

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
Sede di Forlì

Corso di laurea in

INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA  
in impianti industriali meccanici (C.I.)

Test sperimentali e modellazione di una torre di lavaggio per la  
filtrazione di particolato sottile in impianti di combustione delle  
biomasse

Candidato:  
LUCA CASANOVA

Relatore:  
Prof. ing. Augusto Bianchini

Anno Accademico 2014-2015  
Sessione I



## INTRODUZIONE

Guardando indietro negli ultimi 40 anni, l'attuazione di politiche ambientali e climatiche ha portato grossi vantaggi al funzionamento dell'ecosistema europeo e per la salute ed il tenore di vita dei suoi abitanti. In molte zone, l'inquinamento ha mantenuti i livelli pre-epoca industriale, grazie alla riduzione delle emissioni, al miglior smaltimento dei rifiuti ed alla protezione della natura. Le politiche ambientali inoltre creano un apporto significativo al panorama economico, contribuendo alla strategia "Europa 2020", la quale mira a trasformare l'UE in una economia "intelligente", senza contare che il settore dell'industria ambientale ha aumentato la propria produttività del 50% dal 2000 al 2011 certificandosi come uno dei pochi settori economici ad aver battuto la crisi finanziaria del 2008. L'oggetto del seguente elaborato consiste nel tentativo di risolvere la problematica dell'inquinamento derivante dalla combustione di biomasse per il riscaldamento domestico, concentrando la nostra attenzione su caldaie con potenza inferiore ai 35 kW, valore per il quale non esistono ancora limiti sulle emissioni. L'utilizzo delle biomasse è stato fortemente incentivato negli ultimi tempi, proprio perché in grado di dare un contributo nullo all'aumento di CO<sub>2</sub>, noto gas responsabile dell'effetto serra, oltre al fattore prezzo crescente dei combustibili fossili. Quindi, le biomasse sono considerate ecologiche dal punto di vista della CO<sub>2</sub>, degli SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, ma d'altro canto sono molto più inquinanti dei combustibili fossili per quanto riguarda l'apporto di particolato nell'ambiente. Ad oggi esistono numerose tecniche di filtraggio anche in grado di assicurare una rimozione del particolato vicina al 99%, ma a prezzi ingiustificati rispetto ad impianti di piccola taglia come quelli domestici. Lo scopo di questa tesi è quello di indagare "l'essenza" delle biomasse, di evidenziare i problemi generati dalla respirazione del particolato, nonché di costruire un impianto di filtraggio che possa risolvere il problema del particolato con bassi costi di investimento e d'esercizio. Le sperimentazioni effettuate a Bologna nel laboratorio del "Lazzaretto" avevano lo scopo di testare un impianto da noi costruito e costituito da un cilindro cavo in policarbonato,

al cui interno sono stati disposti degli ugelli e un riempimento strutturato, gentilmente messi a disposizione dall'azienda Refill tech. Abbiamo condotto le prove sperimentali, variando l'altezza del riempimento strutturato costituito da 3 moduli sovrapponibili, nati come separatori di gocce e adattati nel nostro impianto anche alla separazione del particolato

# Capitolo 1

## LE BIOMASSE

### 1.1 CENNI SULLE BIOMASSE

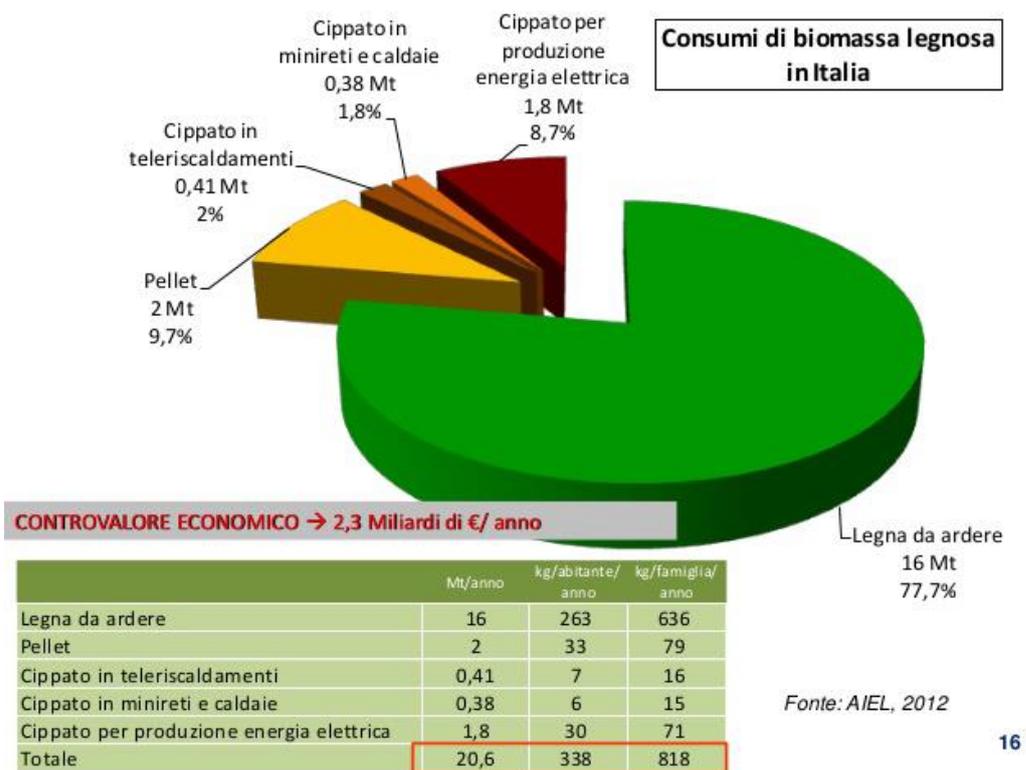
Parlando di biomassa, ci riferiamo ad un composto organico che deve la sua formazione alla fotosintesi clorofilliana. In Italia questo concetto venne introdotto negli anni '70 dove, in piena crisi energetica, nacque l'interesse verso fonti rinnovabili di energia. Sempre nel nostro paese manca una definizione univoca di biomassa, infatti il sistema normativo la definisce in modi differenti a seconda dell'ambito e dell'utilizzo. In campo energetico la direttiva comunitaria 2001/77/CE (recepita da D.Lgs. 387 del 29 Dicembre 2003) la definisce:

“la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti o residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali ed animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani”.

Dalla definizione si evince che possono essere considerate biomasse tutti quei prodotti aventi in comune una matrice organica. Può essere considerata una fonte rinnovabile, ovvero una fonte energetica avente la capacità di svilupparsi in un tempo minore del tempo necessario al suo utilizzo, nel caso il suo impiego avvenga in un orizzonte temporale maggiore del tempo necessario all'organismo di crescere e provvedere al suo rinnovo. Questa fonte di energia è stata valorizzata per il suo contributo nullo all'aumento dell'effetto serra, anche se questo non significa che la combustione della biomassa non generi CO<sub>2</sub>, bensì che l'apporto di anidride carbonica generato dalla combustione, sia pari o minore della CO<sub>2</sub> assorbita dall'organismo durante la sua vita, determinando quindi un contributo nullo all'effetto serra. In questo bilancio va però tenuto conto anche dell'anidride carbonica generata dai processi di produzione della biomassa stessa, ovvero attuare un'analisi sul Life Cycle Assessment, il quale include l'intera filiera di produzione nonché i trattamenti e la valorizzazione della stessa.

- Le risorse di biomassa nel nostro paese sono localizzate principalmente in:
- residui agricoli (paglie di cereali, residui verdi)
  - residui forestali derivanti dalla lavorazione del legno (frasche, ramaglie, scarti)
  - residui agroindustriali e dell'industria alimentare (sanse, vinacce)
  - colture energetiche erbacee ed arboree dedicate

Riportiamo qui di seguito uno studio condotto da AIEL nel 2012 che ci permette di capire le percentuali di biomassa legnosa consumate in Italia:



**Figura 1:** consumi di biomassa legnosa in Italia, fonte ATEL 2012

Si è calcolato che per sopprimere all'intero fabbisogno energetico italiano, sarebbe necessaria una superficie di circa quaranta milioni di ettari da utilizzare esclusivamente per la produzione di biomassa, su una superficie reale disponibile di circa 13 milioni

di ettari, da qui si nota l'impossibilità di utilizzare unicamente le biomasse come unica fornitura energetica.

Nella seguente tabella viene illustrata la potenza complessiva espressa in MW installata in Italia per ogni regione fino al 2013:

<b>Regione</b>	<b>n. di impianti</b>	<b>Potenza installata (MWe)</b>	<b>Produzione elettricità (GWh/anno)</b>
Abruzzo	7	6	30
Basilicata	7	2	16
Calabria	10	8	34
Campania	6	4	25
Molise	2	2	11
Puglia	5	3	21
Sardegna	10	5	26
Sicilia	1	< 1	2
Sud e Isole	48	30	165
Lazio	19	14	76
Marche	16	12	60
Toscana	24	18	97
Umbria	7	6	32
Centro	66	50	265
Emilia-Romagna	147	118	643
Friuli Venezia Giulia	45	35	190
Liguria	1	< 1	1
Lombardia	339	282	1.456
Piemonte	131	106	602
Trentino Alto Adige	40	11	45
Valle d'Aosta	2	< 1	< 1
Veneto	170	137	717
Nord	875	689	3.654
<b>TOTALE ITALIA</b>	<b>989</b>	<b>770</b>	<b>4.084</b>

**Tabella 1:** distribuzione regionale della potenza installata in Italia fonte: elaborazioni Itabia su dati GSE, bollettino secondo semestre 2012

Nelle seguenti tabelle è invece possibile vedere quale è stato l'aumento di impianti registrato in Italia fra il 2007 ed il 2013:

Regione	Impianti (numero e % per Regione)							
	Aprile 2007		Marzo 2010		Maggio 2011		Dicembre 2012	
Lombardia	48	31,2%	102	37,4%	210	40,3%	374	37,6%
Emilia-Romagna	30	19,5%	36	13,2%	63	12,1%	143	14,4%
Piemonte	6	3,9%	35	12,8%	72	13,8%	106	10,7%
Veneto	17	11,0%	33	12,1%	78	15,0%	151	15,2%
Altre Regioni	53	34,4%	67	24,5%	98	18,8%	220	22,1%
<b>TOTALE ITALIA</b>	<b>154</b>	<b>100%</b>	<b>273</b>	<b>100%</b>	<b>521</b>	<b>100%</b>	<b>994</b>	<b>100%</b>

Classe di potenza elettrica installata (kWe)	Potenza elettrica installata (sul totale)						Incremento 2012/2011 (%)
	Marzo 2010		Maggio 2011		Dicembre 2012		
	MWe	%	MWe	%	MWe	%	
< 100	1,4	0,9	2,8	0,8	3,9	0,6	37,4
101 - 500	20,1	13,7	31,6	9,0	60,6	8,7	91,6
501 - 1.000	92,0	62,6	272,5	77,9	588,2	84,8	115,8
> 1.000	33,4	22,7	42,7	12,2	41,3	5,9	-3,1
<b>TOTALE</b>	<b>147</b>	<b>100</b>	<b>350</b>	<b>100</b>	<b>694</b>	<b>100</b>	<b>98,5</b>

**Tabella 2:** percentuale di aumento degli impianti e della potenza elettrica dal 2007 al 2012 fonte CRPA: elaborazione effettuata sul sottoinsieme di impianti per cui era disponibile il dato della potenza installata

## 1.2 PECULIARITA' E CLASSIFICAZIONE

La qualità della biomassa dipende da molteplici fattori, soprattutto dipendenti dalle caratteristiche fisiche, così anche i tipi di impianto vengono scelti in base alla maggiore presenza in loco di un tipo di biomassa rispetto ad un'altra. Le caratteristiche fondamentali che caratterizzano la bontà della biomassa sono:

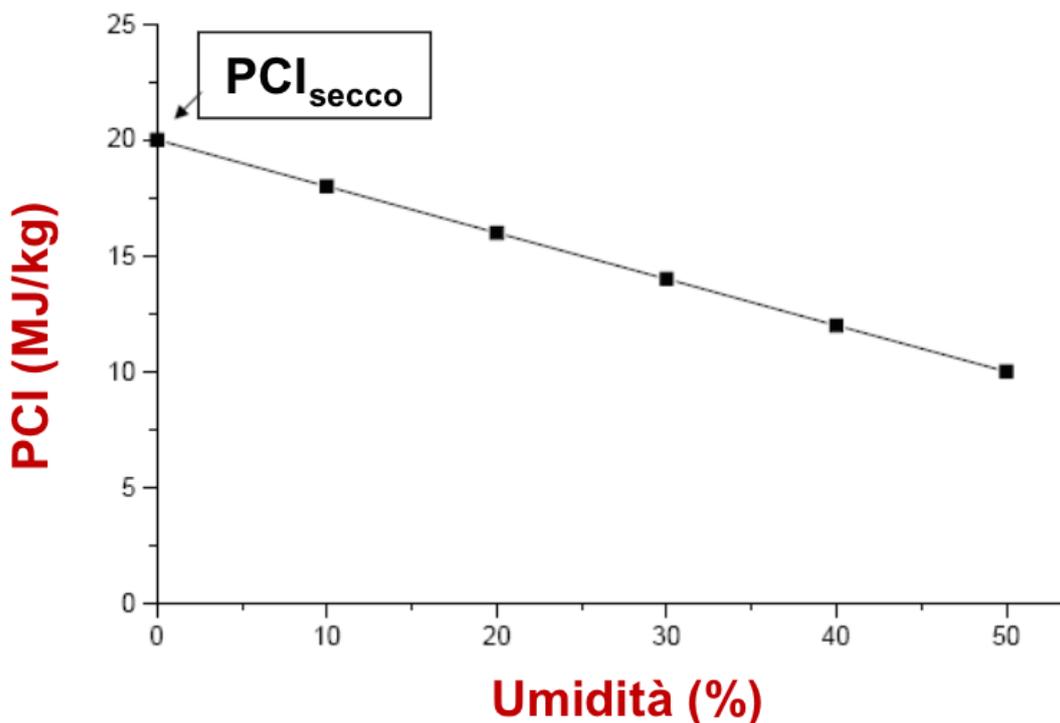
1 L'umidità(U): esprime il quantitativo d'acqua presente in un Kg di biomassa ed è un fattore molto importante sia nella scelta della biomassa sia dell'impianto, questo perché all'aumentare di U cala il rendimento di combustione. In genere, il valore massimo di umidità che ne permette ancora un utilizzo proficuo in termini energetici

è del 60%, mentre il valore ottimale di U che massimizza il rendimento di combustione si attesta sul 5%.

2 Potere calorifico inferiore(PCI): esprime la quantità di calore generata dalla combustione completa di un Kg di biomassa, considerando l'acqua allo stato di vapore a 100 gradi, in modo da considerare solo la quota parte di calore realmente utilizzabile.

Tra PCI e U vale la seguente relazione:

$$PCI=(1-U)*PCI_{secco}+U*0=(1-U)*PCI_{secco} \text{ dato che il PCI dell'acqua è nullo}$$



**Figura 2:** grafico che mette in luce la relazione di proporzionalità inversa fra U e PCI

3 densità( $\rho$ ): esprime il rapporto fra la massa della biomassa umida rispetto all'unità di volume e si misura in Kg/m<sup>3</sup>.

4 rapporto C/N: esprime il rapporto ponderale fra contenuto di carbonio e contenuto di azoto, risulta uno dei parametri più importanti nella valutazione dei processi di valorizzazione biochimica della biomassa.

5 produzione media: esprime la quantità di biomassa prodotta per ettaro di terreno, si misura in ton/ha. Trattandosi di una fonte rinnovabile è un valore importante di cui bisogna tener conto.

6 composizione chimica: bisogna conoscerla a fondo per capire sia come poter ottenere il massimo rendimento sia per capire quali saranno i prodotti di scarto contenuti nei fumi.

7 quantità di aria stechiometrica: rappresenta la quantità d'aria contenente la quantità di ossigeno necessaria a bruciare in maniera completa il combustibile immesso, in modo da avere alto rendimento, basse emissioni e quindi una corretta combustione.

