

Filtro sperimentale “a particolato zero”

Luca Golfera, Marco Pellegrini, Augusto Bianchini, Cesare Sacconi

DIEM, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna

Viale del Risorgimento, 2 – 40136 - BO

Abstract

Nella prima parte dell'articolo si procede ad un confronto fra le principali metodologie di filtraggio evidenziando come sia difficile stabilire una linea guida per le emissioni di particolato da caldaie a biomasse in quanto i fattori in gioco sono diversi e non sempre la caldaia funziona nelle proprie condizioni di progetto. Continuando, si mostrano i vantaggi e le problematiche dell'inserimento di un filtro ad altissima efficienza per il trattamento dei fumi di una caldaia, mostrando quindi quali possono essere le soluzioni per sopperire alla perdita di carico causata dal filtro stesso. Infine si introduce l'uso di un filtro a particolato sperimentale a particolato zero per abbattere il contenuto di PM10 in ambiente.

EMISSIONI DI PM10 DA COMBUSTIONE DI BIOMASSE

La combustione di biomassa solida costituisce una fonte di emissione in atmosfera nient'affatto trascurabile rispetto a combustibili tradizionali liquidi e gassosi, con particolare riferimento a particelle classificate PM10 e PM 2.5, nonché di altri composti inquinanti quali idrocarburi policiclici aromatici (PAH), composti organici volatili, monossido di carbonio, ossidi di azoto e di zolfo [1] .

La seguente tabella [2] permette di avere una visione sintetica dei livelli di emissione di particolato da parte di sistemi a biomassa di piccole e medie dimensioni:

Nella prima colonna sono riportate le tipologie di combustibile, nella seconda il sistema di combustione e la potenza generata, nella terza il sistema di pulizia dei gas di scarico presente e nella terza la concentrazione di particolato nei fumi in mg/Nm^3 , nelle condizioni specificate dall'ultima colonna.

Tipo combustibile [Wood fuel type]	Tipo di combustione [Combustion system]	Sistema di filtraggio dei fumi [Gas cleaning system]	Livello di particolato [Particulate level]	Unità di misura (Measurement reference)
Pellet di legno [Wood pellets]	A griglia [Grate fired] (2 MWth)/100% load	Multiciclone [Multi-cyclone]	50–100	mg/Nm, in media 7–9% O ₂
Pellet di legno [Wood pellets]	Caldaia a griglia mobile [Grate boiler with moving scrapes] (1.75 MW)/100% load	Multiciclone [Multi-cyclone]	35	mg/MJ, alle condizioni 8.9% O ₂
Pellet di legno [Wood pellets]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/medium load	Multiciclone [Multi-cyclone]	51 (fly ash), 44 (<1 µm), 7 (1–5 µm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Pellet di legno [Wood pellets]	Griglia Mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/high load	Multiciclone [Multi-cyclone]	51 (fly ash), 41 (<1 µm), 10 (1–5 µm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Pellets	Griglia Mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/low load (0.3 MW)	Multiciclone [Multi-cyclone]	59	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Briquettes di legno [Wood briquettes]	Caldaia a griglia mobile [Grate boiler with moving scrapes] (2.5 MW)	Ciclone [Cyclone]	40	mg/MJ, at measured 5.7% O ₂
Legna secca: segatura, trucioli di legno [Dry wood: shaving,sawdust, wood chips]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/low load (0.3 MW)	Multiciclone [Multi-cyclone]	48	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Legna secca: segatura, trucioli di legno [Dry wood: shaving,sawdust, wood chips]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/medium load (0.9 MW)	Multiciclone [Multi-cyclone]	101	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Segatura secca [Dry saw dust]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/low load	Multiciclone [Multi-cyclone]	74 (fly ash), 63 (<1 µm), 11 (1–5 µm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Segatura secca [Dry saw dust]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/medium load	Multiciclone [Multi-cyclone]	63 (fly ash), 49 (<1 µm), 14 (1–5 µm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Segatura secca [Dry saw dust]	Griglia mobile [Moving grate] (1.5 MWth)/high load	Multiciclone [Multi-cyclone]	64 (fly ash), 44 (<1 µm), 20 (1–5 µm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Trucioli di legno secco, abete [Dry wood chips, spruce]	Caldaia a tubi d'acqua con griglia mobile [Water tube moving grate boiler] (440 kWth)	Nessuno [None]	50–100 (fly ash), 20 (<1 µm)	mg/Nm ³ , a 13% O ₂
Trucioli di legno umido, abete [Wet wood chips, spruce]	Caldaia a tubi d'acqua con griglia mobile [Water tube moving grate boiler] (440 kWth)	Nessuno [None]	50–200 (fly ash)	mg/Nm a 13% O ₂
Trucioli di legno umido [Wet wood chips]	Letto fluido bollente [Bubbling fluidized bed] (4 MWth a 90% load)	ESP	2.3	mg/Nm ³ , a 11% O ₂

Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Bruciatore a griglia mobile [Moving grate burner] (6 MW)/4.5–5 MW load	ESP	15.8 (fly ash), 13.2 (0.03–1.0 μm), 2.6 (1.0–6.8 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Bruciatore a griglia mobile [Moving grate burner] (6 MW)/4.5–5 MW load	ESP e condensatore [ESP and condenser]	8.2 (fly ash), 1.8 (0.03–1.0 μm), 6.3 (1.0–6.8 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Bruciatore a griglia mobile [Moving grate burner] (6 MW)/4.5–5 MW load	Multiciclone [Multi-cyclone]	134.9 (fly ash), 76.3 (<0.8 μm), 58.5 (0.8–6 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali [Forest residues]	Griglia mobile [Moving grate] (1 MWth)/medium load	Multiciclone [Multi-cyclone]	120 (fly ash), 117 (<1 μm), 3 (1–5 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali [Forest residues]	Griglia mobile [Moving grate] (1 MWth)/high load	Multiciclone [Multi-cyclone]	185 (fly ash), 100 (<1 μm), 85 (1–5 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Caldaia a griglia mobile [Moving grate boiler] (1MW-80% load)	Multiciclone [Multi-cyclone]	218 (fly ash), 100 (<1 μm), 118 (1–10 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Caldaia a griglia mobile [Moving grate boiler] (1 MW-60% load)	Multiciclone [Multi-cyclone]	150 (fly ash), 145 (<1 μm), 5.3 (1–10 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Caldaia a griglia mobile [Moving grate boiler] (1 MW-45% load)	Multiciclone [Multi-cyclone]	122 (fly ash), 117 (<1 μm), 5.1 (1–10 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Caldaia a griglia mobile [Moving grate boiler] (6 MW-85% load)	Multiciclone [Multi-cyclone]	157 (fly ash), 79 (<1 μm), 78 (1–10 μm)	mg/Nm ³ , a 13% CO ₂
Residui forestali umidi [Wet forest residues]	Caldaia a griglia [Grate boiler] (1 and 6 MW)	Ciclone [Cyclone]	25–100 (<1 μm)	mg/Nm ³ , O ₂ or CO ₂ percentuale non specificata
Residui di legno [Wood residue]	Sistema due stadi gasificatore- combustore Two stage gasifier-combustor system (Cogeneration-17.5 MWth and 1.38 MMe)	ESP	2.5	mg/Nm ³ , O ₂ or CO ₂ percentuale non specificata
Mix 80% Salice - 20% Pellet di legno [80% willow/20% wood pellet]	Letto fluido circolante [Circulating fluidized bed] (3–12 MW at 8–9 MWth fuel thermal effect)	Ciclone [Cyclone]	410 (fly ash), 75 (<1 μm), 335 (>1 μm)	mg/Nm ³ , in media 3.7% O ₂
Corteccia [Bark]	Caldaia a tubi d'acqua con griglia mobile [Water tube moving grate boiler] (440 kWth)	Nessuno [None]	400–500 (fly ash), 60 (<1 μm)	mg/Nm ³ , a 13% O ₂
Scarti di legno [Waste wood]	Caldaia a tubi d'acqua con griglia mobile [Water tube moving grate boiler] (440 kWth)	Nessuno [None]	300–400 (fly ash), 160 (<1 μm)	mg/Nm ³ , a 13% O ₂

