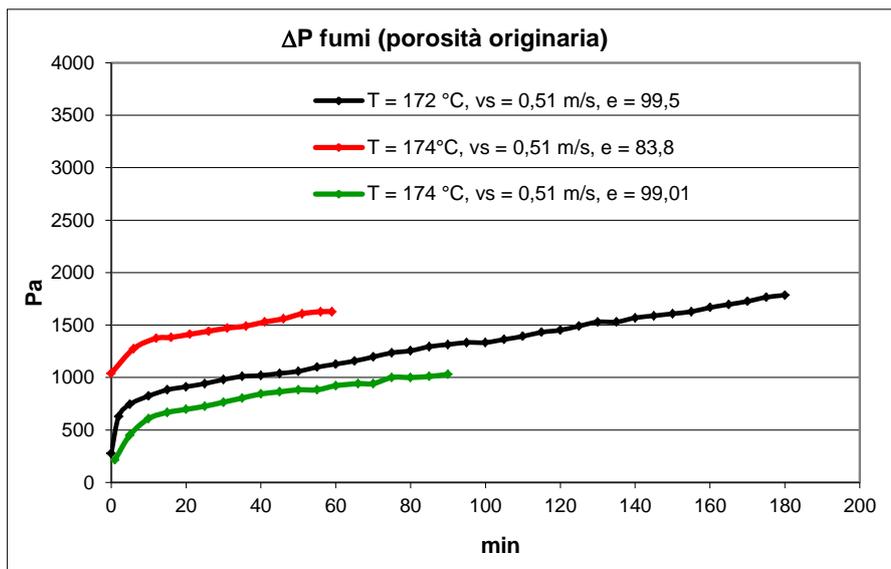


Figura 15. Perdite di carico in fase di esercizio dei filtri, con porosità originaria ($\epsilon_o = 40\%$, $d_{pori} = 13,3 \mu m$)

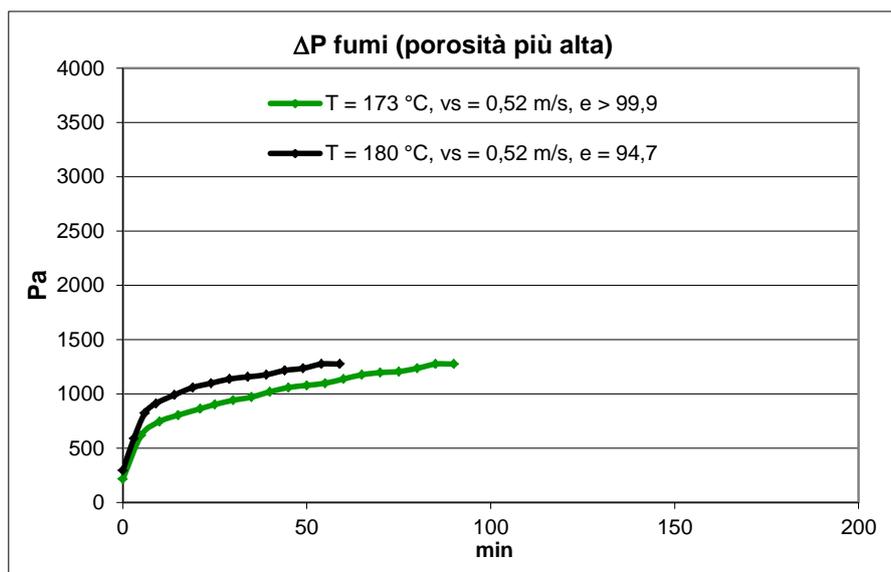


Figura 16. Perdite di carico in fase di esercizio dei filtri, con porosità più alta ($\epsilon_o = 45\%$, $d_{pori} = 18,0 \mu m$)

Tale risultato apparentemente anomalo potrebbe essere spiegato dal fatto che all'incremento della dimensione dei pori non corrisponde un aumento delle porosità aperte dei filtri, reale responsabile del passaggio dei gas.

Esaminando, infine, la sola prova effettuata per 180 minuti di campionamento (linea nera in Fig. 15), si può considerare un tempo di esercizio dei filtri per lo meno superiore a tale periodo, in quanto le perdite di carico a fine prova mostrano ancora un andamento mediamente crescente e a pendenza costante, e un valore assoluto di circa 1800 Pa (18 mbar). In tal caso, le fluttuazioni della colonna d'acqua, presumibilmente indicanti l'inizio il meccanismo di filtrazione a superficie, si sono verificate dopo circa 60 minuti dall'inizio della prova.

2.2.3 Influenza del carico di inquinanti, della velocità superficiale e della velocità spaziale (ad alta T) sul funzionamento dei filtri

In questo paragrafo si riportano i risultati dell'analisi relativa all'influenza della velocità superficiale e del carico di inquinanti sul comportamento dei filtri. Il primo grafico mostrato di seguito (Fig. 17) indica l'andamento delle perdite di carico dei filtri in fase di esercizio, in due diverse condizioni di velocità superficiale dei fumi (v_s) e carico di particolato (M_{PM}).

Si evince facilmente che il carico di particolato ha scarso rilievo sulla determinazione delle perdite di carico, almeno per i valori considerati (linee quasi parallele, con pendenze pressoché uguali), che invece sembrano essere notevolmente influenzate dalla velocità superficiale.

Anche dall'analisi delle perdite di carico dei filtri in condizioni di catalizzatore attivo (fase assimilabile a quella di rigenerazione dei filtri), si nota la maggiore influenza della velocità superficiale rispetto al carico di inquinanti (Figura 18).

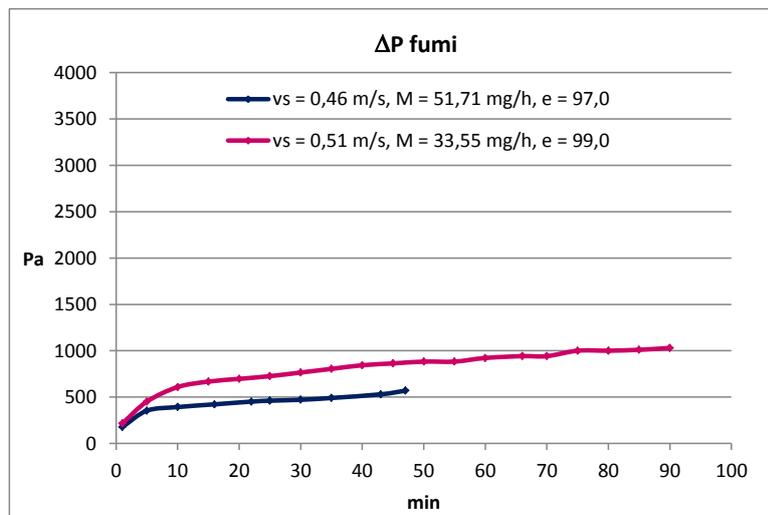


Figura 17. Perdite di carico in fase di esercizio dei filtri, in funzione della velocità superficiale e del carico di particolato

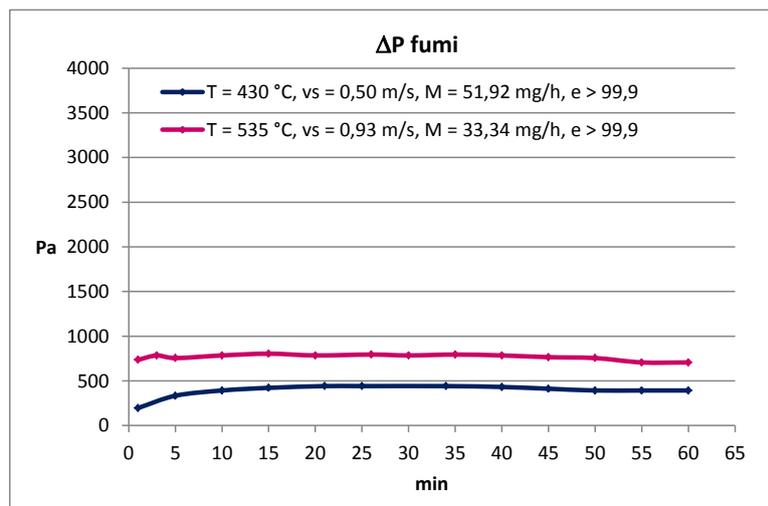


Figura 18. Perdite di carico in fase di attivazione del catalizzatore, in funzione della velocità superficiale e del carico di particolato

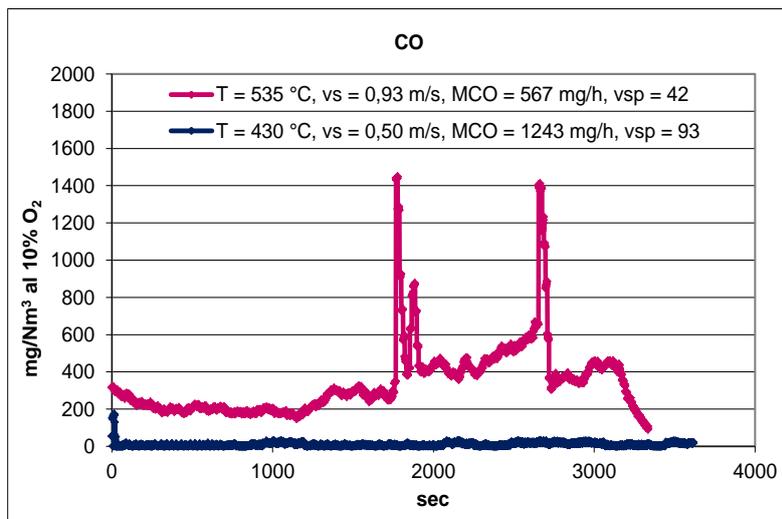


Figura 19. Concentrazioni di CO nei fumi durante prove di filtrazione ad alta temperatura, in funzione della velocità superficiale e del carico di particolato

La stessa velocità superficiale dei fumi (intesa in questo caso come tempo di residenza dei fumi a contatto col catalizzatore) sembra avere un peso addirittura maggiore della velocità spaziale per quanto riguarda l’abbattimento del CO. Osservando infatti la Figura 19, si evince che, anche nel caso di più bassa temperatura di attivazione (430 °C rispetto a 535°C), con carico iniziale di CO maggiore (1243 mg/h rispetto a 567 mg/h) e di conseguenza con velocità spaziale più alta ($v_{sp} = 93$ rispetto a $v_{sp} = 42$), la riduzione della velocità superficiale (da 0,93 m/s a 0,50 m/s) comporta un notevole beneficio in termini di riduzione del CO, facendo presumere la necessità di garantire comunque sufficienti tempi di residenza del gas all’interno dei filtri (in questo caso pari a circa 0,25 sec).

2.2.4 Comportamento dei filtri ad alta temperatura: filtri nuovi e usati

In vista di uno studio più approfondito sulla fase di rigenerazione (in termini soprattutto di temperatura, durata e velocità di riscaldamento), si è proceduti già da quest’anno all’analisi del comportamento dei filtri ad alta temperatura (temperature comprese tra 460 °C e 540 °C), a seguito di un loro primo utilizzo in prove effettuate a temperatura più bassa ($T = 170 - 180$ °C, durata compresa tra 60 e 90 minuti).

I risultati derivanti da tale verifica sono stati poi messi a confronto con quelli relativi alle prove eseguite su filtri nuovi, all’incirca alle stesse temperature. Tale operazione è stata condotta sia per i filtri a porosità originaria sia per quelli a più alta porosità, tutti aventi una percentuale in massa di catalizzatore pari al 20%, e sottoposti a carichi di particolato e CO costanti ($M_{PM} \sim 33,5$ mg/h, $M_{CO} \sim 570$ mg/h).

In questo caso si è posta l’attenzione soprattutto sulla concentrazione di CO a valle dei filtri, e sulla capacità di ossidazione delle particelle solide, verificata quest’ultima mediante l’osservazione di perdite di carico costanti durante le prove.

Per i filtri a porosità originaria si sono riscontrate perdite di carico costanti sia per filtro nuovo che per filtro usato (utilizzato cioè dopo un’iniziale prova di esercizio a bassa temperatura di 90 minuti), a temperature di esercizio di circa 535 °C, dando quindi prova di una efficace termodistruzione delle particelle solide organiche in entrambi i casi, verificata altresì da un’efficienza totale di abbattimento molto alta (Fig. 20).

Anche per quanto riguarda le concentrazioni di monossido di carbonio non si riscontrano sostanziali differenze tra i filtri nuovi e usati (Fig. 21 e 22), anche se, se non in un caso (linea blu di Fig. 21), l’attività di riduzione del CO risulta molto lieve rispetto alla concentrazione rilevata in assenza di filtro catalitico (prova “zero”, linea rossa in entrambi i grafici di Fig. 21 e 22).