8 eccesso d'aria: rappresenta aria in eccesso rispetto alla condizione stechiometrica. Viene utilizzata in quanto nella combustione non tutta la superficie della biomassa riesce ad entrare in contatto con l'aria stechiometrica, quindi senza tale eccesso la combustione risulterebbe incompleta. Dobbiamo tener conto del fatto che tale aria in eccesso assorbe calore alla combustione, dobbiamo quindi tener conto del valore ottimale di aria in eccesso da introdurre in camera di combustione.

Vista la grande varietà delle biomasse, mi sembra doveroso darne una classificazione:

- biomassa di origine animale o vegetale.
- biomassa proveniente da processi finalizzati ad altro scopo (biomassa residuale) oppure prodotta ad hoc per fini energetici (biomassa dedicata)
- stato fisico con cui la biomassa viene valorizzata energeticamente, stato fisico che può essere solido liquido e gassoso.
- origine della biomassa, se proveniente dal comparto forestale o agroforestale, se da comparto agricolo o zootecnico, se dal reparto industriale o se biomassa intesa come rifiuto urbano.

La biomassa legnosa è costituita principalmente dai seguenti polimeri: la lignina, responsabile nel conferire la giusta rigidità alla pianta, contenuta in percentuali comprese fra il 20 ed il 30% su base secca; la cellulosa la quale rappresenta la principale componente del legno, l'emicellulosa presente a sua volta nella parete cellulare delle piante, precisamente negli spazi vuoti lasciati dalla cellulosa. L'ultima classificazione suddivide le biomasse in base alla matrice organica preponderante: se ad esempio presentano una matrice lignocellulosica, se amidacea-zuccherina o alcooligena, se oleaginosa o zootecnica.

Valutiamo ora le prestazioni di alcune biomasse provenienti dal settore agricolo:

Tipo di biomassa	Ceneri presenti nei fumi in % in peso	Rendimento massimo di conversione	PCI umido [Mj/kg]	Tempo necessario a pulire la caldaia	Capacità formazione clinker
MAIS	0,08	0,8	14,558	40	ELEVATA
SEMI DI GIRASOLE	0,25	0,7	25,853	60	NULLA
SEMI DI SOIA	0,15	0,6	23,067	50	NULLA
CARDO	0,09	0,7	15,491	40	NULLA

Tabella 3: prestazioni principali biomasse

Il mais è la biomassa che noi abbiamo utilizzato per i nostri studi nei laboratori del DIN di Bologna. La peculiarità di questo biocombustibile è nella formazione di un'elevata quantità di clinker. Il clinker altro non è che il fenomeno della fusione delle ceneri ed esiste in tutte le combustioni delle biomasse.

### 1.3 PROCESSI PER L'UTILIZZO DI BIOMASSE

Per l'utilizzo fruttifero delle biomasse è importante sottoporle a processi necessari per migliorarne le condizioni di stoccaggio e trasporto. Tali processi sono:

-Processi BIOCHIMICI

-Processi TERMOCHIMICI

Nei primi vengono utilizzati degli enzimi, funghi e microorganismi al fine di migliorare le condizioni di trasporto e stoccaggio. Nei processi termochimici invece tramite il calore si cerca di innescare dei fenomeni che trasformino l'energia chimica in energia termica.

#### 1.3.1 PROCESSI BIOCHIMICI

Tali tecniche si basano principalmente sull'utilizzo di particolari microorganismi che proliferano all'interno della biomassa, ne elenchiamo alcuni:

### **-Esterificazione degli oli:**

si tratta di un procedimento chimico, nel quale viene fatto reagire un olio vegetale con l'alcol metilico, utilizzando estere come catalizzatore. Da questa reazione otteniamo un prodotto privo di zolfo e composti aromatici, ma ricco di ossigeno, guadagnandosi così il ruolo di importante alternativa al biodiesel per l'utilizzo nel settore dei trasporti.

### **-Fermentazione alcolica:**

consiste in un processo in cui gli zuccheri vengono trasformati in etanolo, partendo dalle biomasse ad alto contenuto zuccherino come la granella di mais e la canna da zucchero. Il prodotto finale consiste in una miscela di acqua e alcol separata successivamente per distillazione.

### **-Digestione anaerobica:**

processo nel quale la biomassa viene degradata sotto l'azione di alcuni agenti batterici, con liberazione di metano e anidride carbonica. Tale gas possiede un potere calorifico di circa 22-23 Mj/Nm<sup>3</sup>. Inoltre si ottengono altri due sottoprodotti a basso contenuto energetico denominati digestato acido-genico e digestato metano-genico, utilizzati come fertilizzanti.

### **-Digestione aerobica:**

le reazioni di determinati microorganismi avvengono in presenza di ossigeno. Alcune sostanze organiche grazie a tali microorganismi vengono metabolizzate liberando acqua e anidride carbonica, producendo un riscaldamento del substrato. Il calore generato è il prodotto utile di questa reazione!

### 1.3.2 *PROCESSI TERMOCHIMICI*

#### **Carbonizzazione:**

consiste in un processo di pretrattamento della biomassa, avente lo scopo di trasformare le molecole strutturate dei prodotti legnosi in carbone, ovvero eliminando l'acqua e altre sostanze volatili contenute nella materia vegetale. Tale processo viene eseguito ad elevate temperature (400-600°C) nelle cosiddette carbonaie, ovvero luoghi nei quali la combustione della materia legnosa avviene molto lentamente ed in assenza di ossigeno. Si tratta di un processo alquanto simile alla pirolisi, in cui i prodotti utili possono essere impiegati o come combustibili oppure come prodotti chimici industriali.

#### **Pirolisi:**

anche questo processo avviene a temperature relativamente elevate (500-700°C) ed in assenza di ossigeno. Esistono varie forme di pirolisi che caratterizzano lo stato fisico dei prodotti ottenuti (liquidi-solidi-gassosi), utilizzando la tipologia che più ci interessa e facendo variare in maniera notevole la velocità della reazione, che può essere lenta, veloce e flash. La combustione lenta avviene a temperature non superiori a 600°C, generando un tipico carbone da legna con percentuale in peso del 30% rispetto alla sostanza secca iniziale. Nella pirolisi veloce le temperature sono comprese in un range che varia tra i 500-600°C, generando un prodotto gassoso con una resa dell'80% rispetto alla sostanza iniziale. Nella pirolisi flash si utilizzano temperature di circa 650°C per un tempo inferiore al secondo, producendo un prodotto liquido con una resa di circa il 60% rispetto al prodotto di partenza e presentando un notevole contenuto energetico, nonché ottime caratteristiche di stoccaggio e trasporto. Tali processi possono essere applicati a qualsiasi sostanza organica, purché presenti un'umidità inferiore al 15%.

**Combustione diretta:**

è il metodo più semplice per convertire l'energia chimica della biomassa in energia termica, attraverso una lunga serie di reazioni esotermiche in grado di ossidare il combustibile mediante l'azione di un reagente ossidante, con conseguente rilascio di energia termica. La combustione avviene in più passaggi, nei quali il primo stadio è occupato dalla cosiddetta deumidificazione del combustibile, il secondo dalla combustione di alcune sostanze volatili ed infine il terzo passaggio consiste nella combustione delle sostanze carboniose.

**Gassificazione:**

il processo è costituito da un'ossidazione parziale in difetto d'ossigeno, in cui una parte della biomassa viene combusta in modo da fornire l'energia termica necessaria alla reazione chimica. Il combustibile solido viene convertito, quindi, in un gas composto principalmente di idrogeno e monossido di carbonio. I principali tipi di gassificazione sono: in aria, in ossigeno ed in vapore acqueo. A seconda del tipo di gassificazione otterremo un prodotto con differente PCI. Nel caso di gassificazione in aria, otterremo un gas avente un PCI di circa 6-7 Mj/Nm<sup>3</sup> chiamato gasogeno in quanto ricco di azoto; nel caso di gassificazione in ossigeno, otteniamo un gas avente un PCI di circa 14 Mj/Nm<sup>3</sup>, mentre tramite gassificazione a vapore acqueo, otterremo un prodotto avente PCI di circa 10 Mj/Nm<sup>3</sup>. Sorge spontaneo pensare alla grande utilità di questi processi, in quanto in grado di creare un gas proveniente da biomasse, con ottima capacità di trasporto e stoccaggio, permettendone l'utilizzo nella produzione di energia elettrica mediante turbine. Bisogna aggiungere però che per ottenere questi gas, non solo bisogna essere dotati di gassificatori, bensì si deve provvedere ad un reparto di pretrattamento della biomassa in grado di essicarla. I principali tipi di gassificatori sono:

- a letto fisso
- a letto fluido
- a letto trascinato

I primi presentano notevole semplicità costruttiva e quindi bassi costi, mentre al fine di ottenere performance più soddisfacenti si utilizzano quelli a letto

fluido, presentando però l'inconveniente di generare dei residui catramosi tossici.

#### 1.4 NORMATIVE TECNICHE

L'art.2 del D.P.C.M. 08/03/02 definisce gli impianti domestici utilizzando biomasse, come quegli impianti non facenti parte di alcun ciclo produttivo ma unicamente dediti a riscaldamento/raffreddamento di ambienti, lavaggio di stoviglie, lavaggio di biancheria, riscaldamento di acqua per le utenze etc...

L'articolo 3 del D.P.C.M 08/03/02 (decreto presidente del consiglio dei ministri), stabilisce le norme riguardanti il controllo delle emissioni inquinanti in atmosfera di impianti termici sia civili sia industriali. Occorre sottolineare che tali normative riguardano unicamente impianti termici aventi potenze maggiori uguali di 0,15 Mw, facendo sì che anche il nostro impianto di prova venga escluso da tale quadro di riferimento. Siamo fiduciosi che, al fine di migliorare la condizione ambientale del nostro territorio, gli organi legislativi introducano norme riguardanti anche le caldaie ad uso domestico, con potenze di qualche decine di kilowatt. **Bisogna sottolineare infatti che per impianti di potenza inferiore ad un kilowatt, si applica l'articolo 2 comma 1 del D.P.R. 25/07/91, secondo il quale per impianti generanti un contributo in termini di inquinamento poco significativo, non vengono applicati i limiti esposti nella seguente tabella:** (valida per impianti anteriori al 2006)

Potenza termica nominale installata (Mw)
--

	>0,15	>3	>6	>20
	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>
Polveri totali	100	30	30	30
Carbonio organico totale (COT)	.....	.....	30	20
Monossido di carbonio (CO)	350	300	250	200

Ossidi di azoto (NO <sub>2</sub> )	500	500	400	400
Ossidi di zolfo (SO <sub>2</sub> )	200	200	200	200

Tabella 4: limiti emissioni riferite ad un tenore di ossigeno pari all'11%

Agli impianti di potenza nominale compresa fra 0,035 Mw e 0,15 Mw, viene applicato un limite di emissioni pari a 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Possiamo notare che i valori limite siano stati normalizzati alla T=0° e P= 0,1013 Mpa. Possiamo constatare, quindi, che i limiti di inquinamento atmosferico siano stati definiti ma in realtà non vengono applicati per decisione dell'articolo 2 comma 1 del D.P.R. 25/07/91. Riportiamo di seguito un elenco delle principali normative definite dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), riguardanti i combustibili solidi legnosi non fossili e le rispettive caldaie:

E0202585 Combustibili solidi non fossili sminuzzati. Determinazione della pezzatura

UNI 9016 Legno da ardere. Classificazione

UNI 9017 Legno da ardere. Determinazione delle caratteristiche energetiche

UNI 9220 Sottoprodotti e residui agricoli. Classificazione e determinazione delle caratteristiche energetiche

UNI 9249 Biomasse. Determinazione dell'azoto totale

UNI 9250 Biomasse. Determinazione del carbonio e dell'idrogeno

UNI 10199 Impianti ad acqua surriscaldata. Requisiti per l'installazione e metodi di prova

UNI 10412 Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Prescrizioni di sicurezza

UNI 10683 Generatori di calore a legna. Requisiti di installazione

#### 1.4.1 NORMA UNI EN 3030-5:2012:

Tratta le caldaie alimentate unicamente con l'utilizzo di combustibili solidi per impianti aventi una potenza termica fino a 500 Kw.



## Capitolo 2

# IL PARTICOLATO ATMOSFERICO

Le biomasse sono state introdotte e successivamente incentivate da parte dei governi, in quanto sono in grado di generare un apporto nullo di anidride carbonica ed emettono in atmosfera una minore quantità di inquinanti gassosi. Sebbene, quindi, risultino degli importanti mezzi per salvaguardare il nostro ecosistema dall'effetto serra, non lo sono altrettanto per quanto riguarda l'immissione di particolato nell'ambiente esterno. In particolare abbiamo contribuito sempre più significativi in termini di particolato nelle cattive combustioni ed in presenza di biomasse di scarsa qualità. I principali agenti inquinanti derivanti dalla combustione di particolato sono:

**Gas acidi:** sono i principali responsabili delle piogge acide, a tale gruppo appartiene ad esempio l'anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ).

**Ossidi di azoto:** generati dall'ossidazione dei composti azotati presenti nel combustibile, si sviluppano ad elevate temperature ( $\text{NO}_x$ ).

**Composti a base di azoto:** sono i responsabili principali nella formazione degli  $\text{NO}_x$  ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ).

**Acidi solfidrici e cloridrici:** contribuiscono alle piogge acide, sono inoltre responsabili di fenomeni corrosivi ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$ ) ad elevate temperature.

**Monossido di carbonio:** ( $\text{CO}$ ) viene generato dalla non completa combustione di prodotti organici, analizzando la concentrazione del monossido, siamo in grado di capire la qualità della combustione.

## 2.1 CLASSIFICAZIONE

Per particolato ovvero particulate matter, intendiamo l'insieme di tutte quelle sospensioni presenti nell'aria (metalliche, fibre, silice, particelle carboniose), con diametri che variano da qualche nanometro fino a qualche micron e che presentano le maggiori concentrazioni nelle aree urbane ad alta densità di popolazione. In base alle dimensioni e alla natura delle particelle stesse, possiamo classificarle in vari gruppi:

1 AEROSOL: la definizione comprende particelle sia solide sia liquide aventi diametro inferiore ad 1 micrometro. Si tratta di dispersioni di tipo colloidale, ovvero particolari miscele nelle quali una sostanza si trova ad uno stato finemente disperso di dimensioni "nanoscopiche" e di una fase continua disperdente.

2 FOSCHIE: costituite da gocce di liquido aventi dimensioni inferiori a 2 micrometri.

3 FUMI: generalmente composti di particelle solide con diametro inferiore ai 2 micrometri.

4 ESALAZIONI: sono particelle solide in genere derivanti da processi chimici e metallurgici, nelle quali le particelle hanno dimensioni inferiori ad 1 micrometro

5 POLVERI: comprendono le particelle solide di diametro variabile fra 0,25 e 500 micrometri.

6 SABBIE: costituite dalle particelle solide più spesse, aventi dimensioni maggiori di 500 micrometri.

Le particelle aero-disperse hanno forme irregolari, quindi, vengono descritte tramite il diametro aerodinamico, il quale le riduce ad una sfera equivalente con densità unitaria e raggio di una sfera avente la stessa velocità di sedimentazione del particolato stesso. Il particolato si forma generalmente grazie al meccanismo della nucleazione, ovvero particelle di dimensioni minime tendono ad aggregarsi per formare particelle di dimensioni più significative. Ci sono poi delle sostanze che fungono quasi da catalizzatori, permettendo l'avvio del processo di nucleazione del particolato, come acido solforico, acqua e ammoniaca. Possiamo introdurre un'ulteriore classificazione in base alla natura del particolato:

1 particolato d'origine naturale: ovvero derivante da processi direttamente riconducibili a madre natura come gli incendi boschivi, eruzioni vulcaniche e polveri provenienti dall'erosione del suolo.

2 particolato di origine antropica: riconducibile all'azione dell'uomo, ovvero all'utilizzo di combustibili fossili e biomasse, in seguito a processi industriali e all'usura tipica del suolo e dei pneumatici delle autovetture.