Come si può evincere dalla tabella, risulta molto difficile stabilire valori medi e rappresentativi delle emissioni di particolato da caldaie a biomasse, data la natura estremamente variabile del dato. Infatti, il valore è influenzato dal tipo di combustibile, dalla tipologia di sistema di combustione, dalle condizioni di combustione nonché dalla tipologia di filtraggio presente nell'impianto. Si spazia da concentrazioni di 2,3 e 15,8 mg/m³ per i sistemi dotati di filtro elettrostatico a concentrazioni variabili tra 30 e 218 mg/m³ per sistemi di filtraggio a ciclone, fino ad arrivare a 500 mg/m³ per sistemi non dotati di sistemi di filtraggio.

Per liberarsi dall'influenza che ha la tipologia di filtraggio su tali dati, per il seguito faremo riferimento a studi relativi a sistemi di piccole dimensioni, per i quali è sempre assente il filtraggio. In particolare, [1,3] assumono come concentrazione massica di particolato a monte dei sistemi di depolverazione valori variabili da 60 mg/Nm³ a 500 mg/Nm³, fino a raggiungere picchi di 2100 mg/Nm³, a seconda del tipo di biomassa. Entrando poi nello specifico delle PM10, [1] fornisce una sintesi degli studi già effettuati disponibili in letteratura riguardo caldaie e sistemi di piccole dimensioni, sempre privi di un sistema di filtraggio dei fumi di scarico. In particolare, da uno studio condotto su un boiler e una stufa a pellets entrambi da 6 kW, si è calcolata una concentrazione di PM10 nei fumi pari rispettivamente a 34 mg/Nm³ e 47 mg/Nm³ [4].

Un altro studio ha analizzato l'emissione di particolato sotto diverse condizioni di combustione per una stufa a pellets da 5 kW e una caldaia a legna da 20 kW. La concentrazione di PM10 per la stufa era di 201 mg/Nm³ e 31 mg/Nm³ rispettivamente per i casi di combustione incompleta e completa, mentre 98 mg/Nm³ e 48 mg/Nm³ per la caldaia [8].

Con riferimento a impianti di taglia crescente, sono state monitorate le emissioni di una caldaia a pellets da 20 kW, una a cippato da 40 kW e una a legna da 30 kW, rilevando emissioni di PM10 a pieno carico rispettivamente tra i 13 e i 18 mg/Nm³, tra i 28 e i 56 mg/Nm³ e di 8.8 mg/Nm³, mentre a carico parziale del 50% tra i 14 e i 21 mg/Nm³, tra i 33 e i 61 mg/Nm³ e di 6.8 mg/Nm³ [5].

Altri 3 sistemi (una caldaia a legna da 25 kW, un boiler a pellets da 17 kW e un boiler a cippato da 70 kW) hanno portato alla valutazione emissioni di PM10 rispettivamente di 42±17 mg/Nm³, 29±0.5 mg/Nm³ e 67±8 mg/Nm³ [7].

Pertanto, con particolare riferimento alle PM10 la variabilità elevata dei dati risulta correlata principalmente alle caratteristiche del combustibile (in molti casi la singola caldaia è ottimizzata per un certo tipo di combustibile e l'utilizzo di biomasse diverse da quelle previste ne modifica notevolmente le prestazioni), alle diverse condizioni di combustione nonché alla manutenzione non sempre ottimale per quanto riguarda impianti di queste dimensioni.

Sulla base di quanto sopra illustrato si è assunto come range di variabilità delle emissioni di PM10 da combustione di biomasse l'intervallo tra 5 e 100 mg/Nm³. Per quanto riguarda invece l'emissione di polveri, si considerano i valori proposti in [3] ovvero tra i 60 e i 2100 mg/Nm³.