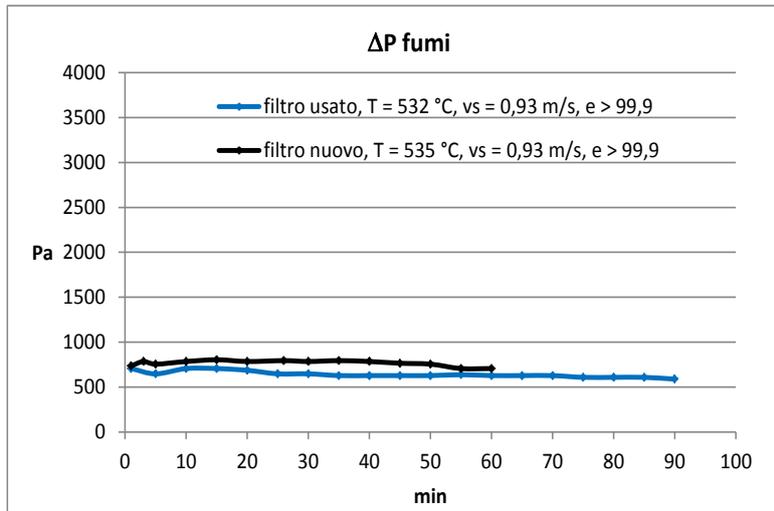


Figura 20. Perdite di carico per filtri a porosità originaria, in condizioni di alta temperatura, nei casi di filtro usato e di filtro nuovo

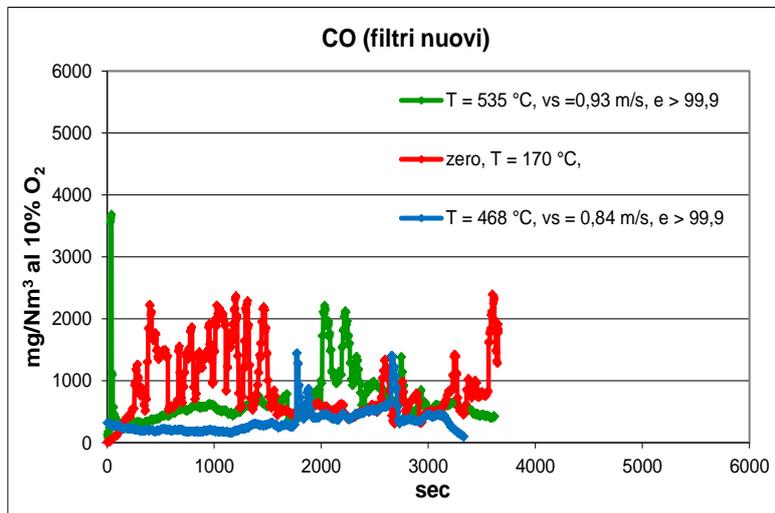


Figura 21. Concentrazioni di CO per filtri nuovi a porosità originaria, in condizioni di alta temperatura

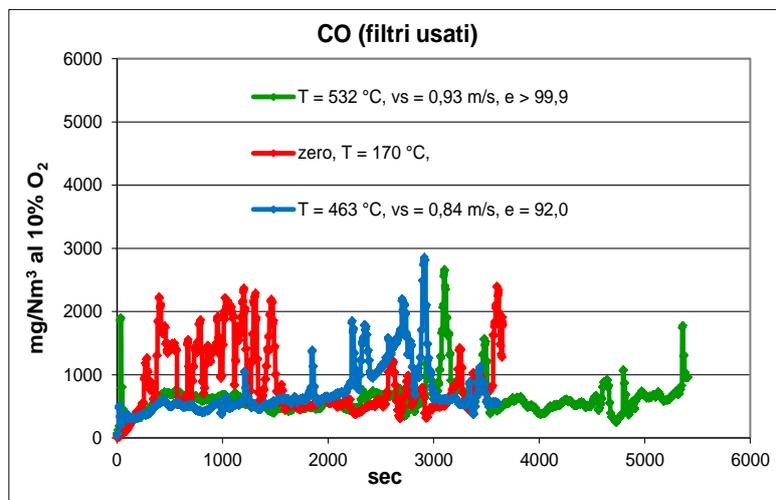


Figura 22. Concentrazioni di CO per filtri usati a porosità originaria, in condizioni di alta temperatura

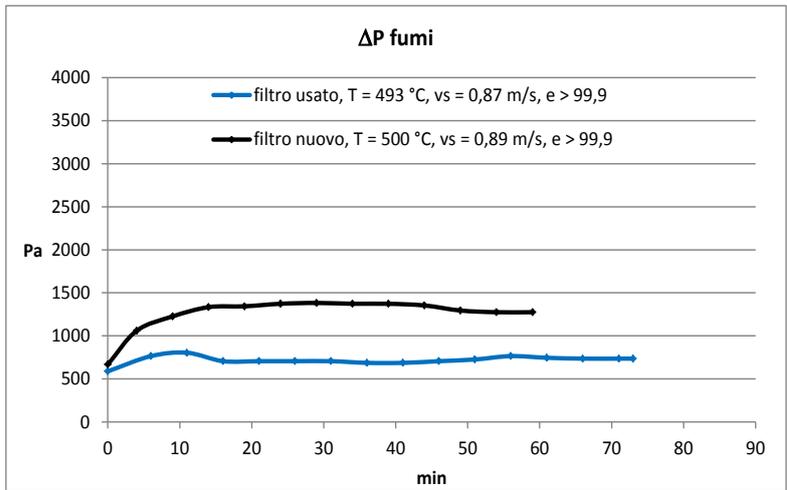


Figura 23. Perdite di carico per filtri ad alta porosità, in condizioni di alta temperatura, nei casi di filtro usato e di filtro nuovo

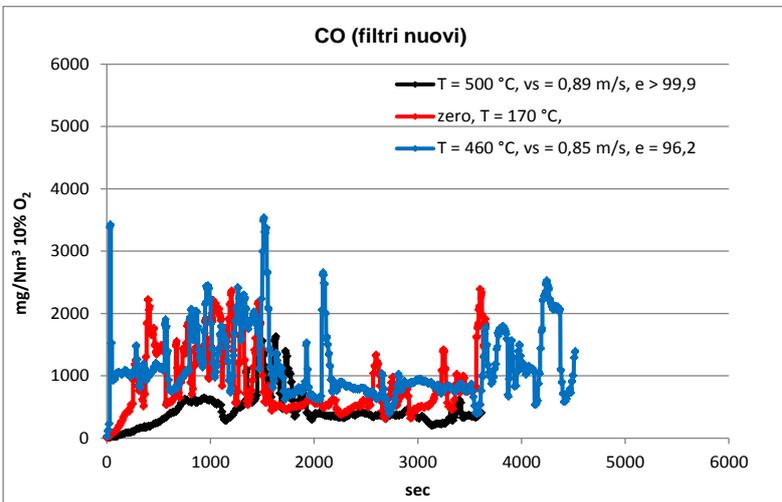


Figura 24. Concentrazioni di CO per filtri nuovi ad alta porosità, in condizioni di alta temperatura

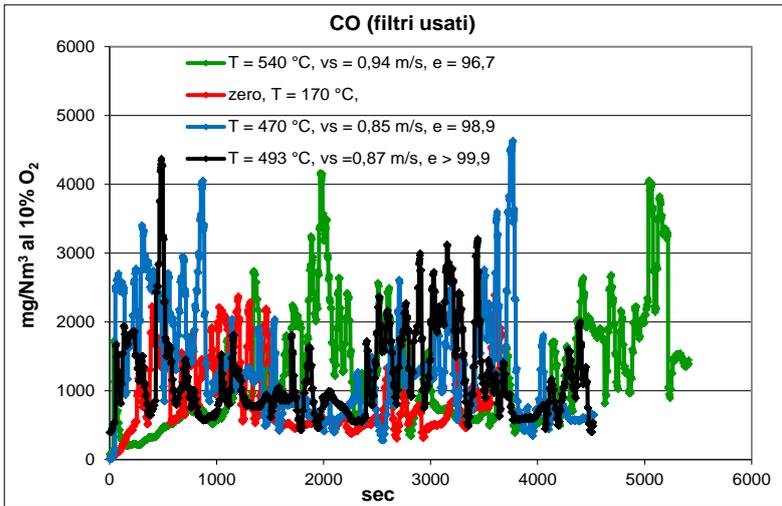


Figura 25. Concentrazioni di CO per filtri usati ad alta porosità, in condizioni di alta temperatura

Riguardo i filtri a più alta porosità, le perdite di carico rimangono ancora costanti in condizioni di alta temperatura (Fig. 23), stando a significare un'efficace termodistruzione delle polveri. Tuttavia, in questo caso, si nota un'anomala differenza tra il caso di filtro usato (perdite di carico più basse) e quello di filtro nuovo (perdite di carico più alte), che trova al momento risposta solo in un'ipotetica differenza strutturale dei due prototipi testati (dovuta presumibilmente al trattamento subito dai filtri per l'incremento della dimensione dei pori).

Anche in relazione alla concentrazione di CO, esistono sostanziali differenze tra i risultati delle prove condotte con filtri nuovi e quelli relativi ai filtri usati (Fig. 24 e 25): per questi ultimi, le concentrazioni di CO risultano molto alte e superiori anche ai valori ricavati in assenza di filtro catalitico. Ciò potrebbe indicare lo sviluppo del fenomeno di parziale ossidazione delle particelle precedentemente intrappolate nel filtro, anche se, come visto in precedenza, lo stesso fenomeno non è individuabile nel caso dei filtri a porosità originaria.

Per i filtri nuovi, invece, si riconferma il risultato per il quale a velocità superficiali relativamente alte (circa 0,9 m/s) è necessario aumentare la temperatura di riscaldamento del filtro fino a valori superiori o uguali a 500 °C, per ottenere un'accettabile azione di ossidazione da parte del catalizzatore.

2.3 Dimensionamento preliminare dei sistemi di filtrazione tipo wall flow

2.3.1 Procedura analitica

Partendo da alcuni dei dati sperimentali ricavati durante i test sui prototipi da laboratorio, si è cercato successivamente di sviluppare un modello analitico capace di stimare in primo luogo le perdite di carico durante l'esercizio dei filtri, al variare del loro diametro (D) e della lunghezza dei loro canali (L). Il limite massimo ammissibile di perdite di carico e la frequenza dei cicli di esercizio/rigenerazione rappresentano infatti parametri fondamentali per il dimensionamento di tali sistemi in applicazioni reali.

A tal scopo, si sono inizialmente definite tutte le grandezze termo-fisiche relative ai fumi di combustione (densità, viscosità, capacità termica, conduttività termica), partendo dalla composizione della biomassa (composizione in peso di C, H, O sulla biomassa secca) e dal suo contenuto di umidità, dalle condizioni di esercizio della caldaia (individuate dalle concentrazioni volumetriche di CO₂ e O₂ nei fumi), e dalla stessa temperatura dei fumi misurata in canna fumaria.

I dati di input relativi alla corrente gassosa sono stati quindi completati attraverso la definizione della portata volumetrica intercettata dai filtri e della sua concentrazione di particolato, espressa in mg/Nm³ (grandezze anch'esse ricavate durante l'attività sperimentale sui prototipi da laboratorio).

I dati di ingresso relativi alle particelle solide organiche da trattenere sono stati ricavati da letteratura ([3], [5], [6]) o ancora una volta stimati in base all'indagine sperimentale. In particolare la procedura di dimensionamento richiede la valutazione dei seguenti parametri:

- dimensione media delle particelle;
- densità di particella;
- densità di bulk dello strato di polveri sulla superficie esterna del filtro (cake);
- densità di bulk delle polveri accumulate all'interno dei pori del filtro;
- permeabilità dello strato di polveri esterno (cake);
- porosità delle polveri accumulate all'interno dei pori del filtro;

Per quanto riguarda la geometria del filtro, considerato in questo caso di forma cilindrica, i dati di input necessari per il funzionamento del modello sono:

- diametro del filtro;
- lunghezza dei canali del filtro;
- porosità della matrice porosa;
- diametro dei pori del filtro;
- dimensione di cella;
- spessore delle pareti interne del filtro;

Secondo la procedura di dimensionamento, tali parametri sono considerati costanti e pari ai valori relativi ai prototipi da laboratorio testati (vedi Tabelle 2 e 3), ad eccezione del diametro del filtro e della lunghezza dei canali. Questi ultimi risultano invece essere i veri parametri di dimensionamento, in quanto vengono ridefiniti di volta in volta in base ai risultati ottenuti sulle perdite di carico e sull'efficienza di abbattimento.

La lunghezza ottimale dei canali è ottenuta minimizzando le perdite di carico a filtro pulito (escluso quindi l'effetto di ritenzione del particolato), calcolate mediante le seguente relazione:

$$\Delta p_{clean} = \frac{\mu \cdot Q}{2V} \cdot (\alpha + w_s)^2 \cdot \left(\frac{w_s}{k_o \cdot \alpha} + \frac{8FL^2}{3\alpha^4} \right) \quad (1)$$

Ricercando il valore minimo di tale espressione (composta dei due termini contrapposti relativi rispettivamente alla fase di percolazione del gas e di attrito) si ricava come detto la relazione corrispondente alla lunghezza ottimale dei canali del filtro, che, come si evince dalla seguente espressione (2), non dipende dal diametro del filtro (quindi dalla velocità del gas), ma solo dalle sue altre caratteristiche geometriche:

$$L^* = \sqrt{\frac{3 \cdot w_s \cdot \alpha^3}{8 \cdot k_0 \cdot F}} \quad (2)$$

Per il calcolo delle perdite di carico in fase di esercizio, e per la stima dell'efficienza di ritenzione del particolato, la parete filtrante del filtro (w_s) è innanzitutto discretizzata in strati, ognuno dei quali ha spessore pari a

$$b = ((1 - \varepsilon_o) \cdot d_{g0}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Il modello prevede il calcolo delle perdite di carico e dell'efficienza di abbattimento del particolato per ognuno di questi strati, considerando che in ogni istante la quantità in massa di polveri che raggiunge lo strato di livello i è uguale a:

$$m_i = M_{PM}^c \cdot \prod_{1}^{i-1} (1 - E_{i,1}) \quad (4)$$

L'efficienza di ritenzione del particolato nello strato di livello i , in ogni istante, è data dalla relazione:

$$E_i = 1 - e^{\frac{-3 \cdot \eta_{tot i} \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot b}{2 \cdot \varepsilon_i \cdot d_{g i}}} \quad (5)$$

$$d_{g i} = 2 \cdot \left[\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{m_{i+1} - m_i}{N_g b \cdot \rho_{PMW}} + \left(\frac{d_{g0}}{2} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_i = 1 - \left(\frac{d_{g i}}{d_{g o}} \right)^3 \cdot (1 - \varepsilon_o) \quad (7)$$