Il primo gruppo contribuisce al 94% del particolato presente in atmosfera, ma è il secondo a creare maggior danno alla salute umana, in quanto presente in concentrazione maggiore nelle aree maggiormente popolate. Sempre in base all'origine, possiamo suddividere il particolato in:

1 particolato primario: viene emesso in atmosfera direttamente nella sua forma finale, può essere suddiviso a sua volta in condensabile o filtrabile, se a valle dello scarico viene emesso in forma liquida o gassosa.

2 particolato secondario: si forma in seguito a reazioni chimiche e fotochimiche, le quali avvengono in atmosfera coinvolgendo inquinanti come NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> e composti organici volatili (VOC).

Per effettuare una rapida stima sulla quantità di particolato basandoci sui concetti di particolato primario e secondario, possiamo utilizzare la formula di De Leeuw:

$$PM_{10 \text{ tot}} = PM_{\text{primario}} + NO_x * 0,88 + SO_2 * 0,54 + NH_3 * 0,63$$

Possiamo introdurre un'ultima classificazione in base al diametro aerodinamico equivalente:

PTS= particelle totali sospese, ovvero l'insieme di tutte le particelle aventi un diametro aerodinamico inferiore a 100 micrometri

PM<sub>10</sub>= frazione del particolato avente un diametro aerodinamico di 10 micrometri che viene campionato con un sistema di campionamento avente un'efficienza del 50%.

PM<sub>2,5</sub>= frazione del particolato avente un diametro aerodinamico di 2,5 micrometri che viene campionato con un sistema di campionamento avente un'efficienza del 50%. Sono circa il 60% del PM<sub>10</sub>.

## 2.2 EFFETTI DEL PARTICOLATO SULLA SALUTE UMANA

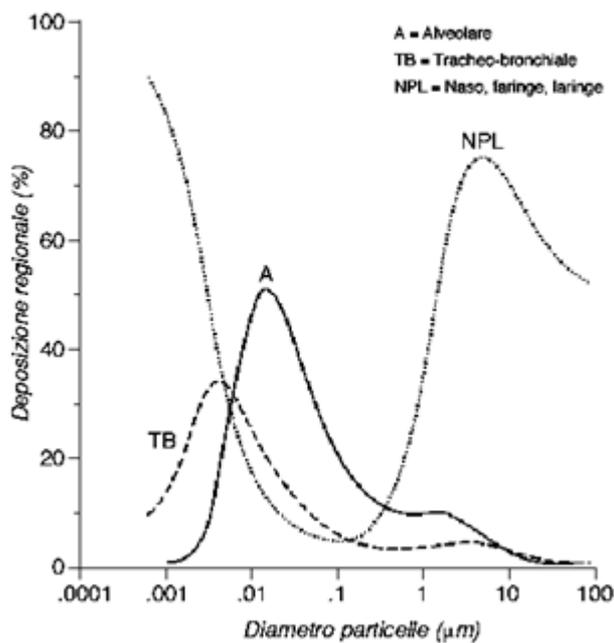
Anni fa si riteneva che fosse preponderante sugli effetti negativi del particolato sulla salute umana, il contenuto di diossido di zolfo. Ad oggi grazie a ricerche più approfondite ed a nuove sperimentazioni, si è visto che esistono altri importanti inquinanti che determinano un aumento delle malattie dell'uomo dovute all'esposizione prolungata alle polveri sottili. Il sistema corporeo maggiormente attaccato dal particolato è quello respiratorio. Le dimensioni delle particelle sono il parametro che ci permette di capire dove andranno a diffondersi attraverso il circuito respiratorio. Sapendo che in genere particelle più piccole penetrano più in profondità possiamo distinguere tre frazioni:

1 frazione inalabile: ovvero tutte quelle particelle in grado di entrare dalle narici e dalla bocca.

2 frazione toracica: comprende le particelle in grado di passare per la laringe ed arrivare ai polmoni, raggiungendo la zona tracheo-bronchiale.

3 frazione respirabile: include le particelle talmente sottili da raggiungere gli alveoli per poi venir assorbite dai tessuti.

Dal seguente grafico possiamo notare la percentuale di deposizione in una determinata regione del circuito respiratorio al variare del diametro delle particelle:



(Marconi A. 2003)

Figura 1: % deposizione regionale in funzione del diametro aerodinamico

Possiamo notare che, in genere, la penetrazione delle particelle nell'organismo segue la dimensione delle particelle stesse, tenendo presente che particelle aventi diametro aerodinamico minore, tendono a penetrare più in profondità. Dalla figura seguente si evince la penetrazione di alcune particelle nell'organismo umano:

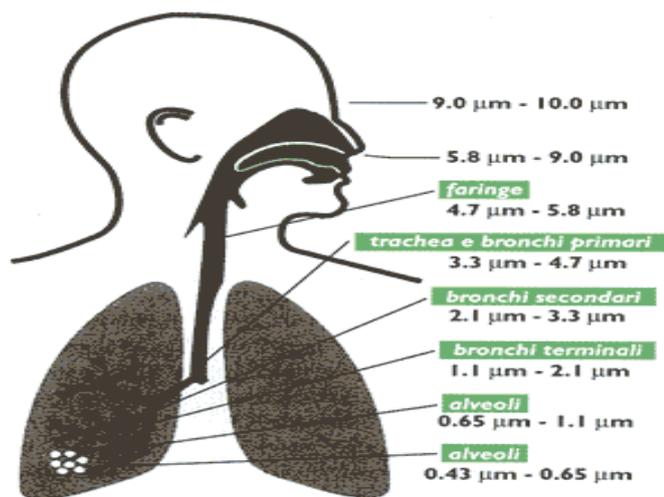


Figura 2: penetrazione delle particelle nel corpo umano

Le particelle liquide, quando vengono a contatto con le pareti dell'organismo, vengono assorbite creando dei danni nella zona interessata all'assorbimento. Lo stesso vale per le particelle insolubili, le quali, quando si depositeranno in una zona del nostro organismo verranno assorbite creando danni biologici. Prescindendo quindi dal grado di tossicità, tutte le particelle di diametro aerodinamico inferiore a 15 micrometri, passano attraverso le mucose nasali, creando danni anche gravi nel lungo periodo. Le particelle che si depositano nel tratto superiore dell'apparato respiratorio, possono provocare irritazioni e secchezza del naso e della gola, mentre quelle più piccole hanno dei tempi di residenza nell'apparato respiratorio maggiori, venendo quindi rimosse in un tempo maggiore, con la possibilità di arrivare agli alveoli e venir assorbite dal sangue, contribuendo alla generazione di malattie croniche come asma, bronchite ed enfisema. A partire dal 2013 sono state svolte importanti ricerche riguardanti la correlazione fra concentrazione del particolato ed aumento dei tumori, risultati poi pubblicati sulla rivista Lancet Oncology. Tale ricerca è stata effettuata su un campione di 300000 persone provenienti da 9 paesi europei. La ricerca ha evidenziato che ad ogni aumento di 10 microgrammi di PM10 per metro cubo di aria, i tumori in media aumentano sostanzialmente del 22%, mentre un particolare tipo di tumore, l'adenocarcinoma può salire fino al 51%.

### **2.3 PARTICOLATO PRODOTTO DALLA COMBUSTIONE DI BIOMASSA**

In seguito alla combustione di una biomassa, viene generato sia particolato primario sia particolato secondario. Considerando il particolato primario, se ne distinguono vari tipi, i quali si formano in seguito a processi diversi:

1 particolato inorganico: si crea a partire dalla frazione inerte della biomassa, la sua presenza varia in funzione della tecnologia di combustione e delle proprietà del combustibile;

2 particolato organico: si forma in genere grazie alla condensazione dei composti organici volatili (VOC) e dalla incompleta ossidazione della biomassa;

3 carbonio incombusto amorfo: si crea dove si verificano all'interno della combustione condizioni locali di miscela ricca;

4 particolato carbonioso: è presente nella combustione di quasi tutte le sostanze organiche ed è composto da una complessa miscela di sostanze organiche.

Le dinamiche di formazione del particolato carbonioso sono schematizzabili in 3 fasi, anche se le ragioni della sua formazione non sono ancora completamente note:

- Nucleazione: in seguito alla rottura degli idrocarburi dovuta al processo di pirolisi, si creano delle strutture policicliche dette IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e, nel caso in cui tali strutture non vengano ossidate, fungono da centro di nucleazione dando origine al particolato carbonioso;
- Crescita superficiale: generati i nuclei di accrescimento ricchi di idrogeno, in seguito a reazioni con l'ambiente esterno, il carbonio prende il posto dell'idrogeno, aumentando la superficie della particella;
- Coagulazione: le particelle collidono fra loro unendosi e generando delle particelle via via più grandi.

L'esperienza dimostra che la quantità di particolato carbonioso è maggiore nella combustione di biomasse in caldaie domestiche, rispetto agli impianti di grossa taglia.

Concentrandoci ora sul particolato inorganico, notiamo che la sua formazione viene determinata da 3 principali elementi:

- Metalli pesanti: zinco, cadmio, piombo
- Elementi non volatili: calcio, silicio, ferro, magnesio, alluminio
- Elementi volatili: potassio, sodio, zolfo, cloro

Gli elementi che rimangono in camera di combustione sono principalmente quelli non volatili che vengono accumulati nella base della camera, mentre solo una piccola parte di essi viene trascinata dai fumi. Le particelle più piccole con diametri inferiori ad 1 micrometro sono formate in seguito a meccanismi di nucleazione,

condensazione, crescita superficiale e coagulazione con elementi volatili. La formazione dei metalli alcalini (K, Na) avviene in due differenti intervalli di temperature, al di sotto dei 500°, in quantità modeste, ed al di sopra dei 600° in quantità più consistenti.

#### 2.4 ENTITA' DELLE EMISSIONI

La seguente tabella ha lo scopo di esaminare le differenti emissioni generate da differenti tipi di caldaie:

Generazione Caldaia	Tipo caldaia	CO (mg/MJ)	COV (mg/MJ)	PM (mg/MJ)	NOx (mg/MJ)	CO2 (mg/MJ)
Vecchie	A legna con accumulo 24 kW	5900	1500	103	67	0
Vecchie	A legna con carica legna grande	16400	4800	2200	28	0
Vecchie	A legna con carica legna piccolo	8200	3000	-	64	0
Moderne	Aria soffiata, fiamma inversa con accumulo	707	14	27	125	0
Moderne	Idem	507	33	25	111	0
Moderne	idem	3781	690	89	101	0

A pellet	A potenza nominale	30	1	13	-	0
A pellet	Funz. Inter	380	2	12	62	0
A gasolio	/	2	1	12	37	60000
Multicomb.	/	9	32	6	41	0

Tabella 1: emissioni riferite ai principali tipi di caldaie in commercio

Grazie allo studio condotto da Garcia-Maraver possiamo renderci conto della quantità di particolato ed altri prodotti di scarto emessi da una normale caldaia a pellet, considerata domestica in quanto potente 22 Kw. La ricerca ha il compito di valutare le emissioni paragonando l'utilizzo di 5 diversi tipi di pellet commerciali di cui 2 sono dei residui di pino, altri sono dei derivati della legna dei pini, altri derivano, invece, dal sughero. I test sono stati effettuati nelle seguenti condizioni:

Stage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.0282	0.0559	0.0927	0.153	0.259	0.379	0.608	0.940	1.59	2.37	3.96	6.63	9.84

**Table 3**  
Test conditions used in this study.

Pellets	Thermal load (kW)	Air inflow (kg/h)	Excess air coefficient	Gas residence time <sup>a</sup> (s)	O <sub>2</sub> flue-gas (dry volume%)
Portuguese pine	10	99	8.7	0.52	18.5
	14	97	6.2	0.53	17.5
	17	139	7.2	0.37	18.0
Spanish pine	10	143	12.2	0.36	19.2
	14	136	8.3	0.38	18.4
	17	137	7.0	0.37	17.9
Cork	10	125	9.9	0.41	18.8
	14	118	6.7	0.44	17.8
	17	124	5.8	0.42	17.3
Olive wood	10	126	9.9	0.41	18.8
	14	137	7.7	0.38	18.2
	17	129	6.0	0.40	17.4
Olive pruning	10	77	9.0	0.67	18.6
	14	92	8.0	0.56	18.3
	17	82	6.0	0.63	17.4

<sup>a</sup> Gas residence time = combustion chamber volume/reactants volume flow rate.

Figura 3: condizioni operative di svolgimento dei test

I valori di emissioni riscontrati nei test sopra citati hanno dato i seguenti risultati:

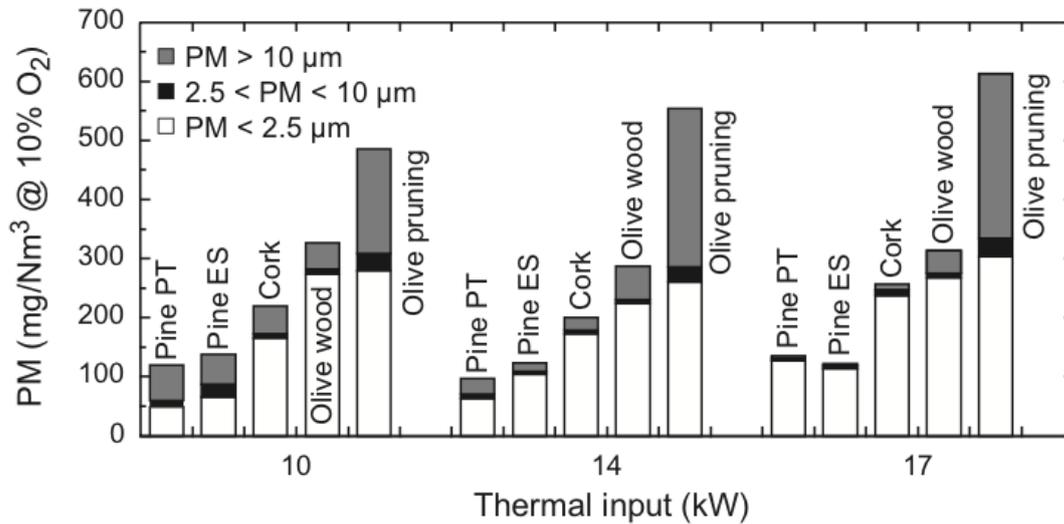


Figura 4: risultati ottenuti sperimentalmente e suddivisi in base alla grandezza

Notiamo che la quantità di particolato prodotto è molto sensibile alle condizioni di funzionamento della caldaia nonché alla qualità della combustione, con concentrazioni variabili fra i 50-800 mg/Nm<sup>3</sup>, valori superiori alle vigenti limitazioni in fatto di inquinamento per le norme relative a caldaie con potenza nominale superiore a 35 Kw. Ci sembra doveroso sottolineare il fatto che, caldaie del tipo utilizzato nell'esperimento ( P=22 Kw) non siano ancora soggette a limitazioni, nonostante creino un apporto non trascurabile di particolato nell'atmosfera in cui viviamo.