GENERALITA' SUL FILTRAGGIO DEL PARTICOLATO

La forte variabilità delle concentrazioni di particolato nei fumi implica che per l'abbattimento delle emissioni di PM10 da combustione di biomasse, il sistema di filtraggio da scegliere debba essere in grado di elaborare ad alte efficienze un intervallo di portate, quindi di concentrazioni di particolato da eliminare dalla corrente di fumi, estremamente ampio e variabile.

In un primo approccio analitico, a parità di energia consumata per il filtraggio si considerino i sistemi di filtraggio a ciclone e quelli elettrostatici (ESP, dall'inglese ElectroStatic Precipitator).

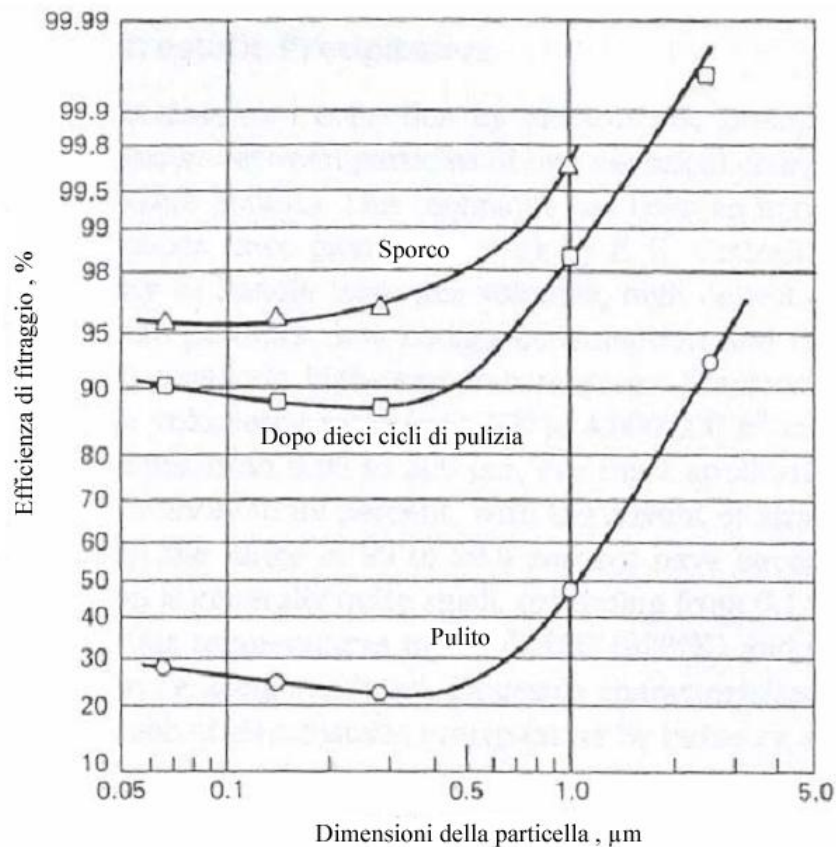
I cicloni basano la loro capacità di separazione del particolato sulla forza centrifuga e hanno un'efficienza che aumenta all'aumentare del diametro della particella da separare. L'efficienza di separazione nelle applicazioni più diffuse è attorno all'85% per le PM10, e diminuisce fino a sotto il 20% per le particelle con diametro inferiore a 5 μm [2]. Il sistema lavora al meglio su elevate concentrazioni di particolato nella corrente gassosa. Lo svantaggio principale dei cicloni, oltre alla loro bassa efficienza di separazione per particolati fini e per le dimensioni del dispositivo comunemente usate a livello industriale, sta nella caduta di pressione relativamente alta che, comunque, entro certi limiti incrementa col crescere dell'efficienza.