La capacità di ritenzione complessiva delle particelle da parte dello strato di livello i è data dalla combinazione di differenti fattori, corrispondenti rispettivamente ai fenomeni di ritenzione per diffusione (η_D), di intercettazione (η_R) e inerziali (η_I).

$$\eta_{tot i} = (\eta_{D i} + \eta_{R i} + \eta_{I i}) - (\eta_{D i} \cdot \eta_{R i} + \eta_{D i} \cdot \eta_{I i} + \eta_{I i} \cdot \eta_{R i}) + (\eta_{D i} \cdot \eta_{R i} \cdot \eta_{I i}) \quad (8)$$

Il termine corrispondente al fenomeno di ritenzione per diffusione è dato da:

$$\eta_{D i}=4 \cdot A s_i^{\frac{1}{3}} \cdot P e_i^{-\frac{2}{3}} \quad (9)$$

$$A s_i = \frac{2(1-p_i^5)}{w_i} \quad (10)$$

$$w_i = (2 - 3p_i + 3p_i^5 - 2p_i^6) \quad (11)$$

$$p_i = (1 - \varepsilon_i)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

$$P e_i = \frac{u_i \cdot d_{g i}}{D i f_{P M}} \quad (13)$$

Il termine relativo ai fenomeni di ritenzione per intercettazione è espresso come:

$$\eta_{R i} = 1,5 \cdot N r_i^2 \cdot \frac{[g(\varepsilon_i)]^3}{(1+N r_i)^{s_i}} \quad (14)$$

$$N r_i = \frac{d_{P M}}{d_{g i}} \quad (15)$$

$$[g(\varepsilon_i)]^3 = \frac{\varepsilon_i}{2 - \varepsilon_i - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon_i)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon_i)^2} \quad (16)$$

$$s_i = \frac{3 - 2\varepsilon_i}{3\varepsilon_i} \quad (17)$$

Infine, il termine afferente ai fenomeni inerziali è calcolato come:

$$\eta_{I i} = \frac{S t_i^2}{(S t_i + 0,25)^2} \quad (18)$$

$$S t_i = \frac{C u \cdot \rho_{P M} \cdot u_i \cdot d_{P M}^2}{18 \cdot \mu \cdot d_{g i}} \quad (19)$$

$$Cu = 1 + \frac{2\lambda}{d_{PM}} \cdot \left(1,23 + 0,41e^{-0,88} \cdot \frac{d_{PM}}{2\lambda} \right) \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{\mu}{\sqrt{\frac{2P\rho_{gas}}{\pi}}} \quad (21)$$

Mediante le espressioni su esposte si stima quindi la variazione della dimensione dei grani del filtro nel tempo, dovuta alla deposizione delle polveri all'interno dei vari strati filtranti (espressione 6). Da ciò dipende la porosità (7) e in ultima analisi la permeabilità degli stessi strati, espressa come:

$$k_i = k_o \cdot \left(\frac{d_{gi}}{d_{go}} \right)^2 \cdot \frac{\left[2 - \varepsilon_i - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon_i)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon_i)^2 \right]}{\left[2 - \varepsilon_0 - \frac{9}{5}(1 - \varepsilon_0)^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{5}(1 - \varepsilon_0)^2 \right]} \cdot \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_i} \quad (22)$$

Per la stima delle perdite di carico in fase di esercizio, considerando simultaneamente i processi di occlusione dei pori e della formazione dello strato di polveri, si utilizza quindi la seguente espressione:

$$\Delta p_{tot} = \frac{\mu \cdot Q}{2V} \cdot (\alpha + w_s)^2 \cdot \left[\frac{w_s}{k_{eff} \cdot \alpha} + \frac{1}{2k_c} \cdot \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 2w} \right) + \frac{4FL^2}{3} \cdot \left(\frac{1}{(\alpha - 2w)^4} + \frac{1}{\alpha^4} \right) \right] \quad (23)$$

Adottando quindi un doppio ciclo iterativo sugli strati filtranti della parete del filtro e in funzione del tempo, si ricavano dal modello gli andamenti della perdite di carico e dell'efficienza di ritenzione del particolato, in base ai dati di input immessi nel sistema.

Nell'allegato B è riportato il programma di calcolo, sviluppato in MatLab R7.0, relativo alla procedura su descritta.

In base alla collaborazione tra ENEA e Di.I.In., il modello è stato inoltre ulteriormente implementato e migliorato da parte dell'Università di Salerno, ai cui testi si rimanda quindi per le verifiche e la rappresentazione dei risultati.

Si è quindi optato per una seconda opzione, con il generatore montato al di sotto della zona di montaggio del filtro (Figura 27) di modo da poter investire completamente il filtro con le microonde, durante la fase di rigenerazione.

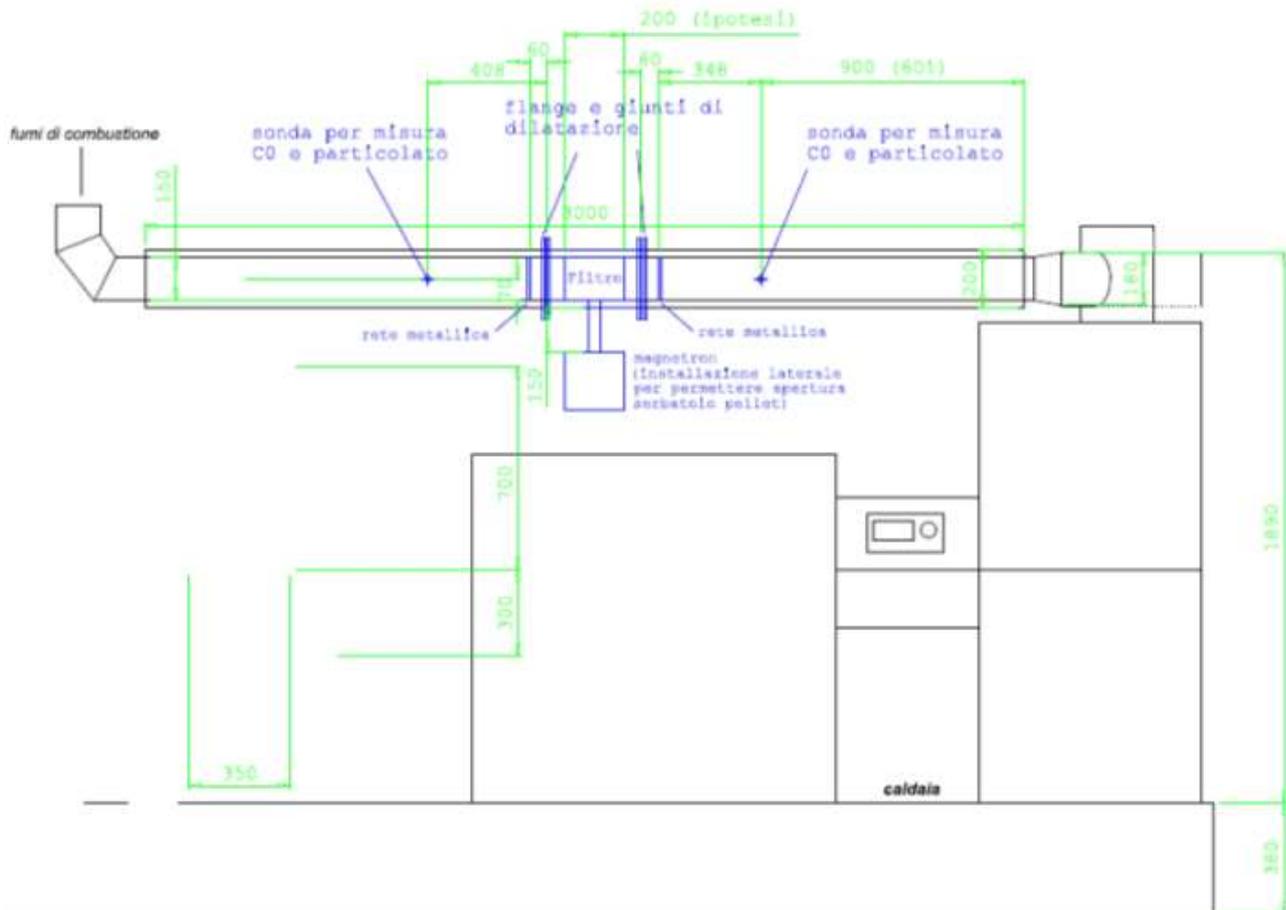


Figura 27. Secondo schema di progettazione della linea sperimentale per rigenerazione con microonde

La collocazione del microonde al di sotto e perpendicolarmente al filtro garantisce una migliore distribuzione del campo di microonde su tutta la superficie del filtro, permettendo quindi un innalzamento omogeneo della temperatura su tutto il monolite e, in linea teorica, favorendo in questo modo una completa rigenerazione del filtro stesso.

Si è quindi proceduto ad analizzare la fattibilità tecnica dell'idea progettuale di Figura 27. Innanzitutto è emersa immediatamente la necessità di "esporre" quanto più possibile il filtro direttamente alle microonde. Il materiale con cui è realizzata la canna fumaria funzionerebbe di fatto da schermo per le microonde, le quali non sarebbero quindi in grado di investire il filtro. La possibilità di rimuovere parte della canna fumaria richiede quindi la necessità di realizzare una porzione speciale che, da una parte, garantisca la corretta evacuazione dei fumi di combustione e, dall'altra, non funga da ostacolo alla rigenerazione del monolite mediante microonde.

Da un punto di vista teorico questa soluzione può/risulta essere percorribile anche perché, da analisi preliminari realizzate a tal fine, il materassino intumescente Interam (3M – Italia), impiegato come guaina di alloggiamento del monolite all'interno della canna fumaria, risulta sufficientemente trasparente alle microonde. I dati preliminari evidenziano infatti che si avrebbe, data la sola presenza del materassino intumescente, una perdita del 25% della potenza del campo di microonde per assorbimento. E' possibile ipotizzare comunque che la quota restante della potenza del campo (circa il 75%) sia sufficiente a raggiungere le temperature necessarie per la rigenerazione del filtro. Inoltre, l'eventuale riscaldamento del materassino intumescente per assorbimento del campo elettromagnetico è da considerarsi un supporto al mantenimento delle temperature raggiunte a livello del filtro. Il layout proposto prevede quindi l'eliminazione di una porzione

idonea di canna fumaria mantenendo tuttavia la presenza di Interam come guaina per il monolite, con in più la funzione di guarnizione per evitare la fuoriuscita dei fumi di combustione.

Un ulteriore problema tecnico, dovuto alla presenza del filtro in canna fumaria, è dato dalle maggiori perdite di carico (Δp). L'adozione di sistemi di aspirazione aggiuntivi nella linea di derivazione dei fumi utilizzata quest'anno porta ragionevolmente a concludere che in condizioni normali di utilizzo della caldaia, non sia possibile garantire, per tutto il corso di una prova sperimentale, le condizioni di depressione necessarie al suo corretto funzionamento (tiraggio). Si è ritenuto preliminarmente possibile ovviare a questo problema mediante un by-pass manuale dei fumi, così da poterli deviare in caso di eccessive perdite di carico (Figura 28). Questa soluzione risulterebbe tuttavia limitante: la posizione del by-pass manuale sarebbe infatti distante dalla zona di controllo degli analizzatori, e inoltre l'apertura del by-pass nel corso di una prova sperimentale terminerebbe la possibilità di acquisire dati utili alla caratterizzazione del funzionamento del filtro catalitico.

L'impossibilità di implementare un sistema automatico che garantisca permanentemente il corretto funzionamento della caldaia e la necessità di acquisire i dati operativi del filtro in continuo, rende al momento poco perseguibile l'installazione in canna fumaria del filtro catalitico.

La centralità della caratterizzazione delle prestazioni del filtro durante la rigenerazione con microonde ha pertanto portato ad ipotizzare l'installazione del filtro in una nuova linea di derivazione (Figura 29 e 30). L'impiego di una linea di derivazione garantisce infatti il mantenimento, grazie all'uso di pompe dedicate, del flusso di fumi attraverso il monolite filtrante, nonché la possibilità di realizzare un alloggiamento per il filtro che sia meglio compatibile con la rigenerazione a microonde.

Partendo dai dati relativi alle perdite di carico ottenuti nel corso della presente annualità, si potrà studiare in condizioni facilmente controllabili l'efficacia della rigenerazione del filtro catalitico mediante microonde. I dati acquisiti ad oggi garantiscono l'efficienza di abbattimento da parte del monolite del particolato fine ed ultrafine generato da processi di combustione, ma risultano ancora da comprendere i tempi necessari ad una sua completa rigenerazione mediante campo a microonde.

La nuova linea di derivazione prevede l'installazione del dispositivo generante le microonde in posizione coassiale al monolite filtrante (Figura 29) o, in alternativa, in posizione perpendicolare al filtro stesso (Figura 30). La scelta della posizione del magnetron verrà effettuata dopo aver analizzato la propagazione delle onde elettromagnetiche nei due scenari. In entrambe le soluzioni è previsto un punto di campionamento del particolato e del CO direttamente in canna fumaria per poter valutare mediante analizzatori online, in ogni fase sperimentale, la concentrazione di questi inquinanti nei fumi in uscita dalla caldaia e prima del passaggio attraverso il monolite filtrante.