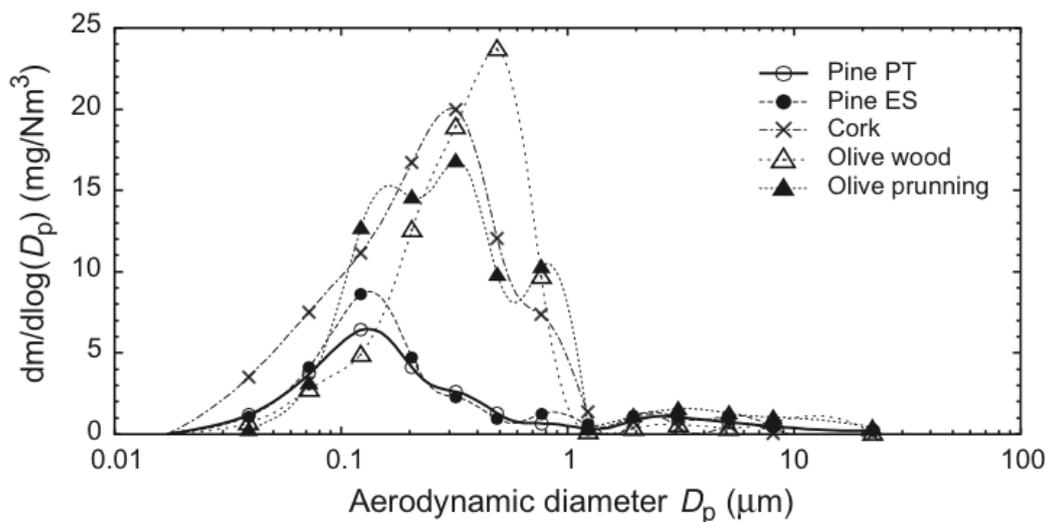


Figura 5: risultati sperimentali classificati in base al diametro aerodinamico

## 2.5 CONCENTRAZIONI SUL TERRITORIO ITALIANO

Nel decennio successivo all'inizio del secondo millennio, l'Italia non ha rispettato le norme anti-inquinamento, rilasciando in atmosfera quantità di PM10 e biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) sopra i limiti stabiliti dall'Unione Europea. Nel 2009 venne avviata una procedura nei confronti del bel paese, conclusasi nel 2012 con una condanna riferita al periodo 2006-2007 per valori superiori ai limiti di PM10 e biossido di azoto. La situazione Europea del 2011 mostra uno scenario non molto diverso dalla situazione italiana nella quale paesi come Polonia, Slovacchia, Turchia e regioni balcaniche non sono riuscite a rispettare i limiti imposti per legge.

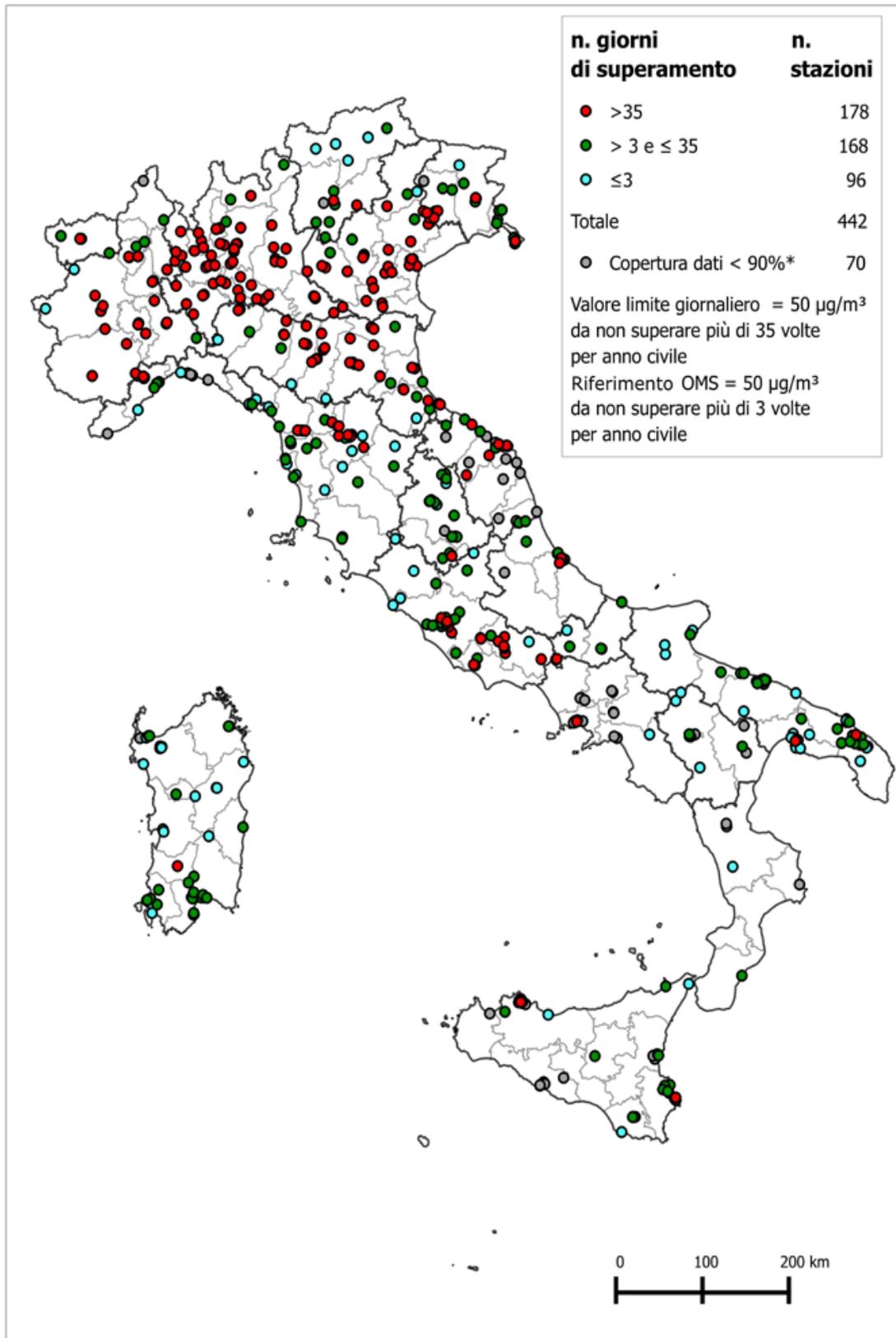


Figura 6: concentrazione PM10 in Italia nel 2012

Dalla figura sopra esposta possiamo farci un'idea delle concentrazioni di PM10 in Italia, riferite all'anno 2012. Tale immagine è stata elaborata sulla base di un'indagine condotta da ISPRA, posizionando sul territorio italiano 442 stazioni di rilevazione di PM. I risultati hanno evidenziato che il 40% delle stazioni (indicate da un pallino rosso) ha rilevato una concentrazione di PM superiore al limite giornaliero imposto di  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mentre il 78% di esse ha registrato valori superiori ai limiti imposti dall'organizzazione mondiale della sanità. Le stazioni disponibili per il calcolo del PM 2,5 sono circa 144, distribuite in maniera più o meno omogenea sul territorio italiano, hanno evidenziato che l'82% di esse hanno rispettato i limiti imposti dal valore obbligatorio giornaliero.

## Capitolo 3

# PRINCIPALI SISTEMI DI FILTRAGGIO DEL PARTICOLATO

Il seguente capitolo ha lo scopo di illustrare i principali sistemi di filtraggio dell'aria oggi utilizzati. Premettendo che migliori condizioni di combustione contribuiscono a ridurre la generazione del particolato, si verifica che le aziende produttrici di caldaie ovviamente, cercano di aumentare sempre più l'efficienza delle stesse, contribuendo in modo significativo a diminuire le emissioni dei loro prodotti e riducendo la fuoriuscita di agenti cancerogeni legati alla combustione. In base al meccanismo di rimozione utilizzato, i filtri detti “depolveratori” vengono suddivisi in quattro grandi gruppi:

- 1 filtri ad azione meccanica ( cicloni inerziali e a gravità)
- 2 filtri a tessuto
- 3 filtri elettrostatici
- 4 filtri a umido (scrubber)

Attraverso la seguente tabella operiamo un rapido confronto, dei sopracitati filtri, che approfondiremo nei prossimi paragrafi.

### 3.1 CLASSIFICAZIONE DEI FILTRI SECONDO LA NORMA CEN EN 779-2002

La seguente norma descrive l'arrestanza, ovvero la capacità di trattenere il particolato, dei principali filtri in commercio. L'efficienza dei filtri grossolani viene valutata secondo un metodo gravimetrico, mentre il rendimento dei filtri per le polveri più sottili secondo un campionamento con metodo "conta particelle". I filtri grossolani vengono definiti da una lettera G mentre quelli fini dalla lettera F, entrambi sono poi classificati con un punteggio che va da 1 a 9 in modo da quantificarne l'efficienza. Andiamo ora ad analizzare il metodo di campionamento gravimetrico, evidenziando le varie fasi del processo:

1 Filtriamo una portata nota di aria con un filtro assoluto(A), avente un'arrestanza molto maggiore dei filtri che stiamo considerando;

2 A valle del filtro assoluto immettiamo una quantità nota di polveri aventi una concentrazione di 70 mg/Nm<sup>3</sup>;

3 L'aria contenente le polveri viene fatta passare attraverso il filtro da testare, il quale è collocato a valle del filtro assoluto;

4 A valle del filtro da testare poniamo un altro filtro assoluto (C), in grado di trattenere le polveri non catturate dal filtro di prova.

Per valutare l'efficienza di cattura del filtro di prova, dobbiamo calcolare la differenza in peso prima e dopo il test del filtro assoluto C, in modo da valutare la quantità di polveri che il filtro di prova non è stato in grado di trattenere. Ovviamente, minore sarà il peso del filtro C dopo l'avvenuto test e maggiore sarà l'efficienza del filtro di prova. Calcoliamo l'efficienza grazie alla formula:

$$\eta = 1 - \frac{W_2}{W_1}(\%) \text{ dove}$$

W<sub>2</sub>= peso della polvere di prova

W<sub>1</sub>= peso della polvere trattenuta dal filtro assoluto C

Tale prova permette quindi di calcolare l'efficienza dei filtri nonché le perdite di carico in assenza ed in presenza di accumulo di polveri.

Nella seguente tabella vengono elencate le classi dei filtri secondo la suddetta norma:

Tipo filtro	Classe	Arrestanza per polvere sint.	Efficienza opacimetrica	Perdite di carico (Pa)
Grossolano	G2	65<arr<80	/	250
Grossolano	G3	80<arr<90	/	250
Grossolano	G4	90<arr	/	250
Fine	F5	/	40<E<60	450
Fine	F6	/	60<E<80	450
Fine	F7	/	80<E<90	450
Fine	F8	/	90<E<95	450
Fine	F9	/	95<E	450

Tabella 1 : classificazione filtri in base alle prestazioni definite dalla norma CEN EN 779-2002

### 3.2 FILTRI MECCANICI

Appartengono a questa tipologia di filtri tutti quei dispositivi che separano il particolato dalla corrente gassosa attraverso forze di natura meccanica, come le forze inerziali. Sono filtri adatti a lavorare particelle di dimensioni relativamente grandi,

perciò vengono definiti come filtri grossolani, in quanto le azioni inerziali hanno maggiore efficacia nel caso di particelle più massive, determinando un contributo pressoché nullo per particelle sub-microniche. Data la loro semplicità costruttiva e i bassi costi di manutenzione e d'esercizio, tali filtri sono estremamente economici ed adatti a pretrattare i fumi, prima che vengano accolti da sistemi di filtraggio per le polveri più sottili che, altrimenti, in assenza dei grossolani si intaserebbero prematuramente, determinando alte perdite di carico che si tradurrebbero in elevati costi di manutenzione e d'esercizio. Elenchiamo alcuni tipi di questi filtri grossolani ad azione meccanica, focalizzando la nostra attenzione sui pro e i contro di un loro utilizzo nell'ambito dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse:

### 3.2.1 CAMERE DI CALMA

Sono dei condotti a sezione rettangolare che si sviluppano orizzontalmente. La sezione divergente permette una rapida diminuzione dell'energia cinetica delle particelle, in modo che prima della sezione di uscita possano essere raccolte sul fondo da delle tramogge. Per il dimensionamento della camera di calma, consideriamo un parallelepipedo di dimensioni (L•A•H). La relazione di dimensionamento si basa sul fatto che il tempo necessario affinché la particella raggiunga il fondo della camera, deve essere inferiore al tempo necessario alla particella di percorrere tutto il tratto di lunghezza L, quindi:

$$\frac{L}{v} \geq \frac{H}{u} \text{ ottenendo } L = \frac{Q}{H \cdot u} \text{ essendo:}$$

Q= portata volumetrica del gas

v=Q/(sezione di passaggio)

u= velocità di deposizione della particella

PRO:

-costo minimo

-semplicità di costruzione e funzionamento

CONTRO:

-rendimenti bassissimi per particelle con diametro aerodinamico < 100 micron

-ingombri elevati

CONCLUSIONE:

questo tipo di filtro non può essere impiegato nel nostro caso in quanto non idoneo alla separazione di particolato derivante dalla combustione di biomassa

### 3.2.2 *CICLONI*

I cicloni utilizzano la forza centrifuga per la separazione del particolato, a differenza delle camere di calma che utilizzano la forza di gravità come azione separante, imprimendo ai fumi un moto rotatorio dove le particelle dotate della sufficiente massa impattano contro le pareti cadendo in una tramoggia posizionata in fondo alla struttura di filtraggio. Geometricamente sono costituiti nella parte superiore di ingresso dei fumi, da un cilindro nel quale si svilupperà un notevole restringimento di sezione, in modo da imprimere ai fumi una maggiore componente cinetica. I fumi in ingresso nella parte superiore cilindrica entrano tangenzialmente, in tal modo viene conferita ai fumi un'accelerazione centrifuga agente radialmente sulle particelle. L'efficienza dipende proporzionalmente dalla velocità dei fumi ed in maniera inversamente proporzionale al raggio di curvatura della traiettoria dei moti.

Per il dimensionamento del separatore ed il calcolo dell'efficienza procediamo nel seguente modo:

definiamo  $t$  = tempo necessario affinché la particella impatti contro la parete

$$t = \frac{W}{v(t)} \text{ dove:}$$

$W$  = lunghezza del condotto dei fumi in ingresso

$v(t)$  = velocità terminale della particella al raggiungimento dell'equilibrio fra forza centrifuga e forza di trascinamento dei fumi

$$v(t) = \frac{W}{t} = \frac{W \cdot v(g)}{(2\pi \cdot R \cdot N)}$$

nel caso di moto laminare vale la legge di Stokes  $v(t) = \frac{dp(\rho p - \rho g) \cdot v(g)}{18 \cdot \mu \cdot g}$

dove  $dp$  = diametro particella,  $\rho$  sono le densità di particella e gas,  $\mu$  la viscosità del gas e  $g$  l'accelerazione di gravità. Uguagliando le due espressioni di  $v(t)$  ottengo il diametro della più piccola particella separata ovvero:

$$dp = \frac{9 \cdot \mu \cdot W \cdot g}{\pi \cdot R \cdot N \cdot (\rho p - \rho g)}$$

tale espressione risulta valida se consideriamo che il 100% delle particelle aventi diametro maggiore di  $dp$  siano rimosse. Nella realtà ciò non accade, perciò dobbiamo considerare il diametro di taglio ovvero  $dp_c = \frac{dp}{1}$  che fa riferimento ad una efficienza di separazione del 50%.

Noti la distribuzione granulometrica dei fumi, siamo in grado di calcolare l'efficienza di separazione al variare delle dimensioni di ogni campo dimensionale del particolato tramite la seguente formula:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{dp_c}{dpi}\right)^2}$$

L'efficienza totale la calcoliamo come somma di tutti i prodotti  $\eta_i \cdot$  concentrazione in massa dell' $i$ -esimo campo dimensionale delle particelle.