Gli ESP agiscono invece caricando elettricamente le particelle sospese nei fumi tramite elettrodi inseriti nel filtro, le quali vengono attratte elettricamente dalla carcassa, essendo collegata al circuito di terra. L'efficienza complessiva di cattura dei sistemi ESP può arrivare a superare il 99% in termini massici [2], seppur a fronte di un'onerosa gestione dell'impianto a causa dell'alto voltaggio necessario al funzionamento del sistema. Inoltre, tali efficienze di filtraggio sono raggiunte solo in presenza di basse concentrazioni di polveri nei fumi, essendo il sistema inadatto a trattare concentrazioni molto elevate.

Entrambi i sistemi appena descritti non sono idonei alla gestione di fumi con concentrazioni di polveri sospese molto variabili come sono quelle in uscita da una caldaia a biomasse, a meno di non utilizzarli. In tal caso si andrebbe incontro ad una notevole complessità di impianto e di alti costi di installazione e di esercizio.

Il filtraggio con varie tipologie di tessuto o feltri è apparso il più idoneo in numerose applicazioni industriali fra le quali quella che viene di seguito illustrata. Tale tipologia di filtri ha visto un incremento formidabile del proprio impiego negli ultimi decenni, per via delle prestazioni raggiunte nel miglioramento dei media filtranti. Il filtraggio consiste in questo caso in una separazione delle particelle sospese nei fumi sulla superficie del media filtrante, il quale perciò non è influenzato dalle variazioni della concentrazione di particolato nei fumi se non per il fenomeno dello sporramento: a fronte di un aumento sensibile del carico, diminuisce solo il tempo di lavaggio del filtro senza ripercussioni sull'efficienza di filtraggio, la quale peraltro aumenta all'aumentare del grado di sporramento del filtro. Tale incremento di efficienza viene pagato in termini di perdite di carico crescenti, che sono tanto più elevate quanto più il filtro è occluso.

L'efficienza di separazione dei filtri a tessuto dipende dalla granulometria considerata. Definendo l'efficienza di separazione come rapporto tra la massa di particelle trattenuta rispetto quella trattata, supponendo tutte le particelle in arrivo come omogenee di diametro d , si possono ricavare grafici come il seguente [9].



Si può vedere come il filtraggio migliori allo sporcarsi del filtro, e l'efficienza aumenti fortemente all'aumentare della dimensione della particella da catturare.

Il *Filtro a 'particolato zero'* ha come obiettivo quello di avvalersi dei vantaggi derivanti dalla filtrazione a tessuto e dei filtri a umido e/o a coalescenza.

VALUTAZIONI GENERALI SULLE PRESTAZIONI DI UN FILTRO "A PARTICOLATO ZERO"

L'obiettivo della ricerca denominata "*Filtro a particolato zero*" è quello di sviluppare un dispositivo con efficienze elevate così da arrivare a produrre all'uscita del filtro una corrente di fumi con contenuto di PM10 uguale o inferiore a quello dell'aria atmosferica, in modo tale da far divenire il filtro un sistema di depurazione per l'intero ambiente: un filtro proattivo.

Si consideri il contenuto di PM10 dell'aria ambiente (C_{aria}) che assumiamo pari a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pari cioè al valore limite di legge medio annuale consentito [10].

Se consideriamo una concentrazione di PM10 nei fumi di combustione di una caldaia a biomasse pari a $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (C_{fumi}) (valore cautelativo rispetto a quanto esposto in precedenza) volendo raggiungere il grado di pulizia dei fumi necessario per riportare i fumi di combustione a valori di concentrazione di PM10 pari a quelle dell'aria ambiente, si deve operare con un'efficienza pari a:

$$\eta_T = \frac{C_{fumi} - C_{aria}}{C_{fumi}} = \frac{100000 \mu g/m^3 - 40 \mu g/m^3}{100000 \mu g/m^3} = 0,9996 = 99,96\% \quad (\text{eq. 1})$$