Le due soluzioni sono al momento da ritenersi equivalenti; entrambe mostrano difatti alcuni vantaggi e svantaggi di installazione. La soluzione con il magnetron posto in posizione coassiale al filtro permetterebbe di investire in modo ottimale la superficie filtrante con il campo elettromagnetico, tuttavia la distanza tra il magnetron e il monolite potrebbe determinare una dissipazione dell'energia del campo e quindi una minore efficienza di rigenerazione. La soluzione con il magnetron posto perpendicolarmente al filtro faciliterebbe il processo di rigenerazione grazie alla prossimità tra la sorgente delle onde elettromagnetiche e il monolite; tuttavia restano valide le considerazioni fatte in precedenza per la simile installazione lungo la canna fumaria (Figura 27), riguardanti la progettazione del sistema di alloggiamento del monolite che non deve funzionare da schermo per le onde del campo elettromagnetico. Per entrambe le soluzioni sarà comunque importante studiare il sistema di connessione tra la guida d'onda e la linea di derivazione, in modo da garantire il corretto indirizzamento delle microonde verso il monolite da rigenerare, ed evitare la dispersione accidentale del campo elettromagnetico.

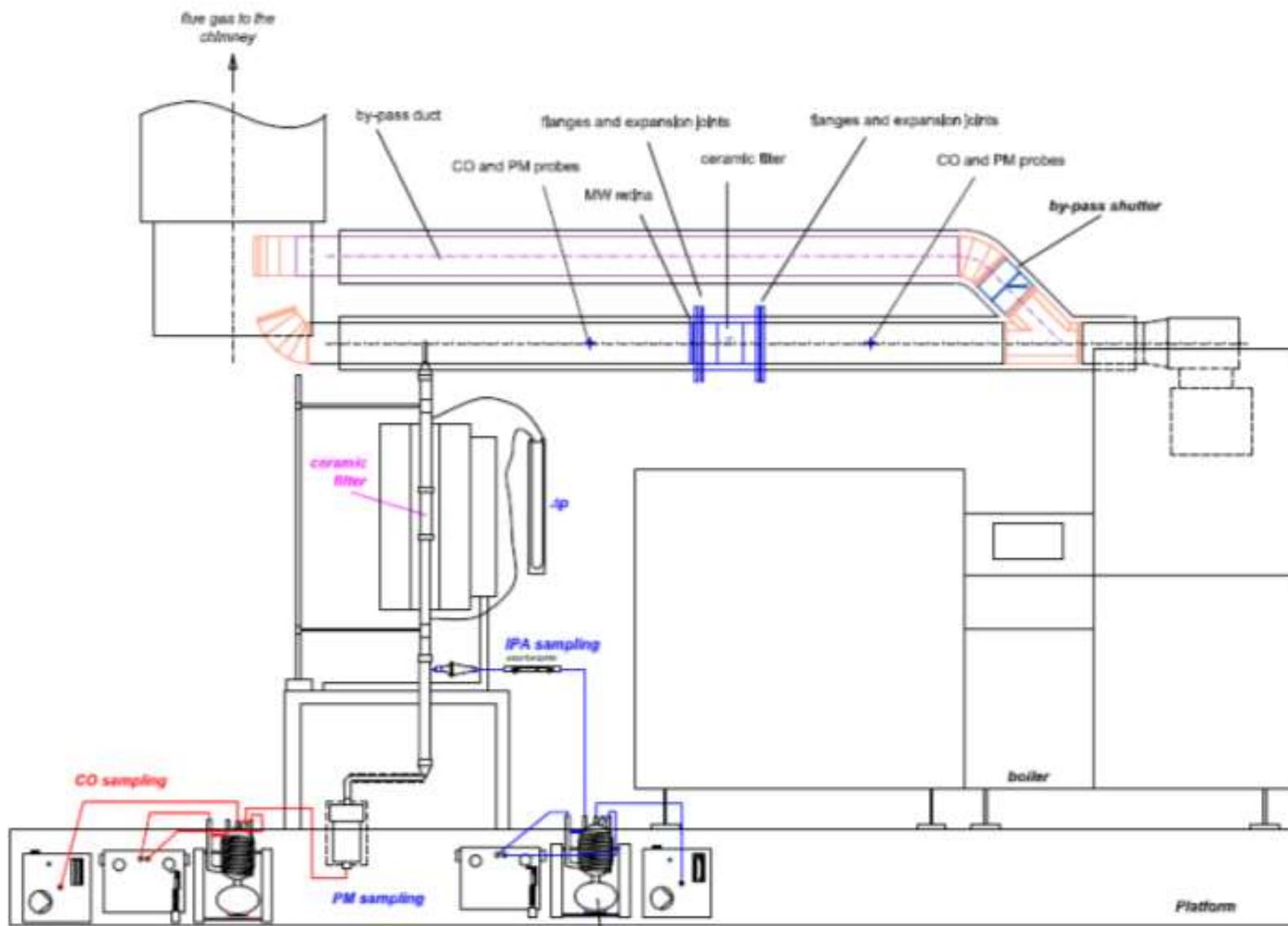


Figura 28. Sistema di campionamento con alloggiamento del filtro catalitico in canna fumaria e derivazione mediante by-pass manuale dei fumi di combustione

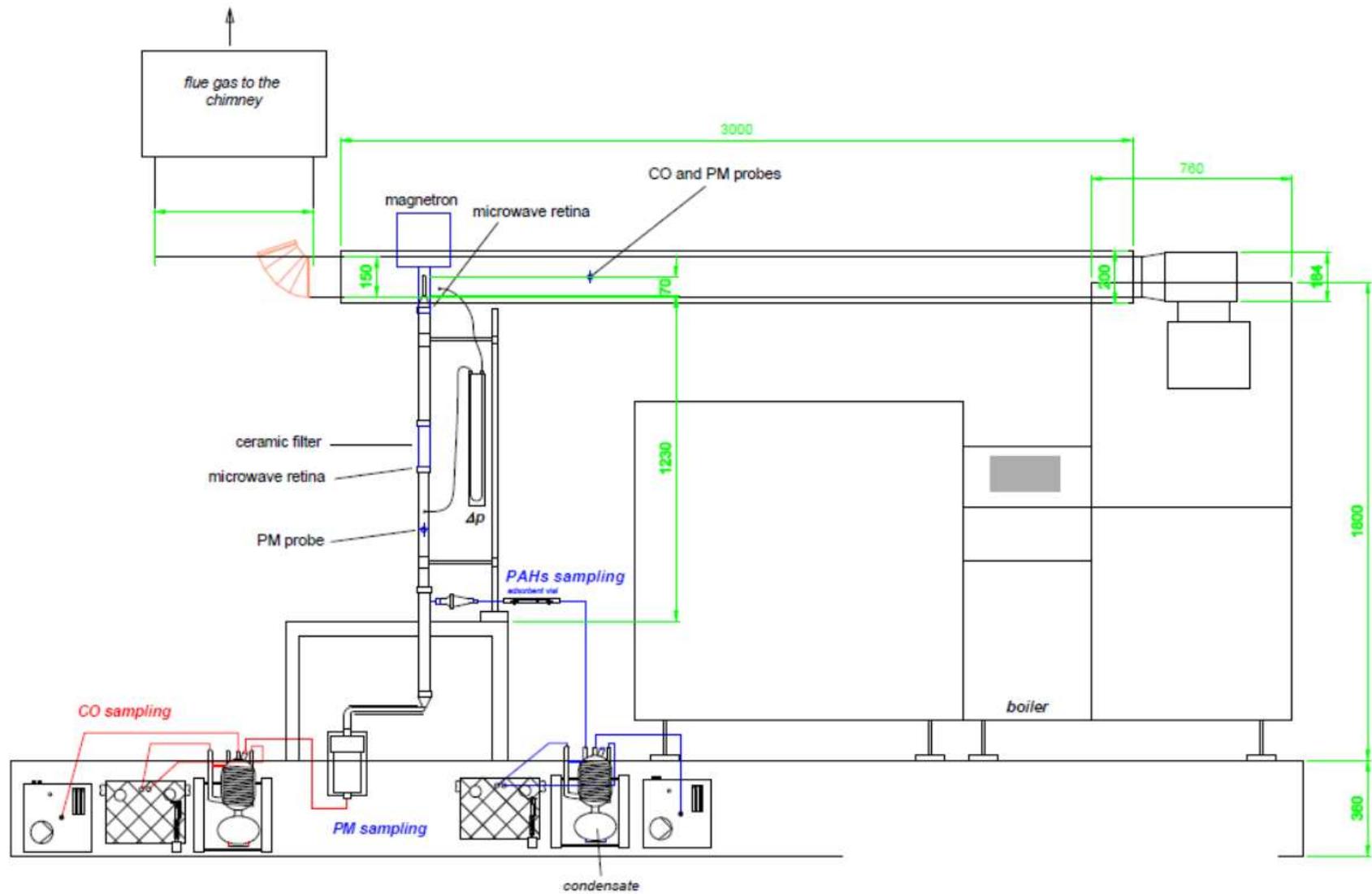


Figura 29. Schema del sistema di campionamento mediante linea di derivazione, con magnetron posto in posizione coassiale al monolite filtrante

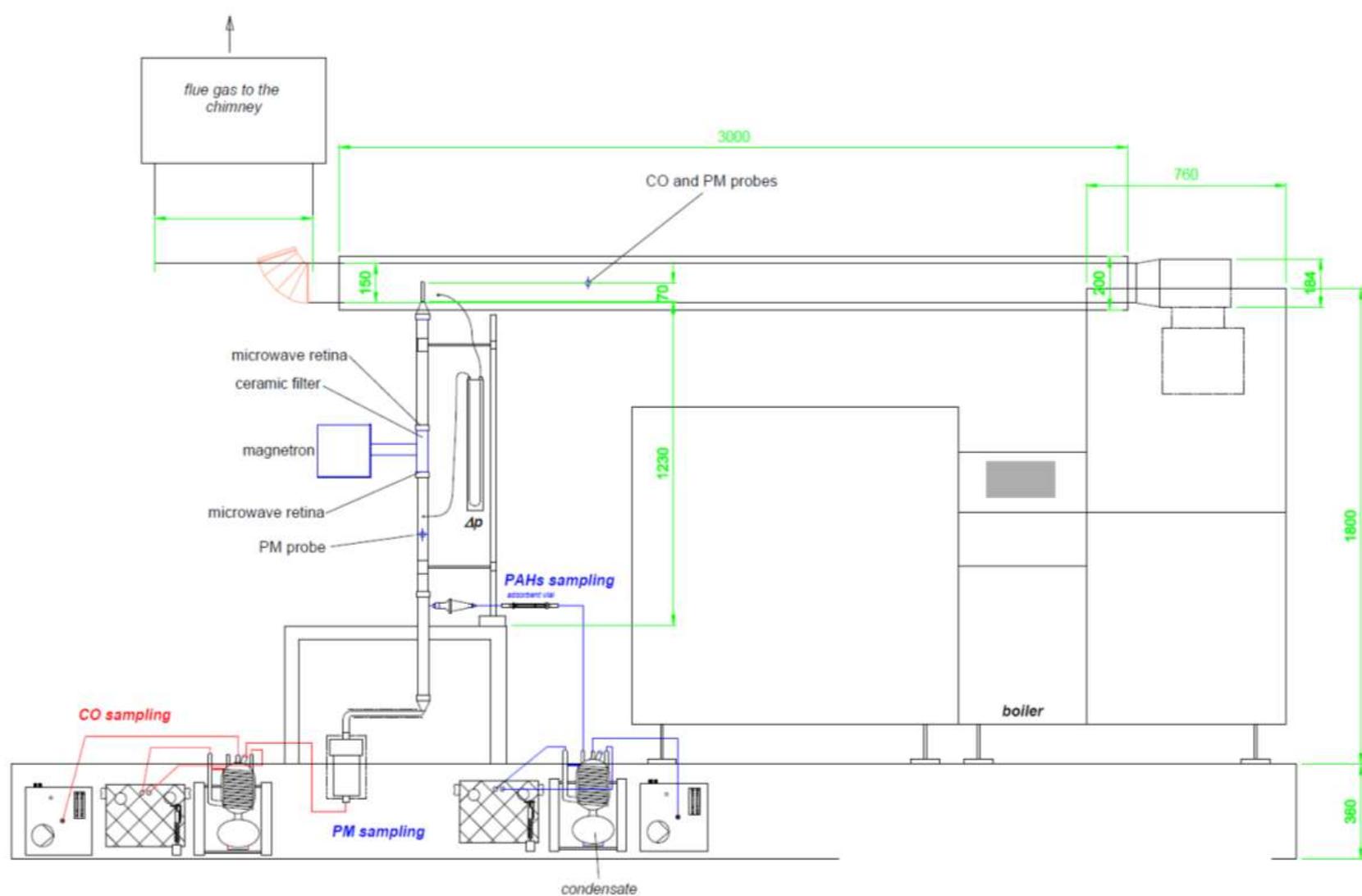


Figura 30. Schema del sistema di campionamento mediante linea di derivazione, con magnetron posto in posizione ortogonale al monolite filtrante

3 Conclusioni

L'attività di ricerca relativa alla seconda annualità del Piano Triennale 2012 – 2014 si è svolta, per quanto concerne il sub Obiettivo 3: "Prototipi da laboratorio di sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) e di composti organici presenti nelle emissioni gassose", come naturale prosecuzione della precedente, ossia protraendo l'indagine sull'utilizzo della tecnologia di filtrazione catalitica di tipo *wall flow* per l'abbattimento delle emissioni di particolato e di altri inquinanti gassosi derivanti dalla combustione di biomassa solida.

Appurata, infatti, durante il primo anno, l'efficacia di tale sistema nell'abbattimento delle concentrazioni di particolato presente nei fumi di combustione, e verificata la possibilità di rigenerazione dei filtri mediante azione catalitica, il lavoro di ricerca si è concentrato quest'anno sullo studio di alcuni parametri di esercizio e sull'analisi delle caratteristiche dei filtri per un loro corretto utilizzo in sistemi di combustione a biomassa. Pur essendo la tecnologia presa in esame già ampiamente studiata in campo motoristico per applicazioni sui motori diesel, esistono difatti sostanziali differenze nel caso di un suo impiego in impianti fissi alimentati a combustibili solidi, soprattutto in termini di perdite di carico massime accettabili, temperature di lavoro, caratteristiche delle correnti gassose, frequenza dei cicli di filtrazione/rigenerazione.