Calcoliamo ora le perdite di pressione nel ciclone, introducendo il coefficiente di perdita  $Z = \frac{K \cdot H \cdot W}{De^2}$  dove K è una costante compresa fra 12 e 18 mentre De il diametro del condotto di uscita del ciclone. Le perdite totali saranno calcolate dalla seguente formula:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho g \cdot Z \cdot v(g)^2$$

Notiamo, quindi, che al fine di contenere le perdite di pressione e al fine di avere accettabili costi d'esercizio, sia necessario non esagerare con le velocità della corrente gassosa, riducendo allo stesso tempo l'efficienza di separazione la quale, invece, aumenta all'aumentare della velocità. Riassumendo, quindi, il principio di funzionamento si basa sul passaggio da un moto rettilineo della corrente gassosa, grazie all'ingresso tangenziale dei fumi, ad un moto circolare che diventa in seguito elicoidale. Ad opera delle velocità angolari, cui i fumi sono sottoposti, si sviluppano, quindi, azioni centrifughe che spingono le particelle contro le pareti del ciclone con una forza direttamente proporzionale alla massa delle particelle stesse. Il flusso dei gas in moto rotatorio discendente a metà circa della sezione tronco-conica inverte il senso di marcia, diventando un flusso ascendente poi espulso da uno scarico, mentre le particelle per effetto della forza di gravità saranno convogliate sul fondo del ciclone. Tale inversione di marcia dei fumi è dovuta alla differenza di pressione presente fra la sezione di ingresso e quella di uscita del gas. I gas in uscita dal ciclone saranno depurati della frazione di particolato più grossolano, non essendo la forza centrifuga sufficientemente elevata nel contrastare le forze di trascinamento del flusso gassoso sulle particelle più piccole. Esistono in commercio cicloni di differenti dimensioni, ognuno dei quali dedicato all'elaborazione di particelle più o meno piccole. In particolare, diminuendo le dimensioni di un ciclone, si aumenta la velocità della corrente gassosa e si diminuisce la distanza necessaria affinché la particella sbatta contro la parete. In tale modo però si diminuisce la portata che il ciclone è in grado di gestire. Per ovviare a tale problema, si dispongono più cicloni in parallelo in modo da aumentare la capacità di carico complessiva del

sistema, ovvero adottando la soluzione multi-ciclone in grado di elaborare portate di gas elevate, pur ottenendo separazione di particelle con diametri anche di 5 micron.

**PRO:**

- semplicità costruttiva
- bassi costi di impianto e d'esercizio
- assenza di parti mobili
- capacità di carico elevate con la configurazione multi-ciclonica
- rendimenti compresi fra 30 e 90% per PM10
- ridotti spazi richiesti per installazione e funzionamento
- ampio range termico di utilizzo

**CONTRO:**

- rendimenti bassi per PM 2,5 e minori
- alte perdite di carico nel caso di cicloni atti alla depurazione del particolato più sottile con conseguenti inaccettabili costi di gestione

**CONCLUSIONE:**

questo tipo di filtro opportunamente dimensionato sarebbe in grado di separare una quantità considerevole di particolato anche dell'ordine del PM5, ma con un dispendio energetico non accettabile per un sistema di filtrazione di una caldaia domestica.

### 3.2.3 *DEPOLVERIZZATORE A MANICHE*

Spesso vengono chiamati bagfilter, sono costituiti da delle sacche di materiale poroso (tessuti) i quali operano la cattura del particolato per via aerodinamica. Tali sacche sono costituite da fibre naturali o artificiali opportunamente intrecciate in modo da garantire un elevato packing density (ovvero il complemento a 1 del grado di vuoto) il quale è un termine direttamente proporzionale all'efficienza di cattura ma anche alle perdite di

carico. I meccanismi di cattura sono principalmente tre: il primo è l'impatto delle particelle sulle fibre, il secondo invece è il deposito delle particelle sulle fibre stesse, in seguito al raggiungimento di una velocità nulla delle particelle dovuta ad una diminuzione dell'energia cinetica del PM; terzo, ma non meno importante, è invece il meccanismo di cattura dovuto alla diffusione ovvero ai moti browniani delle particelle attorno alle fibre. Il meccanismo di cattura detto a diffusione "browniana" interessa prevalentemente le particelle aventi dimensioni sub-microniche, essendo il coefficiente di diffusione inversamente proporzionale al diametro aerodinamico del PM. Bisogna considerare anche il fatto che più il filtro si arricchisce di particolato e più gli interstizi di passaggio diminuiscono di grandezza, determinando un aumento della velocità interstiziale, con conseguente aumento dell'efficienza di filtraggio per meccanismi di impatto. D'altra parte più il filtro si intasa, maggiori saranno le perdite di carico, nonché i costi necessari alla sua manutenzione. Le perdite di carico risultano quindi il parametro di controllo che ci permette di capire quando dobbiamo rigenerare il filtro. Le efficienze ottenute sono elevate, anche del 99,9% per particolato inferiore a 5 micrometri. Tale sistema è costituito da moduli di tessuti chiamati appunto maniche, disposte in parallelo in modo che i fumi possano "scegliere" quali maniche attraversare, dando continuità al processo di filtraggio anche in caso di manutenzione rigenerativa. Le operazioni di rimozione della patina di particolato accumulato sulle maniche del filtro avvengono per scuotimento meccanico, per inversione del tiraggio della corrente gassosa oppure con getti di aria compressa. Lo strato di particolato verrà poi depositato per gravità in delle tramogge posizionate alla base della struttura. Un importante fattore da considerare nel dimensionamento e nella scelta dei materiali costruttivi è sicuramente la temperatura d'esercizio, così come la composizione chimica dei fumi trattati, il che determina la scelta di alcuni materiali rispetto ad altri al fine di preservare la qualità delle fibre nel periodo di funzionamento. Per la salvaguardia delle maniche vengono disposte delle sonde per il controllo della temperatura d'esercizio, che nel caso superi certi limiti, limitati superiormente dalla scelta dei materiali delle maniche, comandano l'apertura di apposite serrande permettendo l'ingresso di aria fresca.

Nel caso di temperature d'esercizio dell'ordine dei 140° vengono utilizzate fibre in poliestere, mentre per temperature prossime agli 800° si predilige l'utilizzo di fibre metalliche. Nel caso in cui il sistema gestisca portate d'aria con elevato contenuto acido e umido, è opportuno porre a monte del sistema di filtraggio una ventola con una resistenza, in modo da allontanare la temperatura dei gas dalla temperatura di rugiada, evitando così la condensazione di sostanze acide sulle fibre delle maniche, situazione che si verifica soprattutto in fase di avviamento.

#### PRO:

- elevata efficienza per qualsiasi range dimensionale del PM
- nessun problema di corrosione per l'elaborazione di fumi provenienti da caldaie a biomassa
- ingombri limitati
- assenza di liquami da trattare
- ampio range del rateo di carico del gas

#### SVANTAGGI:

- perdite di carico crescenti nel tempo
- non trascurabili interventi di manutenzione
- affidabilità delle maniche le quali hanno una vita utile in relazione alle caratteristiche del gas trattato
- possibilità di incendio o esplosione in condizioni sfavorevoli

#### CONCLUSIONE:

per quanto riguarda l'efficienza di filtrazione sono molto validi anche nella nostra applicazione, anche se presentano il difetto di avere elevati costi di manutenzione il che li rende proibitivi per un utilizzo domestico.

### 3.2.4 *DEPOLVERIZZATORE ELETTROSTATICO*

Questi filtri lavorano applicando due campi elettrici in grado di separare le particelle solide e liquide dal flusso gassoso. Sono costituiti da due tipi di elettrodi, di emissione e di raccolta. I primi generano una elevata differenza di potenziale avente il compito di ionizzare il gas, i secondi, invece, attirano verso di sé le particelle caricate precedentemente. Possiamo suddividere il meccanismo di cattura in 3 fasi distinte:

1 gli elettrodi di emissione generano una differenza di potenziale tale da ionizzare localmente il gas, generando una “corona” di ioni. L’effetto corona consiste nella ionizzazione del dielettrico (i fumi), i cui elettroni vengono accelerati con conseguente ionizzazione dei fumi.

2 tali ioni verranno attratti dall’elettrodo di segno opposto posizionato di fronte rispetto al primo elettrodo di emissione, in modo che gli ioni siano costretti ad attraversare la sezione di passaggio del gas, collidendo con il particolato caricandolo elettricamente, per poi essere a sua volta attratto dall’elettrodo di raccolta carico di segno opposto.

3 il particolato presente sull’elettrodo di raccolta dovrà essere eliminato periodicamente, attraverso un meccanismo di raccolta meccanico.

La quantità di carica ceduta dagli ioni al PM, dipende in maniera sostanziale dalle dimensioni delle particelle colpite, considerando che, per particelle di diametro aerodinamico di circa 500 nanometri, nascono dei fenomeni di carica diffusivi legati all’agitazione termica delle molecole del gas, descrivibili tramite le equazioni che governano i moti diffusivi browniani tipici di PM ultrafine. Questo tipo di filtro riesce a raggiungere efficienze superiori al 99% per quasi tutti i tipi di fumi, anche se la granulometria dei gas influenza l’efficienza di cattura, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche resistive del particolato trattato. L’esperienza dimostra che sia consuetudine applicare agli elettrodi di

emissione una polarità negativa, al fine di poter imprimere il massimo voltaggio possibile evitando fenomeni di scariche. Il sistema di alimentazione è composto di un trasformatore e da un ponte raddrizzatore, in modo da poter raggiungere valori di tensione prossimi ai 100 kV. Il sistema di pulizia consiste in un apparecchio vibrante ad azione meccanica, pneumatica o elettromagnetica in grado di staccare il particolato dalle piastre di raccolta.

**PRO:**

- elevati rendimenti per quasi tutte le granulometrie
- si tratta di un filtro a secco, quindi sono assenti sistemi di pulizia dei liquami
- perdite di carico pressoché nulle in quanto non vi sono ostacoli sul percorso del flusso gassoso
- riesce a trattare carichi elevati di fumi anche in condizioni termiche estreme

**CONTRO:**

- costi di impianto proibitivi per un utilizzo in caldaie domestiche
- ingombri elevati
- efficienza sensibile alla variazione di temperatura e portata dei fumi
- frequente manutenzione
- pericoli elevati a causa delle elevate tensioni in gioco

### *3.2.5 FILTRO A UMIDO*

Sono dei sistemi di cattura del particolato che utilizzano principalmente acqua per catturare il PM. Fondamentalmente possiamo dividerli in due grandi gruppi, i cicloni a umido ed i wet scrubber che a loro volta possono presentare notevoli soluzioni impiantistiche.

#### *3.2.5.1 Cicloni ad umido*

Funzionamento del tutto simile ai cicloni a secco, l'unica differenza è che sono utilizzati per la separazione di liquido dalla corrente gassosa. Raggiungono efficienze

prossime al 100% nel caso di gocce di diametri superiori ai 100 micron, mentre per diametri aerodinamici inferiori compresi fra 5e50 micron il rendimento di separazione non scende sotto il 95%.

### 3.2.5.2 Wet scrubber

Gli scrubber o torri di lavaggio sono pensati nell'immaginario comune come delle torri nelle quali si cerca di saturare di liquido una corrente gassosa, in modo da creare delle interazioni fra le gocce di acqua e il particolato da rimuovere. In realtà oltre ai wet scrubber, esistono i dry scrubber in cui vengono utilizzati degli agenti chimici (sospensioni in acqua di reagenti secchi). La corretta scelta nonché dimensionamento della torre di lavaggio è un processo non del tutto risolvibile in maniera analitica, bisogna infatti ricorrere all'esperienza ed alle prove sperimentali al fine di individuare la soluzione impiantistica corretta. Scegliamo la configurazione di impianto in base al tipo di fumi ed alla natura degli inquinanti, dopodiché utilizzando una serie di equazioni per lo più empiriche, procediamo al dimensionamento che va effettuato in funzione dell'efficienza stabilita dalle normative. Tornando ai wet scrubber, principalmente vengono adottati 2 configurazioni di saturazione dei fumi, la prima consiste nell'atomizzare l'acqua per mezzo di ugelli disposti in equicorrente o controcorrente, facendo in modo che le particelle inquinanti vengano raggiunte dalle gocce di liquido atomizzato, la seconda configurazione prevede invece l'utilizzo di un battente di liquido, in modo da far gorgogliare i fumi al suo interno. Tale seconda applicazione risulta abbastanza efficace per altezze del battente d'acqua di circa 0,3 m, anche se l'utilizzo viene sconsigliato nel caso non si disponga di buona quantità di energia elettrica necessaria ad azionare le ventole per vincere le perdite di carico ed assicurare il corretto tiraggio della corrente gassosa. Introduciamo ora alcuni vantaggi e svantaggi generali dei wet scrubber, solo dopo entreremo nel particolare ed analizzeremo tutte le tipologie di scrubber conosciute.

#### PRO:

- necessitano di poco spazio dato che raffreddano il gas diminuendone di volume, ciò comporta minori costi di installazione;

- le particelle inquinanti essendo catturate dal liquido, difficilmente rientrano nella corrente gassosa;

- possibilità di trattare correnti ad elevata temperatura e umidità;
- permettono l'eliminazione simultanea di particolato ed inquinanti gassosi;

**CONTRO:**

-possibilità di fenomeni corrosivi soprattutto in prossimità di battenti di liquido inquinati;

-alto consumo di energia elettrica, in quanto le perdite di carico che il gas affronta nell'attraversamento dello scrubber sono elevate, bisogna provvedere all'installazione di opportune ventole per assicurare il tiraggio dei fumi con conseguente lievitazione di costi fissi e d'esercizio;

-necessità di filtraggio dell'acqua utilizzata nella torre di lavaggio, in quanto ricca di inquinanti.

Bisogna sottolineare la necessità di introdurre un "Demister" ovvero separatore di nebbie a valle del lavaggio, in grado di separare dai fumi le gocce di liquido introdotte nel processo di lavaggio. I principali parametri che influenzano notevolmente l'efficienza di cattura sono: dimensione del particolato, dimensione delle gocce d'acqua, velocità relativa fra particolato e gocce d'acqua. Quindi, per aumentare l'efficienza della torre, dovrò generare gocce più piccole ed a maggiore densità, sapendo che per atomizzare ho bisogno di pressioni più elevate, le quali costano un inevitabile maggiore dispendio di energia elettrica, giustificando l'affermazione "maggiore efficienza di cattura maggior spesa energetica". I meccanismi di cattura delle gocce nei confronti del particolato sono generalmente impatto, intercetto e diffusione browniana, concetti che chiariremo esaurientemente in seguito nella parte sperimentale. I parametri di controllo di una torre scrubber sono essenzialmente 2:

$\Delta P$ : è importante monitorare costantemente le perdite di carico, queste sono definite come la differenza fra la pressione statica fra l'ingresso dei fumi e la pressione statica nella sezione di uscita degli stessi;

L/G: rapporto liquido gas, ovvero il rapporto fra la portata di liquido immesso rispetto alla portata di fumi in ingresso, in genere è maggiore quando abbiamo a che fare con inquinanti gassosi.

Abbiamo detto che l'energia elettrica spesa aumenta all'aumentare del rendimento desiderato, ciò vale anche se voglio catturare particolato più piccolo. Possiamo adottare un'ulteriore classificazione dei wet scrubber, differenziando le modalità con le quali introduco energia nel sistema, ovvero:

- Energia introdotta nella fase gassosa:
  - scrubber venturi
  - torri a piatti
  - scrubber inerziali
- Energia introdotta nella fase liquida:
  - eiettori venturi
  - torri a spray
- Energia fornita ad entrambi le fasi:
  - colonne ad impacchettamento o scrubber a film liquido

#### 3.2.5.2.1 Scrubber Venturi

L'energia viene fornita al gas il quale deve affrontare una sezione convergente, una gola ed una sezione divergente. Il liquido viene iniettato poco prima della gola, venendo atomizzato dall'energia posseduta dai fumi. Sono adatti alla rimozione sia di particolato sia di gas inquinanti e si dimostrano molto efficienti all'aumentare della velocità del gas e per rapporti L/G compresi fra 0,4 e 1,3. Le perdite sono elevate in genere comprese fra valori di 120 e 2500 mm/h<sub>2</sub>O per velocità comprese fra 30 e 120 m/s.