L'obiettivo che si vuole raggiungere è superare tale efficienza η_T che definiamo *efficienza di taglio*, in modo tale che il contenuto di PM10 nella corrente a valle del filtro risulti come detto inferiore a quello dell'aria ambiente. Supponendo di raggiungere per esempio un'efficienza di filtraggio del 99,99% delle PM10, si otterrebbe una concentrazione di PM10 nell'aria in uscita dal filtro pari a:

$$C_{uscita\ filtro_{99,99\%}} = (1 - 0,9999) \cdot C_{fumi} = 0,0001 \cdot 100000 \mu g/m^3 = 10 \mu g/m^3 \quad (\text{eq.2})$$

riducendo in tal modo l'emissione ad $\frac{1}{4}$ della concentrazione di fondo.

Se consideriamo che una caldaia da 300 kW alimentata a cippato con una portata di aria pari a 476 m³/h elabora una portata di circa 952000 m³ nell'arco di un anno (2000 ore annue di funzionamento di un impianto di riscaldamento in zona climatica D), un filtro dotato di tale efficienza (99,99%) collegato ad essa in un anno riuscirebbe a ripulire completamente dal PM10 una zona di 317300 m² per un'altezza di 3 m.

Immaginando poi, ad esempio, di sopperire ai 428 GWh annui di fabbisogno energetico per il riscaldamento del Comune di Forlì solamente tramite combustione di cippato e di filtrare con un efficienza del 99,99% i 151 milioni di m³ di aria richiesti, nell'arco di 4 anni e mezzo si ripulirebbe dal particolato un volume di aria pari all'intera superficie comunale (228 km²) per 3 m di altezza.

Tale efficienza, seppur in termini molto ridotti rispetto ai tradizionali filtri a tessuto, viene pagata con un aumento delle perdite di carico tra monte e valle del filtro, le quali hanno diretta ripercussione sui costi energetici quindi sui costi economici di funzionamento del sistema.

OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA DELL'INTEGRAZIONE TRA CALDAIA A BIOMASSA E FILTRO "A PARTICOLATO ZERO"

A tali perdite di carico si può far fronte con diverse soluzioni impiantistiche.

Con l'intenzione di ridurre la richiesta energetica si ricorre alla massimizzazione del tiraggio naturale del camino, ovvero si frutta sia la differenza di temperatura tra il camino l'esterno, sia l'altezza L del camino stesso.

Per valutare la prevalenza generabile Δp si è fatto ricorso alla seguente formulazione, trascurando in prima approssimazione le perdite di carico riscontrate lungo il percorso, indicando con ρ_{fumi} la densità media dei fumi all'interno del camino e con ρ_{aria} la densità della stessa all'esterno:

$$\Delta p = (\rho_{fumi} - \rho_{aria}) \cdot g \cdot L \quad (\text{eq.3})$$

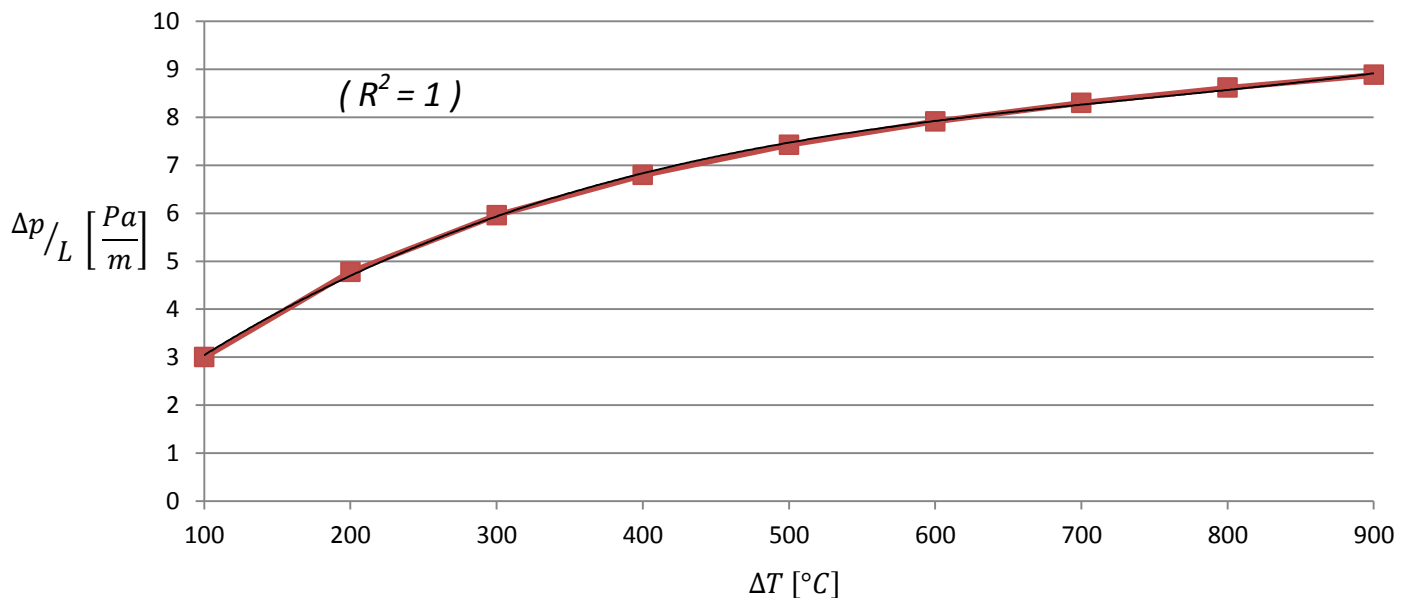
Dove L rappresenta l'altezza del camino e g l'accelerazione di gravità.

Valutando diverse densità dei fumi per incrementi di 100°C della temperatura media dei fumi nel condotto, è stato possibile determinare la differenza $\Delta\rho$ (in $\frac{kg}{m^3}$) con la densità dell'aria esterna. Interpolando i risultati ottenuti con una funzione polinomiale del 4° grado si è determinata la seguente relazione, dove ΔT si riferisce alla differenza di temperatura fra interno ed esterno del camino:

$$\Delta\rho = -2 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta T^4 + 4,7 \cdot 10^{-9} \cdot \Delta T^3 - 5,19 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T^2 + 3,039 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T + 0,0494$$

In questo caso il termine R^2 , indicatore del grado di bontà dell'interpolazione, restituisce un valore unitario, sinonimo della perfetta interpolazione.

Valutando la prevalenza Δp specifica per unità di lunghezza del condotto riferita ad un incremento di 100 °C è stato ricavato il grafico seguente.



Interpolando i risultati con una funzione polinomiale del 4° ordine si ottiene:

$$\frac{\Delta p}{L} = -1,7 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta T^4 + 4,65 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta T^3 - 5,09 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T^2 + 2,98 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta T + 0,485 \quad (\text{eq. 5})$$

Nota la temperatura dei fumi in arrivo al camino è a questo punto immediato determinare la prevalenza generata in funzione della lunghezza.

Ad esempio per una temperatura dei fumi pari a 320 °C ed un'altezza di 5 m del camino la prevalenza fornita sarà pari a circa 30 Pa; per un'altezza doppia di 10 m essa sarà ovviamente pari a 60 Pa.

L'altezza del camino ha vincoli dimensionali, legati ai costi d'installazione dell'impianto e a vincoli costruttivi o paesaggistici.

La temperatura al camino andrà invece controllata attraverso un opportuno scambiatore in modo tale da svincolarla da quella in uscita dagli utilizzatori e dal sistema di filtraggio.

In secondo luogo si può pensare di diminuire la prevalenza necessaria agendo direttamente sul filtro, ovvero aumentando la superficie filtrante. Infatti al suo aumentare diminuisce la velocità di attraversamento, che è legata tramite una relazione di proporzionalità quadratica alle perdite di carico attraverso il filtro (dimezzando la velocità di attraversamento, le perdite di carico diminuiscono di un quarto). L'aumento della superficie filtrante trova un limite nelle dimensioni fisiche del filtro, che si ripercuotono peraltro direttamente sul costo di investimento iniziale.