Attraverso la collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.I.In.) dell'Università di Salerno, precursore degli studi sulla tecnologia di filtrazione *wall flow*, e avvalendosi del prezioso contributo di FN S.p.A. per l'analisi e la caratterizzazione dei materiali ceramici utilizzati, ENEA ha dunque condotto un'importante indagine sperimentale su prototipi da laboratorio di filtri catalitici *wall flow*, al fine di investigare principalmente i seguenti aspetti:

1. effetto della deposizione del catalizzatore sulle perdite di carico e sull'efficienza di ritenzione del particolato in fase di esercizio
2. effetto della variazione delle dimensioni dei pori del materiale filtrante sulle perdite di carico e sull'efficienza di ritenzione del particolato
3. comportamento dei filtri in funzione della velocità superficiale dei fumi e del carico di particolato
4. attività catalitica dei filtri in relazione alla temperatura di attivazione, alla velocità spaziale (rispettivamente per PM e CO) e alla velocità superficiale dei fumi (tempo di residenza del gas)
5. scelta della percentuale ottimale in massa di catalizzatore da impregnare sul filtro
6. prove di rigenerazione di filtri già utilizzati
7. durata massima dei filtri in fase di esercizio

In relazione ai punti su indicati, le prove sperimentali effettuate hanno dunque prodotto i seguenti risultati e spinto verso le seguenti considerazioni:

1. La deposizione delle varie percentuali in massa di catalizzatore sui filtri, pur provocando una diminuzione della porosità e della dimensione dei pori, non comporta differenze sostanziali sulle perdite di carico in fase di esercizio, le quali risultano pressoché uguali per i casi esaminati nelle stesse condizioni di esercizio (0%, 15%, 20% cat.).

Per tutte le prove effettuate, l'osservazione delle perdite di carico ha fatto registrare un primo periodo in cui il loro andamento risulta essere crescente, lineare ed uniforme, ed un secondo in cui, pur mantenendosi mediamente crescenti e lineari, le perdite di carico sono soggette a repentine fluttuazioni intorno al valore medio (crescente). La distinzione di questi due differenti comportamenti è attribuibile ad un primo fenomeno di filtrazione di massa (parziale occlusione dei pori interni dei filtri), ed ad un seguente meccanismo di filtrazione a superficie ("cake filtration"), con la formazione dello strato esterno di polveri sulla superficie dei filtri. In base a tale supposizione, i dati sperimentali hanno anche permesso la stima della durata della prima fase di filtrazione che, a seconda del carico di particolato, è risultata mediamente compresa tra 40 e 55-60 minuti (rispettivamente per carichi di particolato pari a 52 mg/h e 33,5 mg/h).

Riguardo alle efficienze di ritenzione del particolato (sempre molto alte e superiori almeno al 93,5% per filtri nuovi), si registra un certo incremento al diminuire della percentuale di catalizzatore

impregnata sul filtro (da 97,0% a 99,8%, rispettivamente per 20% e 0% cat.). Tale osservazione potrebbe dipendere dagli shock termici a cui sono sottoposti i filtri nella fase di impregnazione del catalizzatore, con la conseguente formazione di micro fratture all'interno della loro matrice porosa. Il fenomeno si ritiene comunque irrilevante ai fini del corretto utilizzo dei filtri.

2. La variazione della dimensione originaria dei pori dei filtri, effettuata da Di.I.In. attraverso un processo innovativo di corrosione acida controllata, non ha comportato sostanziali vantaggi in termini di riduzione delle perdite di carico o aumento dell'efficienza, avendo di fatto riscontrato gli stessi risultati per le diverse conformazioni. Una possibile spiegazione a tale inaspettato risultato può essere rappresentata dal fatto che l'incremento della dimensione dei pori non è direttamente correlato ad un aumento della porosità aperta dei filtri, reale responsabile della resistenza al passaggio dei gas.
3. Adottando due diverse modalità di esercizio della caldaia (a basso e ad alto carico di inquinanti), si è potuto constatare che il carico di particolato (rispettivamente pari a 33,5 mg/h e a 52 mg/h nei due casi menzionati) ha poca influenza sulle perdite di carico, per lo meno per i valori presi in considerazione. Infatti, pur essendo le perdite di carico differenti per la diversa velocità superficiale dei fumi nelle due prove, i loro andamenti nel tempo presentano la stessa pendenza (linee pressoché parallele), per cui si può sostenere che, almeno per certi intervalli di concentrazione di PM nei fumi, i filtri assumono lo stesso comportamento in fase di esercizio.
4. Le prove condotte ad alta temperatura (350 °C – 550 °C), rappresentative cioè della fase di rigenerazione dei filtri, hanno mostrato dati di sicuro interesse e meritevoli di ulteriori indagini nel corso della prossima annualità.

Per quanto riguarda il particolato, si è evinto innanzitutto che già a temperature relativamente basse ($T = 370$ °C), con velocità spaziale di circa $5,2 \text{ h}^{-1}$ ($M_{\text{PM}} \sim 52 \text{ mg/h}$; % cat. = 15), il catalizzatore produce un certo effetto di termodistruzione delle particelle organiche, individuato dall'osservazione delle perdite di carico, che, se pur non costanti, risultano minori rispetto al caso di più bassa temperatura ($T = 303$ °C), con lo stesso carico di PM, la stessa percentuale di catalizzatore, e con velocità superficiale dei fumi addirittura minore. Si può confermare quindi per il particolato la relazione diretta tra velocità spaziale e temperatura di attivazione del catalizzatore, verificata anche da ulteriori test a velocità spaziale più bassa ($v_{\text{sp}} = 3,1 \text{ h}^{-1}$) e temperatura di iniziale attivazione ancora minore ($T = 335$ °C). In definitiva, comunque, si può considerare per il solo particolato una temperatura di completa attivazione del catalizzatore pari a 450 °C, per ogni sua percentuale in massa testata.

Discorso sostanzialmente diverso va invece fatto per quanto riguarda l'abbattimento del CO, ossia la capacità dei filtri, in fase di rigenerazione, di eliminare le particelle solide organiche, e contemporaneamente abbattere i composti gassosi (assimilati in questo caso al CO) che eventualmente potrebbero formarsi per via della stessa azione catalitica sulle polveri. In questo caso, infatti, sembra che la velocità superficiale dei fumi, intesa come tempo di residenza dei fumi (e quindi dell'inquinante) a contatto col filtro, rivesta un ruolo maggiore rispetto alla velocità spaziale (rapporto in massa tra inquinante e catalizzatore). Le prove ad alta temperatura hanno infatti dimostrato che se si aumenta la velocità superficiale dei fumi (in questo caso da 0,50 m/s a 0,93 m/s), è necessario incrementare anche la temperatura di attivazione del catalizzatore (da 430 °C a 530 °C) per avere ancora una apprezzabile riduzione della concentrazione di CO, la quale, comunque, non raggiunge i livelli ottenuti a velocità superficiale più bassa, anche in condizioni di carico più favorevoli ($M_{\text{CO}} = 567 \text{ mg/h}$ contro $M_{\text{CO}} = 1243 \text{ mg/h}$ e $v_{\text{sp}} = 42 \text{ h}^{-1}$ contro $v_{\text{sp}} = 93 \text{ h}^{-1}$). I dati sperimentali sembrano quindi indicare la necessità di garantire, nelle condizioni di esercizio esaminate, un tempo di permanenza del gas a contatto col filtro per lo meno pari a 0,25 secondi.

5. Alla luce dei risultati ottenuti mediante l'analisi sperimentale, dovendo al momento necessariamente trascurare gli aspetti legati ai tempi, alle modalità e alle effettive condizioni di rigenerazione dei filtri, si è scelta per essi una percentuale ottimale in massa di catalizzatore pari a 20%.
6. In vista di un'indagine più accurata sulla fase di rigenerazione dei filtri (connessa anche all'utilizzo di un sistema di generazione di micro onde per l'operazione di riscaldamento), durante la presente

annualità si è cercato di ottenere già dei primi risultati, sottoponendo a prove ad alta temperatura (460 °C – 540 °C) prototipi di filtri *wall flow* in precedenza già utilizzati a temperature più basse (T = 170 °C). I dati sperimentali così ottenuti sono poi stati messi a confronto con quelli relativi a prove su filtri nuovi, alle stesse temperature.

I risultati di tale verifica dimostrano in ogni caso un'alta efficienza di termodistruzione delle polveri organiche, per filtri sia nuovi che usati, e per le diverse porosità e dimensioni dei pori considerate.

Per quanto riguarda il CO, invece, è stato osservato un diverso comportamento tra i filtri a porosità originaria e i filtri con dimensione maggiore dei pori: per i primi, le concentrazioni di monossido di carbonio si sono rilevate praticamente le stesse nei casi di filtri nuovi e usati, con una minima maggiore riduzione per i filtri nuovi. Per i filtri, invece, la cui porosità e dimensione dei pori è stata modificata artificialmente, si sono registrate, nel caso dei prototipi già usati, delle concentrazioni di CO anche superiori a quelle ricavate in totale assenza di filtri, facendo quindi presumere processi di ossidazione delle particelle organiche precedentemente adese sulla loro superficie. Tale risultato, tuttavia, come detto, non si riscontra per i prototipi a porosità originaria. Inoltre, per tutti i casi esaminati in questa sessione di prove, l'azione del catalizzatore sulla riduzione di CO nei fumi è risultata molto lieve, probabilmente a causa della eccessiva velocità superficiale dei fumi, di cui si è già discusso in precedenza ($v_s \sim 0,9$ m/s).

7. In base ad alcuni vincoli operativi vigenti all'interno del laboratorio di prova, in virtù delle modalità di esecuzione delle prove sperimentali, e a causa della necessità di raggiungere le condizioni di regime della caldaia prima dell'esecuzione dei test, è stato possibile analizzare il comportamento dei prototipi dei filtri *wall flow* per una durata massima di soli 180 minuti. In condizioni di basso carico di particolato ($M_{PM} = 33,5$ mg/h), ad una temperatura prossima a quella di uscita dei fumi dalla caldaia (T = 170 °C), e con una velocità superficiale dei fumi di circa 0,50 m/s, si sono riscontrate perdite di carico mediamente lineari, crescenti e a pendenza costante per tutta la durata della prova, esibendo le prime fluttuazioni dopo circa 60 minuti (fine della fase di filtrazione di massa). E' quindi presumibile che, nelle stesse condizioni di esercizio, il tempo di saturazione dei prototipi testati, inteso come periodo in cui le perdite di carico continuano a mantenersi lineari, possa essere stimato per lo meno dello stesso ordine di grandezza.

Al fine di verificare tale ipotesi, e quindi di stimare con maggiore accuratezza il tempo massimo di esercizio dei filtri anche in base alle loro caratteristiche geometriche, l'attività di ricerca di quest'anno è stata caratterizzata, oltre che dall'indagine sperimentale fin qui delineata, anche dallo sviluppo di un modello analitico capace di riportare gli andamenti nel tempo delle perdite di carico e delle efficienze di ritenzione del particolato.

Attraverso la determinazione della composizione e del contenuto di umidità della biomassa, individuate le condizioni di funzionamento della caldaia (mediante le concentrazioni di CO₂ e O₂ nei fumi di combustione), nota la temperatura di esercizio dei filtri, definite le caratteristiche della corrente gassosa e delle particelle solide da trattenere, il modello è in grado, come detto, di restituire gli andamenti delle perdite di carico e delle efficienze di ritenzione delle polveri nel tempo, in funzione delle caratteristiche geometriche del filtro. Più in particolare, considerati costanti alcuni dati di input quali la porosità del filtro, la dimensione dei pori, la dimensione di cella e lo spessore di parete, il modello riesce ad ottimizzare la lunghezza dei canali del filtro minimizzando le perdite di carico iniziali (senza cioè l'effetto del particolato), e riporta poi gli andamenti delle grandezze su citate in funzione del diametro prescelto (considerato il filtro di forma cilindrica).

Il modello si propone quindi non solo come strumento di previsione a più lungo termine del comportamento dei prototipi testati, ma anche come valido ausilio in fase di dimensionamento per siffatti sistemi da utilizzare in differenti e/o reali applicazioni.

Oltre alla definizione della procedura analitica, il modello è stato implementato in MatLab R7.0 e, mediante la stretta collaborazione tra ENEA e Di.I.In., è stato di seguito ulteriormente visionato e migliorato, per cui si rimanda ai testi prodotti nell'ambito della stessa attività di ricerca dall'Università di Salerno, per le relative verifiche e la definitiva rappresentazione dei risultati.

Per quanto riguarda il prosieguo dell'attività di ricerca nelle prossime annualità, si ritiene che i maggiori sforzi debbano essere incentrati principalmente sullo studio più approfondito della fase di rigenerazione dei filtri, verificando innanzitutto le prime indicazioni già ottenute quest'anno su temperature, velocità spaziali e tempi di residenza, ma soprattutto indagando maggiormente gli eventuali effetti secondari che l'azione del catalizzatore può produrre sulla composizione dei fumi.

Dal punto di vista ingegneristico, andranno poi definite le modalità e le velocità di riscaldamento dei filtri (mediante sistema di generazione di micro onde) e stabiliti gli adeguati tempi di rigenerazione.

Riguardo quest'ultimo aspetto, già da quest'anno ENEA UTTS ENE ha individuato diverse soluzioni progettuali per la modifica dell'attuale linea sperimentale presente nella Hall Tecnologica THEXAS del CR ENEA di Saluggia, al fine proprio di dotare l'attuale apparato del sistema di generazione di micro onde, e garantire al meglio il suo corretto funzionamento.