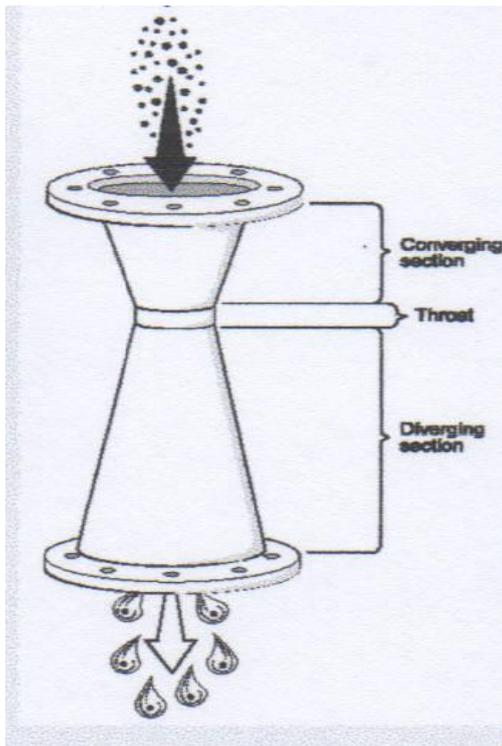


Figura 1 : scrubber Venturi

**PRO:**

- semplicità costruttiva
- assenza di parti mobili

**CONTRO:**

- rendimenti elevati solo per elevati range di velocità
- perdite di carico eccessive con enorme dispendio di energia elettrica

**CONCLUSIONE:**

Lo scrubber venturi può essere una soluzione negli impianti di grossa taglia, dove le spese energetiche di esercizio possono essere elevate. In impianti di piccola taglia come il nostro non possiamo permetterci di affrontare tali perdite di carico.

### 3.2.5.2.2 Torri a piatti

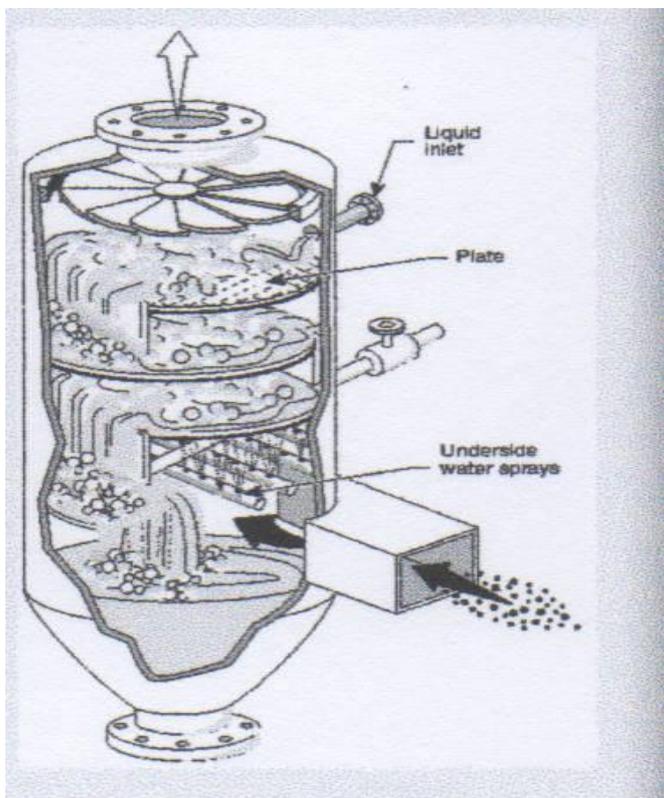


Figura 2 : torre a piatti

La torre a piatti è costituita di un recipiente cilindrico al cui interno sono collocati un numero a scelta di piatti forati, sulla cui superficie viene fatto scorrere un liquido. Il gas viene iniettato dal basso, mentre il liquido in controcorrente scorre dall'alto della torre fluendo su ogni piatto. Il gas passerà attraverso i fori di ogni piatto, venendo a contatto con il liquido. Tali sistemi sono molto efficienti per la cattura di inquinanti gassosi, ma presentano dei problemi nella cattura del particolato, anche a causa delle occlusioni che si creano nei fori dei piatti. Esistono diverse tipologie di piatti: a fori semplici, con gorgogliatore, ad impattore a valvole. L'esperienza dimostra che nel caso di cattura di particolato dai fumi, l'efficienza non aumenta al crescere del numero di piatti al disopra di 3 unità. Per migliorare il rendimento una scelta può essere quella di aumentare i fori diminuendone il diametro e lasciando invariato il grado di

vuoto ma ciò comporterebbe problemi di occlusione con conseguenti elevate perdite di carico.

PRO:

- costi realizzativi contenuti
- solidità strutturale

CONTRO:

- scarsi rendimenti per il particolato ultrafine
- notevoli problemi di occlusione con necessari interventi di manutenzione

CONCLUSIONE:

Per il nostro scopo non si prestano granché, soprattutto per la discontinuità di funzionamento derivante dalla necessità di operare manutenzioni ma anche per la difficoltà nella cattura di particolato fine e ultrafine.

#### 3.2.5.2.3 Scrubber inerziali

Gli scrubber inerziali sono maggiormente indicati nelle separazione di particolato da una corrente gassosa. I gas vengono fatti gorgogliare attraverso un battente di liquido che ne cattura il particolato. Dopo il battente di liquido il flusso viene indirizzato in opportuni canali sagomati in grado di separare la fase liquida da quella gassosa. L'efficienza dipende sostanzialmente dall'altezza del battente di liquido, infatti esso determina i tempi di contatto fra liquido e gas, nonché il coefficiente di trasferimento di massa. Chiaramente, maggiore sarà l'altezza del liquido, maggiore sarà la difficoltà che i fumi incontreranno nel passarli attraverso, ciò si traduce con elevate perdite di carico nonché costi energetici d'esercizio.

PRO:

- grande semplicità
- prestazioni elevate per elevate altezze del battente di liquido

**CONTRO:**

- problemi di corrosione in prossimità del battente di liquido se si ha a che fare con inquinanti reattivi
- perdite di carico elevate

**CONCLUSIONE:**

Tale soluzione ci ha appassionato per la sua grande semplicità realizzativa, anche se risultati accettabili si ottengono solamente con l'utilizzo di altezze di colonne di liquido proibitive per via delle perdite di carico.

3.2.5.2.4 Torri a spray

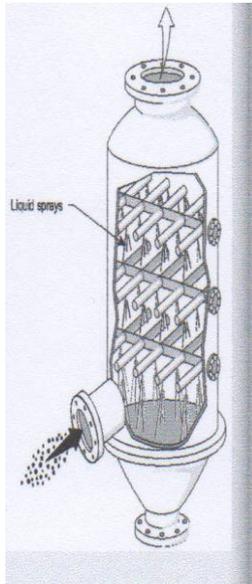


Figura 3 : torre a spray verticale

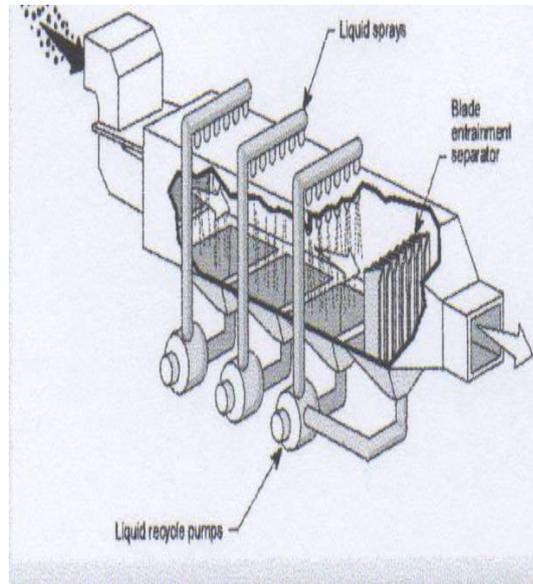


Figura 4 : torre a spray orizzontale

Costituite da recipienti cilindrici al cui interno vengono posizionati un numero a scelta di ugelli. A seconda della direzione del flusso di gas possiamo distinguere torri orizzontali o verticali. Nelle torri verticali il flusso di gas entra dal basso, mentre l'acqua viene spruzzata attraverso gli ugelli posizionati in modo da rendere omogenea la distribuzione di acqua all'interno della torre. Il liquido viene iniettato in controcorrente in modo da aumentare la velocità relativa fra gocce e particolato. L'efficienza aumenta con la diminuzione del diametro delle gocce d'acqua, anche se gocce troppo piccole determinano problemi di ritrascinamento del liquido nella corrente gassosa. Nelle spray towers orizzontali, invece, il flusso gassoso procede orizzontalmente mentre gli ugelli sono posizionati nella parte superiore del canale emettendo un flusso liquido, perpendicolare alla direzione dei fumi, dall'alto verso il basso. Tale configurazione permette un semplice circuito di ricircolo della portata d'acqua utilizzata. In definitiva, gli impianti a spray determinano perdite di carico che raramente superano i 2,5 cm di colonna di acqua, per questo vengono preferiti ai venturi quando il particolato ha dimensioni elevate. Per migliorarne l'efficienza nel caso di particolato ultrafine, è necessario atomizzare maggiormente le gocce d'acqua ed aumentare la velocità del gas, comportando naturalmente maggiori oneri energetici. Va aggiunto che in una configurazione standard si raggiungono rendimenti molto elevati per particolato superiore ai 10 micron con spese energetiche molto basse.

**PRO:**

- basse perdite di carico
- semplicità costruttiva
- nessun problema di otturazione quindi scarsa manutenzione

**CONTRO:**

-rendimenti elevati per particelle piccole ottenibili solo sostenendo costi d'esercizio proibitivi.

**CONCLUSIONE:**

Gli ugelli ricoprono un ruolo molto importante all'interno del nostro esperimento, contribuendo in maniera significativa all'efficienza totale del sistema. Inoltre permettono una grande varietà di utilizzo, infatti, variandone la pressione otteniamo differenti portate di acqua nonché dimensione delle gocce di liquido.

### 3.2.5.2.5 Eiettori Venturi

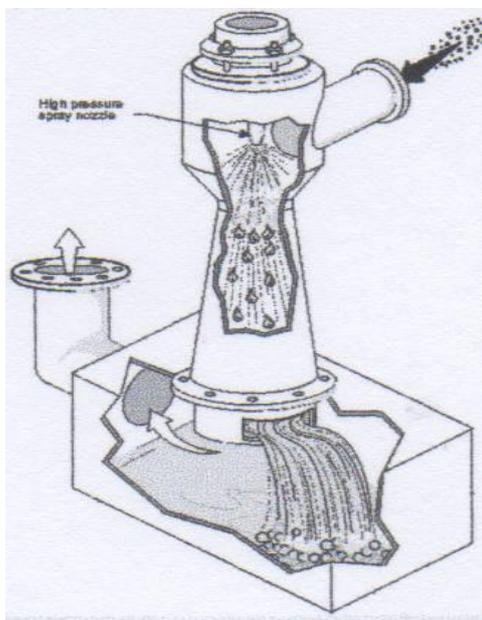


Figura 5: eiettore venturi

L'eiettore Venturi è un mix fra una spray tower ed uno scrubber Venturi. Il liquido viene introdotto nella gola per mezzo di un ugello ad alta pressione generante gocce molto piccole e aventi elevate velocità. L'ugello, inoltre, crea una depressione in grado di convogliare i gas senza la necessità di introdurre un sistema di tiraggio per i fumi. Le elevate velocità del gas contribuiscono ad un secondo processo di atomizzazione dell'acqua grazie alla turbolenza che si instaura principalmente nei pressi della gola fra il tratto convergente ed il divergente. Questo impianto è in grado di trattenere particolato di dimensioni maggiori ad 1 micron, risultando inadatto alle polveri submicroniche. Per aumentarne l'efficienza bisogna chiaramente aumentare la spesa energetica d'esercizio, aumentando la pressione dell'ugello atomizzatore nonché la velocità dei fumi o il rapporto L/G

PRO:

- buoni rendimenti per particolato superiore ad 1 micron
- semplicità costruttiva

-manutenzione quasi nulla

CONTRO:

-perdite di carico elevate

-rendimenti quasi nulli per particolato inferiore ad 1 micron

CONCLUSIONI:

trattasi di un sistema interessante per applicazioni industriali, ma che nel caso di utenze domestiche non garantisce una economia di funzionamento necessaria alle famiglie.

### 3.2.5.2.6 Colonne ad assorbimento o scrubber a film liquido

Sono costituiti da cilindri al cui interno vengono disposti dei riempimenti strutturati aventi una elevata superficie di scambio in modo da incrementare il coefficiente di trasferimento di massa. Questi “pacchi” di materiale vengono bagnati dall’alto o dal basso da opportuni ugelli. Funzionano bene sia nella rimozione di inquinanti solidi sia gassosi. Prima dell’uscita dei fumi bisogna introdurre un opportuno separatore di nebbie per la rimozione delle gocce di liquido. I parametri che bisogna gestire per aumentare i rendimenti sono:

- Solubilità del gas nel liquido: può essere aumentata aggiungendo un additivo al liquido
- Velocità dei fumi: se elevata aumenta il rendimento perché promuove fenomeni di turbolenza. Se troppo elevata rischia di allagare il letto
- Portata di liquido: se aumentata migliora il rendimento, bisogna tener conto del fatto che aumenta considerevolmente anche le perdite di carico
- Packing density: proporzionale al rendimento va quindi massimizzata perché permette maggiori aree di contatto fra fluido e gas. Principale responsabile delle perdite di carico
- Altezza del riempimento strutturato: aumentando l’altezza ottengo gli stessi benefici dell’aumento del packing density, generando quindi anche costi di impianto e d’esercizio maggiori.

E’ possibile suddividere questi filtri in 3 soluzioni operative diverse ovvero:

-flussi aria-acqua controcorrenti: favoriscono l'impatto delle gocce d'acqua sulle particelle; necessitano di un range operativo di portate e velocità abbastanza ristretto in quanto velocità del gas troppo elevate o portate di liquido eccessive generano condizioni di allagamento (flooding), con conseguente caduta del rendimento e aumento delle perdite di carico. D'altro canto mantengono alto il differenziale di concentrazione di particolato fra liquido e fluido, facendo in modo che il liquido più fresco incontri il gas pulito mentre il gas più contaminato incontra il liquido molto contaminato.

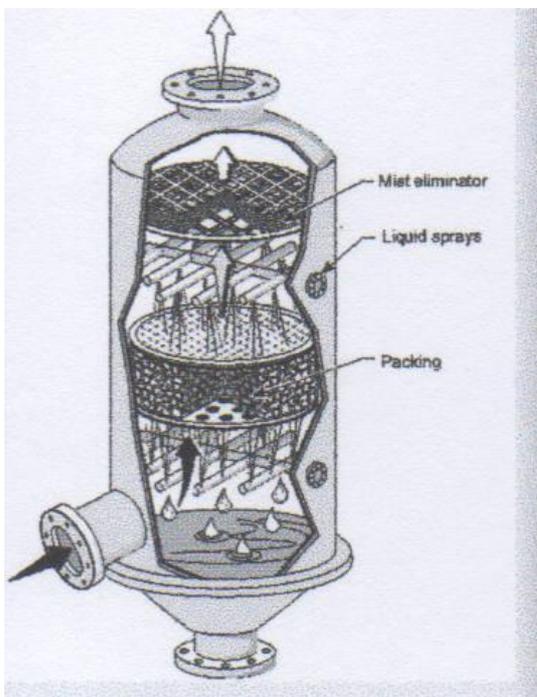


Figura 6 : colonna ad assorbimento o scrubber a film liquido flussi controcorrenti

-flussi concorrenti: adottiamo questa tipologia quando gli spazi a disposizione sono modesti, conseguentemente per ottenere un buon livello di pulizia dovremo utilizzare portate di liquido e velocità dei gas elevate. Non soffrono del problema del flooding, essendo aria e acqua in equicorrente, permettendo un range di regolazione più ampio. D'altro canto, il differenziale medio di concentrazione è minore, quindi, avrò un'efficienza di pulizia minore. In compenso le perdite di carico sono più modeste anche grazie all'effetto motore del liquido in equicorrente.