Nel caso la combinazione della massimizzazione del tiraggio naturale e della superficie filtrante non risulti sufficiente, è necessaria l'introduzione di un sistema ad aspirazione forzata che sviluppi la prevalenza da aggiungere per vincere le perdite di carico introdotte dal filtro.

Ci si aspetta che il contributo del tiraggio naturale sia sufficiente a fare diminuire la richiesta energetica del sistema di aspirazione posto a valle del filtro fino a renderla generabile tramite il recupero dai cascami energetici della caldaia grazie a sistemi di cogenerazione statica. L'adozione di questa soluzione, a fronte di un più elevato costo di investimento, renderebbe il filtro e la caldaia autonomi rispetto alla fornitura di energia elettrica esterna.

IL PROTOTIPO DI FILTRO 'A PARTICOLATO ZERO'

La foto seguente rappresenta il filtro sviluppato presso i laboratori DIEM.



Esso non rappresenta la configurazione dell'impianto finale, il quale andrà integrato nell'impianto realizzando le possibili sinergie con le funzioni impiantistiche della caldaia, ma ne realizza tutti i principi di funzionamento, essendo stato sviluppato al fine di compiere una campagna sperimentale volta alla determinazione delle proprietà termodinamiche e operative del sistema ed è, quindi, stato realizzato per evidenziare i parametri sperimentali ed operativi.

La prima parte della campagna sperimentale è già stata portata a termine. Essa consiste in una serie di prove in bianco. I risultati ottenuti hanno portato alla determinazione di un'efficienza di filtraggio, rispetto all'aria ambiente in ingresso, variabile tra il 35% e il 78%.

Altre campagne sperimentali sono state programmate per determinare l'efficienza del sistema nel caso di filtraggio di fumi di combustione a secco e a umido.

Il successivo passaggio sperimentale sarà svolto in collaborazione con l'azienda TE S.r.l., con l'obiettivo di portare a completa ingegnerizzazione il sistema di filtraggio '*a particolato zero*' con una caldaia a biomasse.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Obaidullah, S. Bram, V. K. Verma, J. De Ruyck. *A Review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion*, *International journal of renewable energy research*, Vol.2 no.1, 2012
- [2] S. Ghafghazi, T. Sowlatia, S. Sokhansanj, X. Bi, S. Melin. *Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011); 3019 – 3028
- [3] L S Johansson, C Tullin, B Leckner, P Sjoval. *Particle emission from biomass combustion in small combustors*. *Biomass and Bioenergy* 2003; 25:435-46
- [4] L S Johansson. *Characterization of particle emissions from small-scale biomass combustion*. Licentiate thesis. Department of Energy Technology. Chalmers University of Technology. Sweden. 2002.
- [5] I Obernberger, T Brunner, G Barntaler. *Fine particle emissions from Modern Austrian small scale biomass combustion plants*. 15th European biomass conference and exhibition. 7-11 May 2007, Germany:1546-57.
- [6] Q Chen, X Zhang, D Bradford, V Sharifi, J Swithenbank. *Comparison of emission characteristics of small-scale heating systems using biomass instead of coal*. *Energy and fuels* 2010;24:4255-65.
- [7] C Gaegauf, U Wieser, Y Macquat. *Field investigation of nanoparticle emissions from various biomass combustion systems*. In proc. International Seminar
- [8] M A Bari, G Baumbach, J Brodbeck, M Struschka, B Kuch, W Dreher, G Scheffknecht. *Characterization of particulates and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in wintertime wood-fired heating in residential areas*. *Atmospheric Environment* 2010:1-8.
- [9] prof. Matteo Carpentieri, Università di Firenze, 'Interazione tra le macchine e l'ambiente', pdf
- [10] ARPA, *Rapporto sulla qualità dell'aria Provincia di Forlì-Cesena Anno 2010*