In tale operazione, particolare attenzione è stata dedicata alla possibile dispersione delle onde elettromagnetiche e alla loro direzionalità rispetto al posizionamento dei filtri. Inoltre, sono stati considerati differenti aspetti applicativi per facilitare e migliorare la conduzione delle prove in base agli obiettivi di ricerca prefissati.

Riferimenti bibliografici

1. Adler Joerg, "Ceramic diesel particulate filters", Applied Ceramic Technology, 2 [6], 2005, 429 - 439
2. Bensaid S., Marchisio D.L., Fino D., Saracco G., Specchia V., "Modelling of diesel particulate filtration in wall flow traps", Chemical Engineering Journal 154 (2009), pp. 211 – 218.
3. Hasler Ph., Nussbaumer Th., "Particle size distribution of the fly ash from biomass combustion", Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, June 8 – 11, 1998, Wurzburg (Germany)
4. Knoth J.F., Drochner A., Vogel H., Gieshoff J., Kogel M. Pfeifer M., Votsmeier M., "Transport and reaction in catalytic wall flow filters", Catalysis Today 105 (2005), pp. 598 – 604
5. Konstandopoulos A. G., Skaperdas E., Warren J., Allansson R., "Optimized filter design and selection criteria for continuously regenerating diesel particulate traps", International Congress and Exposition Detroit, SAE Technical Paper Series, 1999 – 01 – 0468.
6. Konstandopoulos A. G., Skaperdas E., Kostoglou M., Papaioannou E., Zarvalis D., Kladopoulou E., "Fundamental studies of particulate filters: transient loading, regeneration end aging", World Congress Detroit, SAE Technical Paper Series, 2000 – 01 – 1016.
7. Lee K.W., Mukund R., "Filter Collection, Aerosol Measurement Principles, Techniques and Applications", 2nd ed., Wiley Interscience inc., 2001.
8. Masoudi Mansour, "Pressure drops of segmented diesel particulate filters", World Congress Detroit, SAE Technical Paper Series, 2005 – 01 – 0971.
9. Palma V., Russo P., Matarazzo G., Ciambelli P., "Microwave improvement of catalyst performance in soot oxidation without additives", Applied Catalysis B: Environmental 70 (2007) 254–260.
10. Seville J.P.K., "Gas cleaning in demanding applications", Blackje Academic & Professional (in print of Chapman and Hall), 1997.
11. Tandon P., Heibel A., Whitmore J., Kekre N., Chithapragada K., "Measurements and prediction of filtration efficiency of soot loaded diesel particulate filters", Chemical Engineering Science, 65 (2010) pp. 4751 – 4760
12. UNI EN 303-5:2012, "Caldaie per combustibili solidi, con alimentazione manuale e automatica, con una potenza termica nominale fino a 300 kW".

ALLEGATO A: Procedura di prova sperimentale per prototipi da laboratorio di filtri tipo wall flow

Procedura di prova per filtri catalitici tipo *wall flow* in scala di laboratorio, testati in colonna di derivazione dei fumi, allo scarico di una caldaia alimentata con pellet di legno

1. Pulizia camera di combustione

La camera di combustione è pulita a caldaia spenta e a freddo (almeno 15h dopo l'ultimo utilizzo della caldaia stessa). Per pulizia si intende la rimozione delle polveri e delle ceneri rimaste adese alle pareti della camera di combustione e/o depositate sugli organi presenti al suo interno, quali il braciere rotante, il sensore di livello delle braci, il disco di immissione dell'aria secondaria, il piatto superiore del braciere, il collettore della coclea di alimentazione, etc. E' sufficiente far ricadere le polveri e le ceneri sul fondo della camera di combustione, dove è presente il sistema di scarico delle ceneri verso il serbatoio esterno. Per tali operazioni sono utilizzate una spazzola e un'aspirapolvere, a cui andranno regolarmente sostituiti i filtri. E' altresì consigliabile effettuare la pulizia mantenendo acceso il sistema di aspirazione fumi dalla caldaia, in modo da convogliare eventuali particelle fini sollevate verso la canna fumaria.

La pulizia della camera di combustione prevede inoltre il controllo dell'eventuale presenza di incrostazioni (ceneri fuse) sulla superficie del braciere, Qualora queste fossero presenti, vanno rimosse con l'ausilio di uno strumento a punta di adeguata durezza.

Le operazioni di pulizia della camera di combustione vanno effettuate prima di ogni singola prova sperimentale, in maniera tale che il processo di combustione, lo scambio termico e la corretta alimentazione del combustibile al braciere risultino identici per ognuna di esse, evitando in tal modo che le diverse condizioni di esercizio dell'impianto possano produrre differenze anche tra i risultati sperimentali, non riconducibili in tal caso alla diversa scelta da parte dell'operatore dei parametri di funzionamento della caldaia.

I dispositivi di protezione individuale (DPI) necessari per l'operazione di pulizia della camera di combustione sono: mascherina antipolvere FFP3, guanti in pelle, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

2. Carico pellet

Il pellet è caricato nel serbatoio della caldaia prima dell'inizio di ogni prova, a caldaia spenta e a freddo. L'operazione è condotta manualmente, trasportando un sacco di pellet alla volta (max 15 kg) fino a riempire il serbatoio del combustibile necessario per una singola prova. Qualora lo si ritenesse opportuno, si può prevedere il trasporto del pellet (un sacco alla volta) anche con carrello per movimentazione carichi.

Alla fine dell'operazione di carico del combustibile, il serbatoio della caldaia va tenuto chiuso per l'intera durata della prova.

I dispositivi di protezione individuale (DPI) necessari per l'operazione di carico del pellet sono: guanti in pelle, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

3. Apertura ricircolo dell'acqua in caldaia

Per ricircolo dell'acqua si intende in questo caso il sistema di by-pass presente sulla tubazione di ritorno del circuito idraulico della caldaia, realizzato mediante una valvola a tre vie a regolazione manuale. Prima dell'accensione della caldaia, tale valvola va parzialmente aperta in maniera che solo una parte della portata costante di acqua (inizialmente fredda) passi effettivamente attraverso il circuito interno alla caldaia. In tal modo si tende ad evitare che nelle fasi iniziali di esercizio dell'impianto, quando la temperatura dell'acqua è ancora troppo bassa, si produca la condensazione dei fumi a contatto con i tubi di scambio termico, provocando la conseguente deposizione di aerosols (anche corrosivi) sulla loro superficie.

4. Accensione e controllo della pompa dell'acqua

Dal quadro elettrico presente nella Hall Tecnologica si aziona la pompa del circuito idraulico e la si regola agendo sui pulsanti presenti sulla pompa stessa. Dagli asimetri presenti sulla tubazione di mandata dell'acqua si controlla che la portata sia all'incirca 1,8 l/s.

5. Accensione e regolazione dell'aria comburente e dell'aspirazione fumi

Dal quadro elettrico presente nella Hall Tecnologica si aziona l'erogazione dell'aria comburente (aria insufflata all'interno della Hall) e se ne regola la temperatura ($T_{\max} = 22^{\circ}\text{C}$) agendo sul relativo display.

Si aziona inoltre l'aspirazione dei fumi e la si regola con la manopola posta al centro del quadro elettrico. Tale operazione è condotta controllando che il tiraggio in canna fumaria, visualizzato dal sistema di analisi dei gas (rack), risulti pari al valore desiderato.

6. Regolazione settaggio caldaia (orario pulizia)

Dal display della caldaia (acceso automaticamente in virtù dell'azionamento dell'aria comburente e dell'aspirazione fumi) si inserisce il codice (235) nell'opzione del menu a tendina "livello specialisti" e si eseguono in seguito le varie regolazioni della caldaia (concentrazione di ossigeno, depressione in caldaia, livello combustibile, aria primaria e secondaria, sonda lambda, T caldaia, etc.).

Si regola e controlla l'orario di pulizia automatica della caldaia (durante la quale la caldaia si arresta automaticamente).

7. Accensione caldaia

Dal menu a tendina del display della caldaia si inserisce ON nell'opzione "impianto ON/OFF".

8. Apertura forno, estrazione filtro, pulizia colonna di derivazione e ugello

Il forno tubolare posto lungo la linea sperimentale di campionamento va aperto assicurandosi preventivamente che sia spento e freddo. Si rimuovono quindi le coperture in lana di vetro poste all'estremità di esso e lo si sposta leggermente (il forno è dotato di rotelle), in maniera da lasciare libera la colonna di derivazione.

Si svita la parte centrale della colonna, contenente al suo interno il filtro catalitico, e si puliscono mediante getti di aria compressa le altre parti, incluso l'ugello inserito nella canna fumaria per il prelievo della portata campionaria dei fumi.

La parte centrale della colonna, con ancora il filtro catalitico al suo interno, viene trasportata nel locale laboratorio di supporto, dove il filtro viene rimosso con cautela al fine di evitarne la rottura.

Per le operazioni su descritte, i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

9. Inserimento filtro nella colonna di derivazione

Si ripulisce la parte di colonna contenente il filtro catalitico e se ne inserisce all'interno uno nuovo, avvolto da un materassino intumescente tagliato a misura (mediante taglierino) ed eventualmente da nastro in teflon.

10. Chiusura e copertura estremità del forno

Si riavvita la parte centrale della colonna di derivazione alle restanti due parti, controllando attentamente la tenuta dei filetti. Si riposiziona e si richiude il forno tubolare in maniera tale che la colonna di derivazione risulti al centro di esso. Si ricoprono infine le sezioni aperte del forno con materiale in lana di vetro, in modo da evitare moti convettivi dell'aria all'interno di esso.

Per tali operazioni i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

11. Montaggio filtri in fibra di vetro per prove con aria

Sul filtro catalitico montato all'interno della colonna di derivazione sono inizialmente eseguite delle prove preliminari con aria, la quale viene convogliata all'interno della stessa colonna mediante la pompa di aspirazione posta a valle della linea di campionamento. Tale operazione mira a verificare le perdite di carico iniziali e strutturali del filtro catalitico, e a provvedere alla completa adesione del materassino intumescente alle pareti interne della colonna. A monte e a valle della colonna si montano quindi due filtri in fibra di vetro di cui il portafiltro inferiore è collegato alla pompa di aspirazione mediante un raccordo di silicone.

Per tali operazioni i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

12. Accensione frigoriferi

Si accendono i frigoriferi che provvedono alla circolazione e al raffreddamento dell'acqua per il condizionamento dei gas campionati. Si controlla che nel serbatoio degli stessi ci sia acqua a sufficienza.

13. Accensione forno tubolare e fasce scaldanti

Si accendono le fasce scaldanti poste intorno alla colonna di derivazione e si aziona il termostato del forno tubolare settando la temperatura di riscaldamento a 300°C. Si mantiene tale temperatura nel forno per circa 60 minuti e in seguito si regola nuovamente su valori uguali a quelli registrati in canna fumaria per la temperatura dei fumi.

Per tale operazione i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

14. Controllo acqua nel manometro a colonna

Si controlla che il livello dell'acqua all'interno del manometro ad U sia vicino allo zero e che tale livello risulti pari sui due bracci del manometro. Qualora fosse necessario aggiungere acqua, tale operazione la si esegue utilizzando una delle pipette presenti nel locale laboratorio di supporto, riempita con acqua distillata.

15. Prove di aspirazione con aria

Si aziona la pompa di aspirazione collegata preventivamente al portafiltro inferiore in acciaio e si regola la portata di aria in maniera tale che la velocità superficiale del filtro sia pari a quella prevista per le successive prove di filtrazione dei. Si misurano, tramite il manometro a colonna d'acqua ad U, le perdite di carico del filtro ogni 3 minuti, per in periodo complessivo di 15-20 minuti. Si spegne quindi la pompa di aspirazione e si rimuovono i filtri in fibra di vetro posti a monte e a valle della colonna.

Per tale operazione i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

16. Chiusura ricircolo acqua in caldaia

Si arresta il by-pass della portata di ritorno dell'acqua in caldaia, chiudendo la valvola a tre vie. Nell'eseguire tale operazione, si controlla dal display della caldaia che la temperatura dell'acqua sia per lo meno superiore a 55°C.

17. Pesatura filtri impattore

All'interno del locale laboratorio di supporto si pesano i filtri da inserire nell'impattore per il campionamento del particolato. Essi sono costituiti da tre filtri in alluminio ingrassato e da un filtro in fibra di vetro. Quest'ultimo va tenuto all'interno di un essiccatore a gel di silice per almeno 24 ore, prima della sua pesatura. L'operazione di pesatura dei filtri è eseguita mediante la bilancia di precisione presente nel suddetto locale, per la quale è necessario aspettare qualche decina di secondi affinché l'indicatore del peso ritorni a zero alla fine di ogni misurazione.

Tale operazione è quindi condotta contemporaneamente al montaggio dell'impattore, che avviene secondo le indicazioni fornite nel manuale d'istruzioni.

18. Inserimento impattore nella linea di campionamento

Una volta montato, l'impattore è inserito lungo la linea di campionamento a valle della terminazione finale della colonna di derivazione dei fumi, utilizzando l'apposito cavalletto. L'impattore è quindi avvolto nel proprio cappotto riscaldante, collegato a sua volta al termostato.

19. Collegamento raccordi in silicone

Si collegano le varie parti della linea di campionamento utilizzando dei raccordi in silicone ricoperti di materiale coibente. Più precisamente, si collega la sonda di aspirazione della portata campionaria dei fumi alla parte superiore della colonna di derivazione e l'impattore alla parte inferiore. Si risistemano inoltre le fasce scaldanti intorno alle parti in metallo della linea, esterne al forno tubolare.