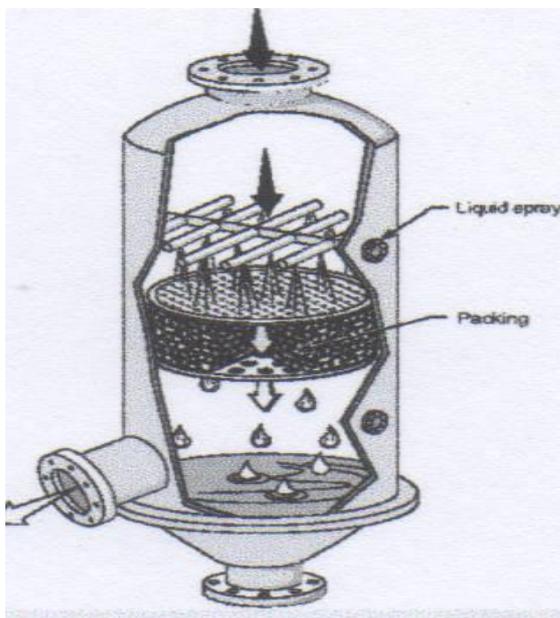


Figura 7 : scrubber a film liquido flussi concorrenti

-flusso trasverso: l'acqua viene lanciata perpendicolarmente alla direzione del flusso d'aria, lambendo orizzontalmente il riempimento strutturato. Hanno il vantaggio di realizzare dei sistemi di pulizia estremamente compatti e con basse cadute di pressione, vanno bene in applicazioni ad alta concentrazione di inquinanti, non soffrendo di particolari problemi di intasamento.

PRO:

- elevate efficienze
- accettabili perdite di carico

CONTRO:

-fenomeni di allagamento del letto

CONCLUSIONI:

I test sperimentali da noi effettuati si basano sulla concezione di questo tipo di impianto, modificando alcuni parametri in modo da ottenere le efficienze richieste per un determinato range dimensionale.

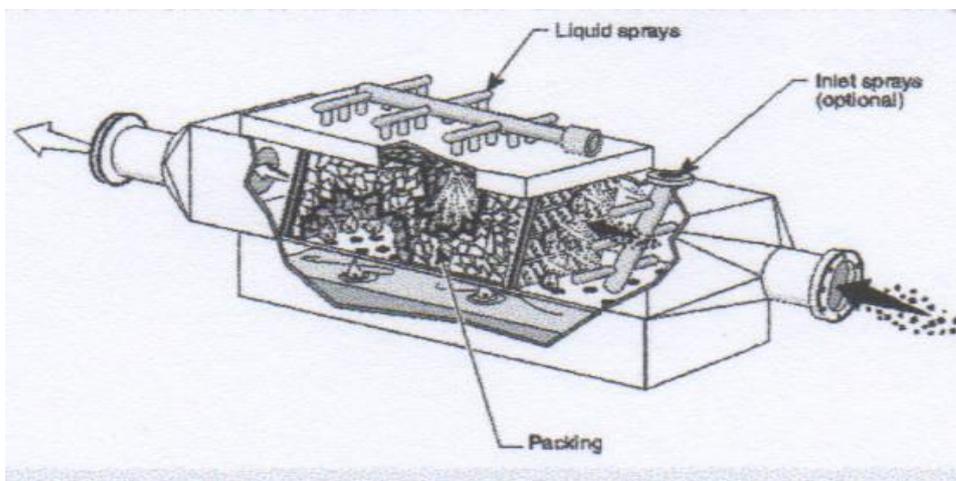


Figura 8 : scrubber a film liquido flussi trasversi

## Capitolo 4

### PARTE SPERIMENTALE

#### 4.1 STUDIO TEORICO ALLA BASE

L'utilizzo di un wet scrubber contenente una serie di ugelli più un riempimento strutturato, comporta la modellazione di vari meccanismi di cattura, avremo infatti: impatto del particolato sulle gocce atomizzate dagli ugelli, intercetto del particolato sempre ad opera delle gocce, diffusione del particolato più piccolo sulle gocce d'acqua, nonché la separazione delle gocce e del particolato ad opera del riempimento strutturato. Andiamo ora ad analizzare più da vicino i vari meccanismi di cattura.

- **DIFFUSIONE:**

il meccanismo di diffusione è utilizzato da quelle particelle aventi diametro inferiore ad 1 micrometro le quali sono soggette ai moti browniani, in cui le particelle, data la loro bassissima inerzia, non riescono a deviare completamente dalla linea di flusso del gas, passando da una linea di flusso all'altra, in modo del tutto casuale. L'apporto della diffusione migliora al diminuire della grandezza delle particelle, essendo il coefficiente di diffusione inversamente proporzionale al diametro del particolato.

$$\eta_{diff} = 0,7 \left\{ \frac{4}{\sqrt{3}} \left( \frac{1 - \alpha}{J + \sigma K} \right)^{\frac{1}{2}} Pe^{-\frac{1}{2}} + 2 \left( \frac{\sqrt{3}\pi}{4Pe} \right)^{\frac{2}{3}} \left[ \frac{(1 - \alpha)(3\sigma + 4)}{J + \sigma K} \right]^{\frac{1}{3}} \right\}$$

In accordo con il modello proposto da Jung e Lee (1998), l'equazione sopra esposta descrive il rendimento di cattura per diffusione. Andiamo a spiegare i simboli coinvolti:

$\alpha$  = packing density, ovvero il complemento a 1 del grado di vuoto  $\epsilon$  inteso come il volume della parte forata / volume totale del riempimento;

$\sigma$  = viscosity ratio of water to air

$$J = 1 - \frac{6}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{5}\alpha^2$$

$$K = 1 - \frac{9}{5}\alpha^{\frac{1}{3}} + \alpha - \frac{1}{5}\alpha^2$$

J e K sono due coefficienti idrodinamici.

$$Pe = \text{numero di Peclet} = \frac{DUr}{D_{diff}}$$

$$D_{diff} = \frac{KbTC}{3\pi\mu dp} = \text{coefficiente di diffusione}$$

Kb=costante di Boltzmann,

T=temperatura espressa in Kelvin,

$\mu$ =viscosità dinamica,

dp=diametro particella,

$$C = \text{fattore di Cunningham} = \frac{2(1,664)\lambda}{dp} \text{ se } dp < 0,05 \mu\text{m}$$

$$= \frac{2,609\sqrt{2\lambda}}{dp^{\frac{1}{2}}} \text{ se } 0,05 < dp < 1,0 \mu\text{m}$$

calcolato in accordo con l'equazione di Knudsen-Weber proposta da Lee and Liu (1980)

D=diametro goccia d'acqua,

$$Ur = \frac{1}{2}(2vg + vd, j) \text{ formulazione di Holmes(1983)}$$

Ur=velocità relativa fra la corrente gassosa e la goccia

Vd,j può essere approssimata con Uwt ovvero la velocità terminale della goccia d'acqua, tratta dall'articolo di Tawatchi Charinpanitkul et al..

$$Uwt = \left[ \frac{3gDw(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ se } Re > 500$$

$$Uwt = Dw \left[ \left( \frac{2}{225} \right) \frac{(\rho_w - \rho_a)^2 g^2}{\mu_a \rho_a} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ se } 2 < Re < 500$$

$$Uwt = \frac{gDw^2(\rho_w - \rho_a)}{18\mu_a} \text{ se } Re < 2$$

Con  $g$ = accelerazione di gravità

$\rho_w$ =densità dell'acqua

$\rho_a$ =densità dei fumi

$D_w$ =diametro della goccia

$\mu_a$ =viscosità dei fumi

In conclusione il rendimento per diffusione aumenta se:

1 diminuisce la velocità delle gocce d'acqua

2 diminuisce il diametro delle particelle

- **INTERCETTAZIONE:**

è il meccanismo di cattura preponderante per tutte quelle particelle aventi diametri compresi fra 0,1 e 1 micron e che, pur seguendo le linee di flusso del gas, vengono comunque intercettate dalle gocce. Una stima dell'efficienza di cattura delle particelle utilizzando questo meccanismo viene calcolata in accordo al modello proposto da Jung e Lee:

$$\eta_{int} = \frac{1 - \alpha}{J + \sigma K} \left[ \left( \frac{R}{1 + R} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{R}{1 + R} \right)^2 (3\sigma + 4) \right]$$

Dove  $R = \frac{dp}{D}$  viene detto parametro di intercetto.

Il rendimento di intercetto aumenta se:

1 aumenta  $dp$

2 aumenta  $\alpha$

3 diminuisce  $D$ =diametro gocce d'acqua

D'altro canto il rendimento di intercetto si dimostra alquanto insensibile alle variazioni di velocità del flusso, cosa che non accade per i rendimenti di diffusione e impatto che, invece, risentono sensibilmente delle condizioni dinamiche della corrente dei fumi.

- IMPATTO:

è il meccanismo di cattura prediletto per tutte quelle particelle aventi un diametro aerodinamico superiore ai 2,5 micrometri e aventi una velocità di almeno 0,3 m/s. Il parametro adimensionale che descrive questo processo è il numero di Stokes:

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 (U_{wt} - U_{pt})}{18\mu D}$$

Dove:

$\rho_p$ =densità del particolato

$U_{wt}$ =velocità terminale della goccia

$U_{pt}$ =velocità terminale del particolato

$\mu$ =viscosità dinamica del gas

$D$ =diametro della goccia

Un numero di Stokes elevato si traduce come una maggiore possibilità che la particella impatta contro una goccia d'acqua. Secondo la formulazione di Licht (1988) il contributo del rendimento d'impatto deriva dalla seguente formula:

$$\eta_{imp} = \left( \frac{Stk}{Stk + 0,35} \right)^2$$

• RENDIMENTO DEL RIEMPIMENTO STRUTTURATO

L'utilizzo di un separatore di gocce nonché particolato, ci ha permesso di ottenere dei benefici sostanziali nella separazione del particolato dalla corrente gassosa. Il riempimento ha lo scopo di imprimere al flusso dei fumi un percorso tortuoso costituito di canali a zig-zag, le particelle essendo spinte contro le pareti delle curve realizzate dalla tipica geometria dei canali ne rimangono attaccate, separandosi dalla corrente gassosa. In questo paragrafo illustrerò unicamente l'equazione che determina l'efficienza di cattura, rimandando in seguito una più accurata descrizione del "chevron separators". L'equazione analitica per il calcolo dell'efficienza di separazione è stata ottenuta risolvendo un bilancio di forze su una particella presente nei canali del separatore, assumendo:

- 1 flusso di Stokes: numero di Reynolds molto basso, ovvero forze viscoso preponderanti rispetto le forze convettive;
- 2 riduzione del problema al caso bi-dimensionale;
- 3 effetti gravitazionali trascurabili;
- 4 distribuzione omogenea della dimensione del particolato;
- 5 flusso di gas costante;
- 6 velocità radiale della particella trascurabile;
- 7 velocità tangenziale della particella uguale a quella del gas.

Il sistema risolutivo proposto da Crow and Pratt (1974) è il seguente:

$$Vd, \Delta\tau = v - (v - vd, o) \exp\left(\frac{-\Delta\tau}{\Delta\tau cd}\right) - \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{\Delta\tau cd}\right)\right] \frac{\Delta\tau cd \cdot vd \cdot ud}{r}$$

Il pedice "o" indica le condizioni iniziali.

Tramite opportune modifiche, giungiamo alla forma finale del rendimento di separazione che appare come segue:

$$\eta = 1 - \exp \left( -\frac{\Delta\tau v \varphi}{\delta r} (n + 1) - \frac{(\Delta\tau v)^2 \left( 1 - \exp \left( -\frac{L}{\Delta\tau v} \right) \right)}{\delta r \cdot Ro} (n - 1) \right)$$

Dove:

$\Delta\tau$ = tempo di rilassamento di una particella= $\frac{\rho p \cdot dp^2}{18\mu g}$

Con  $\rho p$  densità della particella,  $dp$  diametro della particella e  $\mu g$  viscosità dinamica del gas.

$L$ =lunghezza del tratto rettilineo

$\varphi$ =angolo interno della curva

$\delta r$ =spessore del canale di passaggio dei fumi

$Ro$ =raggio di raccordo( nel nostro caso pari a  $\delta r$ )

$v$ =velocità tangenziale del gas

$n$ =numeri di stadi del separatore

•RENDIMENTO TOTALE:

il rendimento complessivo è valutato come la somma dei contributi di diffusione, intercetto, impatto e del separatore:

$$\eta_{tot} = \eta_{diff} + \eta_{int} + \eta_{imp} + \eta$$

## 4.2 RISULTATI TEORICI CON L'UTILIZZO DEL CALCOLATORE

Prendendo le equazioni fornite dalla bibliografia, ho implementato con l'utilizzo di excel delle simulazioni per valutare quali realmente siano i migliori parametri da utilizzare al fine di massimizzare i rendimenti del separatore e dell'intero impianto. Le stesse equazioni verranno in seguito utilizzate per modellare i risultati sperimentali ottenuti nei laboratori del "Lazzaretto" di Bologna. Microsoft excel dispone di un utile componente aggiuntivo chiamato "risolutore" che permette di eseguire delle analisi di simulazione. Posso utilizzare il risolutore per trovare il valore ottimale di una formula contenuta in una cella detta "cella obiettivo", utilizzando variabili presenti in altre celle, le quali dovranno essere contenute entro determinati limiti e regolate da opportuni vincoli.

### 4.2.1 OTTIMIZZAZIONE DEL SEPARATORE

L'analisi di ottimizzazione è stata effettuata su un "demister" avente i cosiddetti "straight wall section"(figura 1), costituito da una serie di canali a zig-zag in cui le curve non presentano raggio di raccordo. Abbiamo scelto questo tipo di geometria, perché più performante rispetto ai "wavy vane separator"(figura 2), in cui i condotti hanno una geometria ondulatoria.

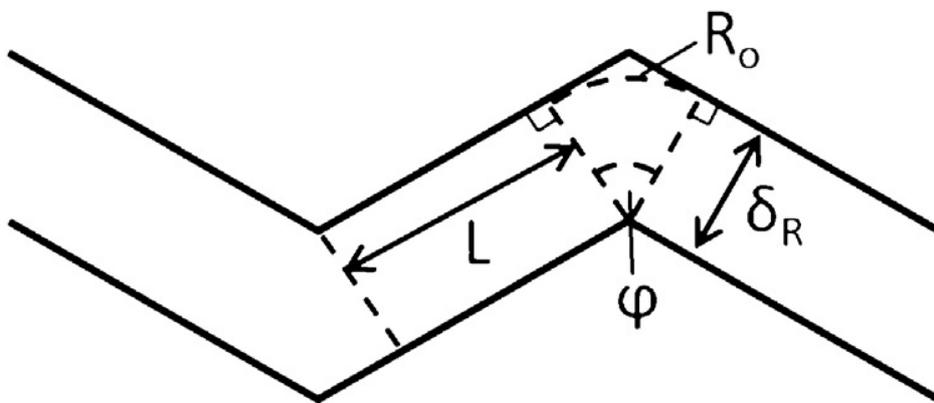


Figura 1 “straight wall section separator”

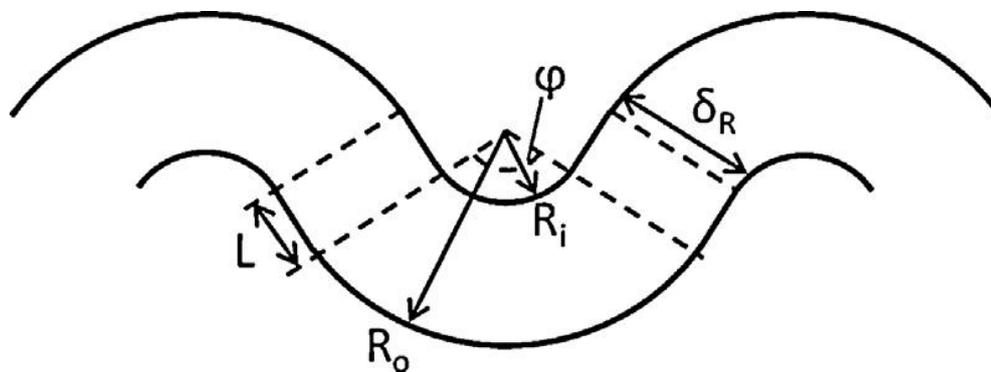


Figura 2 “wavy vane separator”

Il separatore da ottimizzare è stato pensato come un blocco di lamiere a zig-zag e spesse 0,001 m, messe in parallelo e distanziate fra loro in modo da determinare canali di passaggio larghi 0,001m mantenendo il grado di vuoto della struttura al 50%. Il cubo così composto avrà un lato di 0,1697m così da poter essere introdotto nella nostra torre avente diametro di 0,24m. Il motivo della realizzazione di un quadrato oltre che per semplicità costruttiva è quello

di determinare un'ulteriore diminuzione di sezione aumentando così la velocità e quindi l'inerzia dei fumi nonché delle particelle.