Per tali operazioni i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

20. Montaggio linea di campionamento degli IPA

La linea di campionamento degli IPA è composta da un portafiltro in acciaio contenente un filtro piano in fibra di vetro, una fiala ad adsorbimento del tipo X-AD₂, un condensatore immerso in acqua raffreddata e una pompa di aspirazione. Tali componenti sono uniti nell'ordine menzionato mediante raccordi in silicone, e quindi collegati alla colonna di derivazione dei fumi a valle del filtro catalitico, attraverso l'apposito ugello.

In seguito al montaggio di tali componenti, si verifica il funzionamento del frigorifero per l'acqua del condensatore e si regola la pompa di aspirazione (preventivamente staccata dalla colonna di derivazione dei fumi), affinché sia prelevato un flusso di gas pari a 2 NL/min.

Si ricollega quindi la stessa linea alla colonna di derivazione dei fumi e si annota il volume di gas campionato visualizzato sul contatore volumetrico della pompa.

21. Accensione cappotto impattore

Si aziona il termostato che regola la temperatura del cappotto riscaldante dell'impattore (200°C), seguendo attentamente le istruzioni del manuale.

22. Controllo del sistema di raffreddamento dell'acqua

Il sistema di raffreddamento dell'acqua avviene automaticamente tramite una valvola di regolazione e miscelazione delle portate, e mediante l'azionamento delle torri di raffreddamento esterne alla Hall. Il suo corretto funzionamento è verificato dall'osservazione diretta della valvola di miscelazione, e attraverso il display posto sul quadro elettrico, il quale restituisce il valore della temperatura dell'acqua di mandata della caldaia (costante in caso di corretto funzionamento del sistema).

23. Accensione analizzatori gas, sistema di acquisizione dati e computer

Il sistema di campionamento dei gas è azionato lasciando inizialmente libera la sonda di prelievo, in maniera da verificare il corretto funzionamento degli analizzatori con aria. A seguito della loro completa messa in esercizio (dopo circa 60 minuti), si procede ad una ulteriore calibratura degli strumenti (per CO e CO₂) eseguita ancora con aria o con bombole di gas tecnici (a concentrazione prescelta). Si controlla e si regola il flusso di gas che attraversa gli analizzatori ad un valore di portata pari a circa 2 NL/min.

24. Regolazione della pompa di aspirazione dell'impattore

Prima di collegare la pompa di aspirazione dei fumi all'uscita dell'impattore, se ne regola la portata agendo sul display di regolazione automatica, in maniera da avere all'interno dell'impattore un flusso costante di 10 l/min (a circa 200°C). Se necessario, si verifica il corretto funzionamento della pompa e la correttezza delle impostazioni fissate, azionandola prima con aria.

25. Trascrizione del volume iniziale di campionamento

Dal contatore volumetrico della pompa di aspirazione dell'impattore si annota il volume di gas misurato, prima dell'inizio della prova. Si collega quindi la pompa all'uscita dell'impattore tramite raccordo in silicone.

26. Apertura file di acquisizione e controllo dati di input

Dal computer collegato al sistema di acquisizione si apre il file di elaborazione e registrazione dei dati e si controllano i dati iniziali di input. Si controlla inoltre la corretta misurazione delle temperature dei fumi e del filtro catalitico.

27. Controllo strumentazione e analizzatori gas

Si controlla che tutte le sezioni della linea sperimentale siano collegate tra loro (tranne la sonda di prelievo dei gas agli analizzatori del rack), che tutti i dispositivi di riscaldamento siano in funzione, che la caldaia stia funzionando regolarmente (in base alla impostazioni fissate e alla massima potenza), che l'impattore e il sistema di campionamento/raffreddamento della portata campionaria siano montati regolarmente, che gli analizzatori dei gas funzionino correttamente. Se necessario, si provvede ad una nuova calibrazione degli strumenti.

28. A T_{fumi} = cost, inserimento sonda di campionamento gas, azionamento pompe e inizio acquisizione dati

Quando dal display della caldaia (o dal file di acquisizione dati) si osserva che l'andamento della temperatura dei fumi non è più crescente (dopo circa 5 ore dall'accensione della caldaia) ma relativamente costante (condizione di regime della caldaia), si inserisce la sonda di prelievo degli analizzatori del rack alla sommità del condensatore (linea di campionamento del CO), si azionano la pompe di aspirazione per l'impattore e per il campionamento degli IPA, e contemporaneamente si avvia l'acquisizione dei dati dal computer.

29. Annotazione dell'orario iniziale di campionamento

30. Controllo dei flussi di aspirazione delle pompe e del rack durante la prova

Durante la prova, per via del continuo aumento delle perdite di carico del filtro catalitico e dell'impattore, si può avere un discostamento dei valori delle portate campionarie dei fumi rispetto a quelli prescelti per le aspirazioni, che quindi vanno tenuti sotto controllo. Inoltre, bisogna evitare che si verifichino infiltrazioni d'aria lungo le linee di campionamento e di derivazione dei fumi.

31. Annotazione perdite di carico

Ogni 5 minuti circa, si annota manualmente la misura delle perdite di carico del filtro catalitico (mm H₂O), restituita dal manometro a colonna d'acqua ad U.

32. Arresto acquisizione dati e aspirazione pompe

Al termine della prova, si arrestano contemporaneamente le pompe di aspirazione dei fumi per l'impattore e per il campionamento degli IPA, si stacca la sonda di aspirazione del rack dal condensatore e si interrompe l'acquisizione dei dati dal computer.

33. Annotazione orario e volume finale di campionamento

Si annota manualmente l'orario di arresto delle pompe di aspirazione e i rispettivi valori di volume campionato, indicato sui contatori volumetrici..

34. Spegnimento forno tubolare, fasce scaldanti e cappotto di riscaldamento dell'impattore

35. Spegnimento frigoriferi

36. Scollegamento e trasporto dell'impattore nel laboratorio di supporto

Una volta spenti tutti i sistemi di riscaldamento della linea sperimentale, si rimuove il cappotto dell'impattore e si trasporta quest'ultimo nel locale laboratorio di supporto mantenendolo chiuso ed in posizione verticale. Lo si posiziona quindi ancora caldo sull'apposito piedistallo. Per tali operazioni i necessari dispositivi di protezione individuale sono: guanti, camice o tuta, scarpe antinfortunistiche.

37. Rimozione e pesatura filtri di campionamento del particolato

I filtri per il campionamento del particolato sono rimossi dall'impattore ancora caldi e pesati in concomitanza con il loro prelievo, in maniera simile a quanto fatto in fase di montaggio dell'impattore. Per tale operazione è necessario indossare i guanti.

38. Rimozione linea di campionamento IPA e acquisizione campioni

Il portafiltro in acciaio, la fiala adsorbente e il condensatore della linea di campionamento degli IPA sono staccati e trasportati nel locale laboratorio di supporto. Dal portafiltro viene quindi estratto il filtro in fibra di vetro e inserito in una buretta in plastica. La stessa operazione è condotta anche per la fiala adsorbente e per il condensato presente al fondo del condensatore. Le burette contenenti i tre campioni sono quindi ricoperte con carta alluminio e mantenute momentaneamente al buio. Esse devono essere consegnate il prima possibile a coloro che ne effettueranno le analisi, i quali provvederanno a mantenerle in frigorifero fino al loro utilizzo.

39. Controllo fine pulizia della caldaia e spegnimento

Dal display della caldaia si controlla che la fase di pulizia sia terminata e si spegne l'apparecchio selezionando OFF dal menù a tendina, opzione "impianto ON/OFF"

40. Salvataggio e rielaborazione dati di campionamento

I dati registrati dal sistema di acquisizione sono salvati in formato "excel" e rielaborati per la formazione di grafici e misure supplementari (aggiungendo le misure di PM ottenute dalla pesatura dei filtri, il volume di campionamento, le perdite di carico, etc.). Il file così ottenuto è salvato sia sul pc che su supporto esterno di archiviazione di massa.

41. Spegnimento sistema di acquisizione dati e computer

42. Rimozione raccordi in silicone

I raccordi in silicone, ricoperti di materiale coibente e posti alle estremità della linea di derivazione dei fumi, sono rimossi e trasportati nel locale laboratorio di supporto per la fase di pulizia.

43. Pulizia dell'impattore e dei raccordi delle linee di campionamento

I componenti dell'impattore su cui sono posizionati i filtri e attraverso i quali passa il flusso di gas campionato sono inizialmente puliti mediante un bagno ad ultrasuoni per circa 20 minuti. In seguito essi sono asciugati con del panno carta, imbevuto eventualmente con piccole quantità di acetone (circa 5 ml) qualora si rinvenissero macchioline di condensato non eliminate con l'acqua. Le altre parti dell'impattore sono ripulite direttamente con panno carta, ed eventualmente flussate con aria compressa per eliminare gli stessi residui della carta. Anche per esse è possibile utilizzare piccole quantità di acetone (circa 5 ml) nel caso in cui si rinvenissero macchioline di condensato.

I raccordi in silicone staccati dalle estremità della colonna di derivazione di fumi sono lavati energicamente con acqua distillata, facendo in modo che all'interno di essi siano eliminate eventuali particelle solide e il condensato adeso alle pareti. In seguito, si può prevedere anche per essi un passaggio finale con piccole quantità di acetone (circa 5 ml), diluite con acqua.

Le parti di collegamento e il condensatore della linea di campionamento degli IPA sono anch'esse lavate con acqua distillata, a cui si può prevedere di aggiungere anche in questo caso piccole quantità di acetone (circa 5 ml).

Le operazioni di pulizia dell'impattore e dei raccordi della linea sperimentale sono eseguite sotto cappa, utilizzando guanti, camice o tuta.

44. Spegnimento analizzatori gas

Gli analizzatori del gas sono spenti solo alla fine della procedura di prova, in maniera tale che le celle di misura vengano dapprima ripulite mediante il flussaggio dell'aria.

45. Spegnimento pompa dell'acqua, aspirazione fumi e aria comburente

Dal quadro elettrico posto all'interno della Hall si arresta la pompa del circuito idraulico della caldaia, l'immissione dell'aria comburente e l'aspirazione dei fumi. Si controlla infine che la caldaia e il resto della strumentazione risultino spente.

ALLEGATO B: Dimensionamento filtri tipo wall flow in MatLab R7.0

```

clc
clear

global T
global R R_atm po ro_gas cp_gas lambda_gas vis_gas Qgas C_PM M_PM
global dPM ro_PM_p ro_PM_c ro_PM_s k_PM_c ep_PM_s
global ep_o_wall dp_o_wall k_o_wall dg_o_wall a ws sig D A N_cell F L_ott V
DeltaPo
global U u_w b N_slabs Vb N_g_b M_PM_u
global p_o w_o As_o u_o kB DifPM Pe_o eta_D_o
global Nr_o g_e_o3 s_o eta_R_o
global l Cu St_o eta_I_o
global eta_tot_o E_o

disp('biomass analysis')

MC = input('moisture content wet basis%');
Um = (MC/(100-MC))*100;
Cb = input('carbon daf%');
Hb = input('hydrogen daf%');
Ob = input('oxygen daf%');

Cb_mol = Cb/12;
Hb_mol = Hb/1;
Ob_mol = Ob/16;

tot_mol = Cb_mol+Hb_mol+Ob_mol;
Cb_mp = Cb_mol/tot_mol*100;
Hb_mp = Hb_mol/tot_mol*100;
Ob_mp = Ob_mol/tot_mol*100;

a = Cb_mp/Cb_mp;
b = Hb_mp/Cb_mp;
c = Ob_mp/Cb_mp;

Mb = a*12+b*1+c*16;

% biomass combustion stoichiometry
Hf_C = 0;% kJ/mole
Hf_CO = -110.60;% kJ/mole
Hf_CO2 = -393.80;% kJ/mole
Hf_CH4 = -74.90;% kJ/mole
Hf_C2H4 = 52.47;% kJ/mole
Hf_C2H6 = -83.82;% kJ/mole
Hf_H2 = 0;% kJ/mole
Hf_H2Og = -242;% kJ/mole
Hf_O2 = 0;% kJ/mole
Hf_N2 = 0;% kJ/mole
Hf_H2S = -19.97;% kJ/mole
Hf_NO2 = 33.33;% kJ/mole
Hf_NH3 = -45.89;% kJ/mole
Hf_HCN = 130.43;% kJ/mole
Hf_SO2 = -297.03;% kJ/mole
Hf_H2O1 = -286;% kJ/mole
Hf_C6H6O = -96.40;% kJ/mole
H_vap = 44.73;% kJ/mole

% reactants
O2_s = (2*a+b/2-c)/2;% mole
N2_s = O2_s*3.76;% mol (if air)

```

```

% product
CO2_s = a;% mole
H2O_s = b/2;% mole
H2O_u = ((Mb*Um)/100)/18;% mole
N2_s = N2_s;

disp('combustion exhausts')

CO2_d = input('CO2 dry vol%');
O2_d = input('O2 dry vol%');
N2_d = O2_d*3.76+CO2_d*N2_s;

% wet vol%
H2O_tot = CO2_d*(H2O_s+H2O_u);
O2_w = O2_d*(100-H2O_tot)/100;
CO2_w = CO2_d*(100-H2O_tot)/100;
N2_w = N2_d*(100-H2O_tot)/100;

% wet wt%
H2O_tot_m = H2O_tot*18;
O2_w_m = O2_w*32;
CO2_w_m = CO2_w*44;
N2_w_m = N2_w*28;
exh_m = H2O_tot_m+O2_w_m+CO2_w_m+N2_w_m;
H2O_tot_wt = (H2O_tot_m/exh_m)*100;
O2_w_wt = (O2_w_m/exh_m)*100;
CO2_w_wt = (CO2_w_m/exh_m)*100;
N2_w_wt = (N2_w_m/exh_m)*100;

% exhausts properties
T = input('gas temperature °C');
T = T+273.15;% K

R = 8.314472;% J/K mol
R = R/1000;% kJ/K mol
R_atm = 8.20575*(10^(-5));% m3 atm/K mol

po = 1;% atm
po = po*1.01325*10^5;% Pa

ro_O2 = ((po*32)/((8.20575*(10^(-5))*T))/1000;% kg/m3
ro_CO2 = ((po*44)/((8.20575*(10^(-5))*T))/1000;% kg/m3
ro_N2 = ((po*28)/((8.20575*(10^(-5))*T))/1000;% kg/m3
ro_H2O = ((po*18)/((8.20575*(10^(-5))*T))/1000;% kg/m3
ro_gas = (ro_O2*O2_w+ro_CO2*CO2_w+ro_N2*N2_w+ro_H2O*H2O_tot)/100;% kg/m3

cp_CO2 = ((27.437+0.04231*T-0.0000195*(T^2)+4*(10^(-9))*(T^3)-2.99*(10^(-13))*(T^4))/1000)*(1000/44);%kJ/kg K
cp_N2 = (4.187*(6.50+0.00100*T)/1000)*(1000/28);%kJ/kg K
cp_H2O = (4.187*(8.22+0.00015*T+0.00000134*(T^2))/1000)*(1000/18);%kJ/kg K
cp_O2 = ((29.526-0.008899*T+0.000038*(T^2)-3.26*(10^(-8))*(T^3)+8.86*(10^(-12))*(T^4))/1000)*(1000/32);%kJ/kg K
cp_gas =
(cp_CO2*CO2_w_wt+cp_N2*N2_w_wt+cp_H2O*H2O_tot_wt+cp_O2*O2_w_wt)/100;%kJ/kg K
lambda_O2 = 0.00121+8.6157*(10^(-5))*T-1.3346*(10^(-8))*(T^2);% W/m K
lambda_CO2 = -0.012+1.021*(10^(-4))*T-2.2403*(10^(-8))*(T^2);% W/m K
lambda_N2 = 0.00309+7.5930*(10^(-5))*T-1.1014*(10^(-8))*(T^2);% W/m K
lambda_H2O = 0.00053+4.7093*(10^(-5))*T+4.9551*(10^(-8))*(T^2);% W/m K
lambda_gas =
(lambda_CO2*CO2_w_wt+lambda_N2*N2_w_wt+lambda_O2*O2_w_wt+lambda_H2O*H2O_tot_wt)/(CO2_w_wt*(44^0.333)+N2_w_wt*(28^0.333)+O2_w_wt*(32^0.333)+H2O_tot_wt*(18^0.333));% W/m K

```

```

vis_CO2 = (11.811+0.498*T-1.085*(10^(-4))*(T^2))*(10^(-7));% kg/s m
vis_N2 = (42.60+0.475*T-9.88*(10^(-5))*(T^2))*(10^(-7));% kg/s m
vis_H2O = (-38.83+0.43*T-1.62*(10^(-5))*(T^2))*(10^(-7));% kg/s m
vis_O2 = (44.224+0.562*T-1.13*(10^(-4))*(T^2))*(10^(-7));% kg/s m
vis_gas =
(vis_CO2*CO2_w*(44^0.5)+vis_N2*N2_w*(28^0.5)+vis_O2*O2_w*(32^0.5)+vis_H2O*H2O_tot*(
18^0.5))/(CO2_w*(44^0.5)+N2_w*(28^0.5)+O2_w*(32^0.5)+H2O_tot*(18^0.5));% kg/s m

Qgas_o = input('gas flow rate Nm3/h');
Qgas = Qgas_o*(T/273.15)/3600;% m3/s

C_PM = input('PM mass concentration mg/Nm3');
M_PM = C_PM*Qgas_o/(10^6)/3600;% kg/s

disp('PM properties')
dPM = input('mean particle size, micron');
dPM = dPM*(10^-6);% m
ro_PM_p = input('PM particle density, kg/m3');
ro_PM_c = input('PM cake bulk density, kg/m3');
ro_PM_s = input('PM wall bulk density, kg/m3');
k_PM_c = input('PM cake permeability, m2');
ep_PM_s = input('PM wall porosity');

disp('geometry')
ep_o_wall = input('filter wall porosity');
dp_o_wall = input('filter wall pores size, micron');
dp_o_wall = dp_o_wall*(10^-6);% m
k_o_wall = ((ep_o_wall^3)/(150*((1-ep_o_wall)^2)))*(dp_o_wall^2);% m2 clean wall
permeability
dg_o_wall = 3*(1-ep_o_wall)*dp_o_wall/(2*ep_o_wall);% m clean wall grain size
a = input('cell size, mm');
a = a/1000;% m
ws = input('filter wall thickness, mm');
ws = ws/1000;% m
sig = 1/((a+ws)^2);% m-2 cell density
D = input('filter diameter, mm');
D = D/1000;% m
A = pi*(D^2)/4;% m2 filter section area
N_cell = floor(sig*A);
F = 28.454;
L_ott = sqrt((3*ws*(a^3))/(8*k_o_wall*F));% m
% L_p = 0.117% m
V = L_ott*A;% m3
DeltaPo =
((vis_gas*Qgas)/(2*V))*(a+ws)^2*(ws/(k_o_wall*a)+(8*F*(L_ott)^2)/(3*(a^4)))
U = 8*Qgas/(pi*(D^2)*sig*(a^2));% m/s effective surface velocity
u_w = U*a/(4*L_ott);% m/s wall velocity
M_PM_u = 2*M_PM/N_cell;% kg/s particulate load on one singular active cell
b = ((dg_o_wall^3)*(1-ep_o_wall))^(1/3);% m slab dimension
N_slabs = round(ws/b);
Vb = 4*a*b*L_ott;% m3 slab volume
N_g_b = Vb/(4*pi*((dg_o_wall/2)^3)/3);% grains per slab

% diffusion_o
p_o = (1-ep_o_wall)^(1/3);
w_o = 2-3*p_o+3*(p_o^5)-2*(p_o^6);
As_o = 2*(1-(p_o^5))/w_o;
u_o = u_w/ep_o_wall;
kB = 1.381*(10^-23);% Boltzmann constant
DifPM = (kB*T)/(3*pi*vis_gas*dPM);% particle diffusivity
Pe_o = u_o*dg_o_wall/DifPM;% Peclet number
eta_D_o = 4*(As_o^(1/3))*(Pe_o^(-2/3));

```

```

% interception_o
Nr_o = dPM/dg_o_wall;
g_e_o3 = ep_o_wall/(2-ep_o_wall-9/5*((1-ep_o_wall)^(1/3))-1/5*((1-ep_o_wall)^2));
s_o = (3-2*ep_o_wall)/(3*ep_o_wall);
eta_R_o = 1.5*(Nr_o)^2*g_e_o3/((1+Nr_o)^s_o);

% inertial_o
l = vis_gas/(sqrt(2*po*ro_gas/pi));% m
Cu = 1+2*(1.23+0.41*(exp(-0.88))*dPM/(2*l))*(1/dPM);% Cunningham factor
St_o = (Cu*ro_PM_p*u_o*(dPM^2))/(18*vis_gas*dg_o_wall);% Stokes number
eta_I_o = (St_o^2)/((St_o+0.25)^2);
eta_tot_o = (eta_D_o+eta_R_o+eta_I_o)-
(eta_D_o*eta_R_o+eta_D_o*eta_I_o+eta_R_o*eta_I_o)+(eta_D_o*eta_R_o*eta_I_o);
E_o = 1-exp(-3*eta_tot_o*(1-ep_o_wall)*b/(2*ep_o_wall*dg_o_wall));

for j = 1:900;
for i=1:N_slabs;
E(1,1) = E_o;
E(i,1) = E_o;
m(1,1) = M_PM_u*60;
m(1,j) = M_PM_u*60*j;
m(i+1,j) = m(i,j)*(1-E(i,j));
dg(i,j) = 2*((3/(4*pi))*((m(i,j)-
m(i+1,j))/N_g_b)/ro_PM_s)+((dg_o_wall/2)^3)^(1/3));
ep(i,j) = 1-((dg(i,j)/dg_o_wall)^3)*(1-ep_o_wall);
k(i,j) = k_o_wall*((dg(i,j)/dg_o_wall)^2)*((2-ep(i,j))-9/5*((1-ep(i,j))^(1/3))-
1/5*((1-ep(i,j))^2))/(2-ep_o_wall-9/5*((1-ep_o_wall)^(1/3))-1/5*((1-
ep_o_wall)^2))*((1-ep_o_wall)/(1-ep(i,j)));
keff(i,j) = 1/k(i,j);
p(i,j) = (1-ep(i,j))^(1/3);
w(i,j) = 2-3*p(i,j)+3*p(i,j)^5-2*p(i,j)^6;
As(i,j) = 2*(1-p(i,j)^5)/w(i,j);
u(i,j) = u_w/ep(i,j);
Pe(i,j) = u(i,j)*dg(i,j)/DifPM;
eta_D(i,j) = 4*(As(i,j)^(1/3))*(Pe(i,j)^(-2/3));
Nr(i,j) = dPM/dg(i,j);
g_e3(i,j) = ep(i,j)/(2-ep(i,j)-9/5*((1-ep(i,j))^(1/3))-1/5*((1-ep(i,j))^2));
s(i,j) = (3-2*ep(i,j))/(3*ep(i,j));
eta_R(i,j) = 1.5*(Nr(i,j)^2)*g_e3(i,j)/((1+Nr(i,j))^s(i,j));
St(i,j) = (Cu*ro_PM_p*u(i,j)*(dPM^2))/(18*vis_gas*dg(i,j));
eta_I(i,j) = (St(i,j)^2)/((St(i,j)+0.25)^2);
eta_tot(i,j) = (eta_D(i,j)+eta_R(i,j)+eta_I(i,j))-
(eta_D(i,j)*eta_R(i,j)+eta_D(i,j)*eta_I(i,j)+eta_R(i,j)*eta_I(i,j))+eta_D(i,j)*et
a_R(i,j)*eta_I(i,j);
E(i,j+1) = 1-exp(-3*eta_tot(i,j)*(1-ep(i,j))*b/(2*ep(i,j)*dg(i,j)));
End

Keff(j) = N_slabs/(sum(keff(1:N_slabs,j)));
E_tot(j) = (1-prod(1-E(1:N_slabs,j)))*100;
wPM(j) = (a-sqrt(a^2-M_PM_u*60*j/(ro_PM_c*L_ott)))/2;% m
DeltaP(j) =
((vis_gas*Qgas)/(2*V))*((a+ws)^2)*((ws/(Keff(j)*a))+(1/(2*k_PM_c))*log(a/(a-
2*wPM(j))))+(4*F*(L_ott)^2/3)*(1/((a-2*wPM(j))^4)+1/(a^4));

subplot(2,1,1)
plot(DeltaP,'b')
xlabel('min')
ylabel('Pa')
title('pressure drop')
grid on
hold on

```

```
subplot(2,1,2)
plot(E_tot,'r')
xlabel('min')
ylabel('%')
title('collection efficiency')
grid on
hold off
end
```

ALLEGATO C: Nomenclatura

- b = spessore degli strati filtranti
- CO = monossido di carbonio
- Cu = fattore di Stokes - Cunningham
- D = diametro dei filtri wall flow
- d_g^o = diametro dei grani del filtro pulito
- d_g^i = diametro dei grani dello strato filtrante di livello i
- d_{PM} = diametro medio delle particelle organiche
- Dif_{PM} = diffusività delle polveri nella corrente gassosa
- e = efficienza di abbattimento del particolato
- E_i = efficienza di ritenzione del particolato dello strato filtrante di livello i
- F = fattore di attrito (28,454)
- k_o = permeabilità a filtro pulito
- k_c = permeabilità dello strato di polveri (cake)
- k_{eff} = permeabilità equivalente della totalità degli strati filtranti
- k_i = permeabilità dello strato filtrante di livello i
- L = lunghezza canali del filtro
- L^* = lunghezza ottimale dei canali del filtro
- M_{PM} = portata massica (carico totale) del particolato
- M_{PM}^c = carico del particolato per singola cella del filtro ($M_{PM} \cdot 2 / N$)
- m_i = carico di particolato sullo strato filtrante di livello i
- N = numero di celle del filtro
- $N_{g,b}$ = numero di grani per strato filtrante
- P = pressione
- PM = particulate matter (particolato solido)
- Q, Q_{gas} = portata volumetrica dei fumi
- T_{fumi} = temperatura dei fumi in canna fumaria
- T_{filtro} = temperatura di esercizio dei filtri wall flow
- u_i = velocità di attraversamento dello strato filtrante
- V = volume del filtro
- v_s = velocità superficiale dei fumi
- v_{sp} = velocità spaziale (rapporto tra la portata in massa dell'inquinante da trattare e la quantità in massa del catalizzatore deputato a trattarlo)
- w = spessore dello strato di particolato (cake)
- w_s = spessore di parete dei filtri wall flow
- m = dimensione di cella
- Δp_{clean} = perdite di carico a filtro pulito
- Δp_{tot} = perdite di carico del filtro in fase di esercizio
- ε_o = porosità del filtro pulito
- ε_i = porosità dello strato filtrante di livello i
- $\eta_{tot,i}$ = capacità complessiva di ritenzione del particolato da parte dello strato di livello i
- $\eta_{D,i}$ = capacità di ritenzione del particolato da parte dello strato di livello i , per diffusione
- $\eta_{R,i}$ = capacità di ritenzione del particolato da parte dello strato di livello i , per intercettazione
- $\eta_{I,i}$ = capacità di ritenzione del particolato da parte dello strato di livello i , per inerzia
- μ = viscosità fumi
- ρ_{gas} = densità dei fumi
- ρ_{PMp} = densità di particella delle polveri
- ρ_{PMw} = densità delle polveri all'interno dei pori del filtro
- σ = densità di cella