L'ottimizzazione prevede la ricerca del massimo rendimento di separazione del particolato dalla corrente fluida, variando i parametri:

$L$  = lunghezza della sezione dritta (m)

$n$  = numero di stadi ovvero numero di curve consecutive

$\varphi$  = angolo compreso fra le 2 normali uscenti dal vertice della curva (rad)

$\delta r$  = spessore dei canali di passaggio (m).

Richiedendo al risolutore di trovare il valore dei parametri costituenti la funzione del rendimento di separazione in modo da ottenere  $\eta=1$ , abbiamo ottenuto come soluzione l'assurda possibilità di realizzare un separatore costituito da ben 4553 stadi, comportando un'altezza del riempimento superiore di gran lunga superiore ai limiti imposti da esigenze di ingombro. Abbiamo fatto variare allora questi valori nei seguenti intervalli:

- $0,015 \text{ m} < L < 0,036 \text{ m}$
- $25 < n < 45$
- $100^\circ < \varphi < 140^\circ$
- $0,0009 \text{ m} < \delta r < 0,01 \text{ m}$

I valori che massimizzano il rendimento del separatore considerati i range delle variabili sopracitate sono:

$L = 0,018268 \text{ m}$

$n = 45$

$\varphi = 140^\circ$

$\delta r = 0,001 \text{ m}$

per i quali otteniamo rendimenti teorici di separazione abbastanza elevati come possiamo vedere dal grafico sottostante:

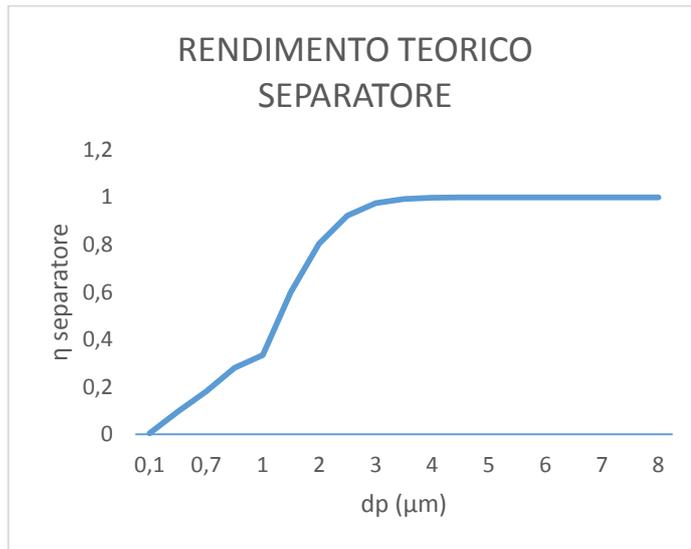


Figura 3: rendimento teorico del separatore

Come possiamo vedere le efficienze sono unitarie a partire dai 2,5 μm.

Per completare l'analisi teorica introduco l'ultimo grafico relativo all'efficienza teorica totale di un impianto avente stessi parametri dell'impianto testato a Bologna, ma con l'utilizzo del separatore ottimizzato:

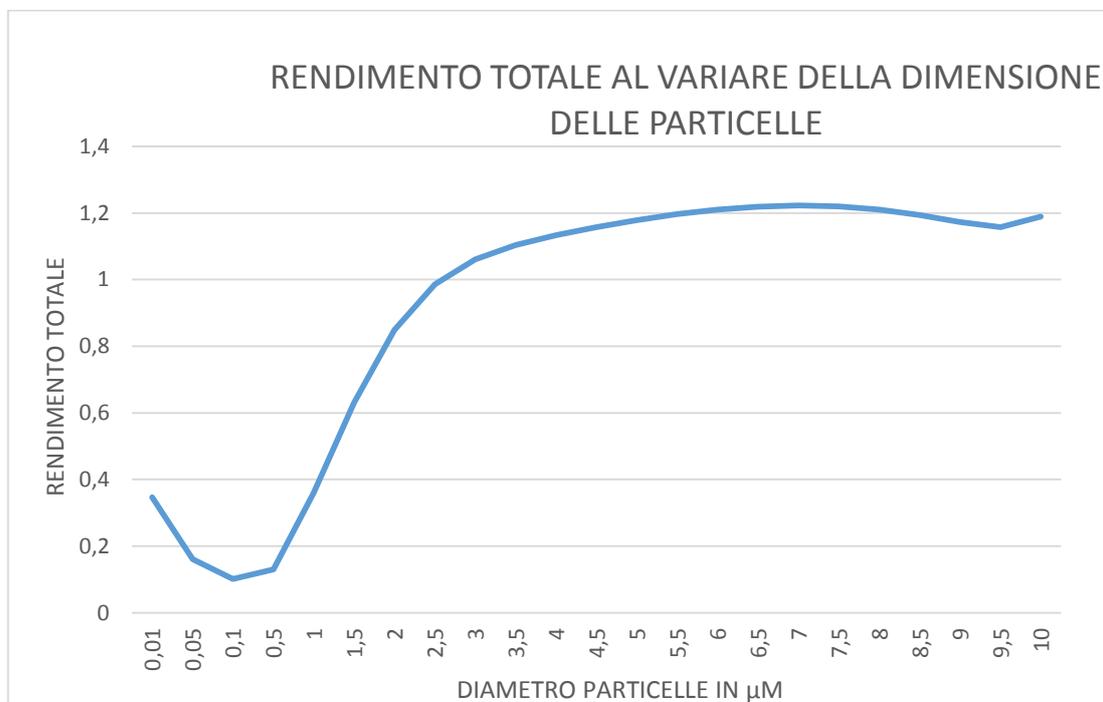


Figura 4 : rendimento teorico torre di lavaggio con separatore ottimizzato

#### 4.2.2 CALCOLO TEORICO DELLE PERDITE DI CARICO

Per il calcolo teorico delle perdite di carico all'interno del nostro riempimento strutturato ho utilizzato un'equazione basata su una correlazione proposta da Bravo et al. (1986) e valida per un generico riempimento strutturato:

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = \frac{f \cdot \rho g \cdot U g e^2}{S} = 6792,88 \text{ Pa} = \text{perdite per metro di riempimento}$$
$$\Delta P(0,45\text{m}) = 6792,88 \cdot 0,45 = 3056,796 \text{ Pa}$$

Con:

$$f = \text{friction factor} = 0,177 + \frac{88,774}{\text{Reg}}$$

$$\text{Reg} = \text{numero di Reynolds del gas} = \frac{U g \cdot S \cdot \rho g}{\mu g}$$

$\rho g$  = densità dei fumi

$\mu g$  = viscosità dei fumi

S = spessore canali di passaggio del separatore

$$U g e = \text{velocità effettiva del gas} = \frac{U g, \text{in}}{\sin(\vartheta) \cdot \epsilon}$$

$\vartheta$  = angolo di inclinazione dei canali di passaggio rispetto all'orizzontale

$\epsilon$  = grado di vuoto

La scelta, quindi, dei parametri ottimizzanti il separatore è stata fatta, oltre che per esigenze di spazio, per limitare le perdite di carico che si traducono in consumi energetici, i quali sono il parametro più gravoso nella scelta di un sistema di filtraggio che per un utilizzo domestico, deve rientrare in un range

caratterizzato dal tipo di abbonamento energetico di cui una abitazione dispone, considerando che le case italiane in genere dispongono di non più di 3 Kw.

#### 4.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

##### 4.3.1 CALDAIA

La caldaia utilizzata nel nostro impianto per la sperimentazione sui processi di filtraggio fa parte della nuova ditta ECOFABER(ex AL.PI), modello RISPARIOLA RPM 20.



Figura 1 : Caldaia all'atto dell'acquisto

Figura 2 : informativa prodotto

Costruttore	AL.PI
Caldaia tipo	RISP20
Anno di costruzione	2005
N.F:	R0350706
Contenuto acqua	25 litri
Alimentazione	Mais, pellet
Pressione di prova idraulica	4,5 bar

Pressione massima di esercizio	3 bar
Temperatura massima di esercizio	100°
Potenza massima focolare	20 Kw
Potenza massima utile	15 Kw
Potenza minima utile	9 Kw

Dati presenti in figura 2

Il quadro della caldaia necessita una potenza di 300 W alimentata mediante tensione a 230 V+ fase + neutro.

#### 4.3.1.1 Comandi caldaia

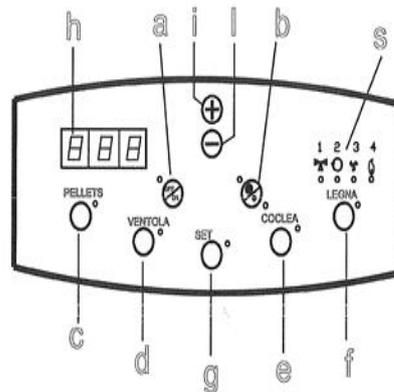
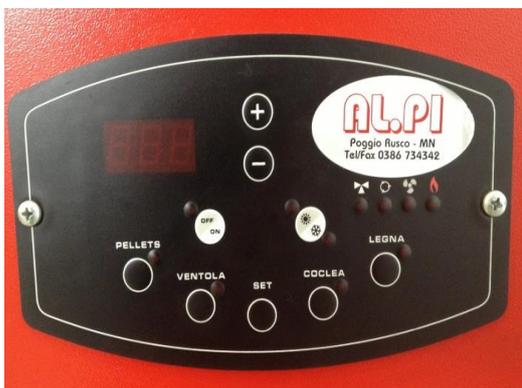


Figure 3,4: pannello di controllo della caldaia

Diamo una rapida descrizione dei pulsanti presenti nella scheda di comando:

- a): diamo tensione con il pulsante verde luminoso, dopo di cui il led OFF si illumina perché la scheda è correttamente alimentata, per accendere la caldaia basta premere il tasto in posizione ON
- c): premendo questo pulsante scegliamo il tipo di combustibile che la caldaia andrà a bruciare

**d)**: ventola aspirazione fumi, nella caldaia Risparmiola devono essere sempre al 100%

**e)**: selettore del periodo del motoriduttore della coclea, in modo da regolare la quantità di combustibile che andrà nel braciere. Premendo questo tasto, sul display appare il periodo di lavoro della coclea in decimi di secondo. Dopo ogni periodo di lavoro corrisponde una pausa, in modo tale che la somma tempo di lavoro più pausa sia uguale a 10s. Esempio: regolando il periodo di lavoro della coclea a 20 ( 2 secondi), la successiva pausa sarà di 80 (8 secondi) in modo che la somma dia 10 secondi.

#### 4.3.1.2 Curva caratteristica della coclea con alimentazione a mais

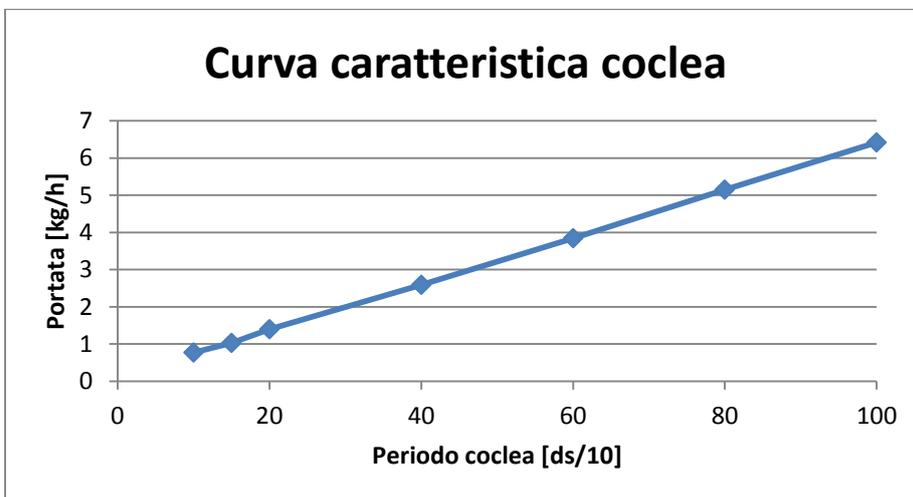


Figura 5 : curva caratteristica coclea alimentazione mais

La relazione fra la portata G di combustibile immesso in caldaia e il periodo t della coclea è la seguente:

$$G = 0,0629 \cdot t + 0,1062$$

#### 4.3.1.3 Curva caratteristica dell'aspiratore fumi

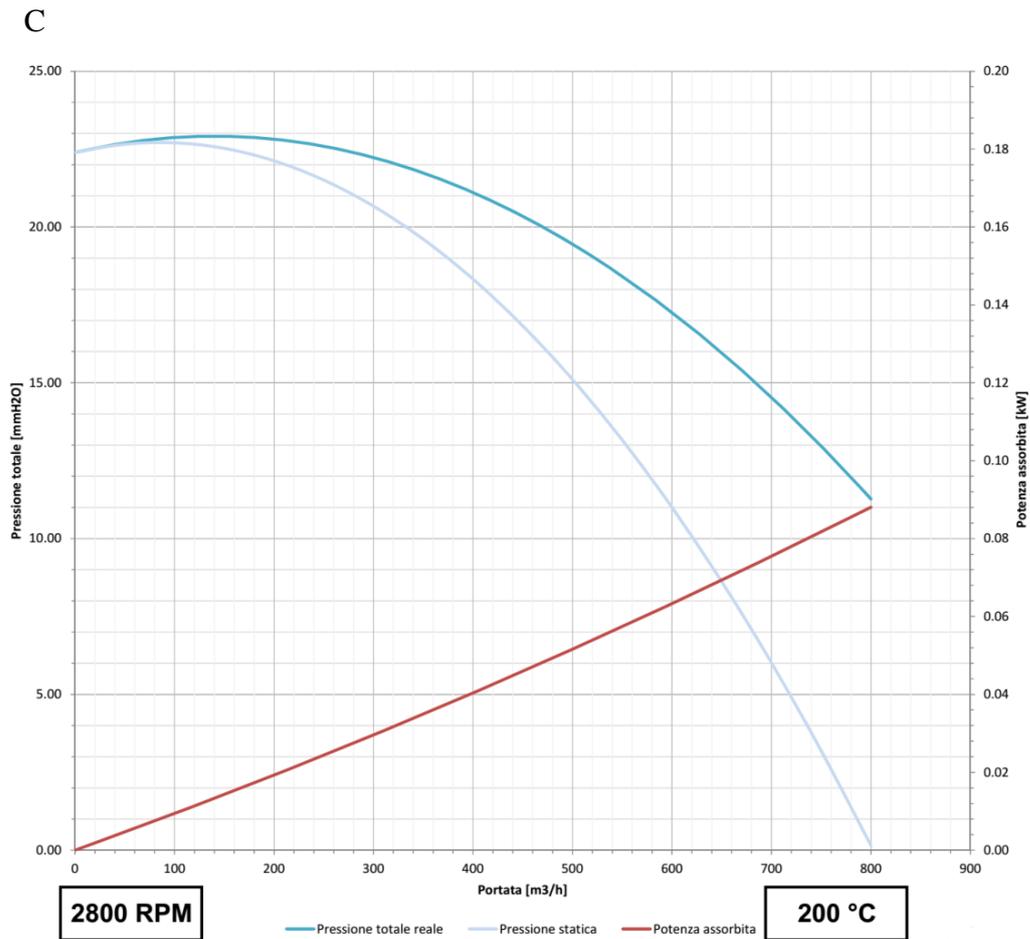


Figura 6 : curva caratteristica aspiratori fumi caldaia, fonte T.G.T

#### 4.3.1.4 Circuito per lo scarico termico

Nella parte superiore della caldaia, nel serbatoio di raccolta dell'acqua, è stato posizionato uno scambiatore di sicurezza, in modo da evitare dei picchi di temperatura. Tale scambiatore è collegato alla rete idrica e scarica direttamente in fogna.

### 4.3.2 CIRCUITO IDRAULICO:

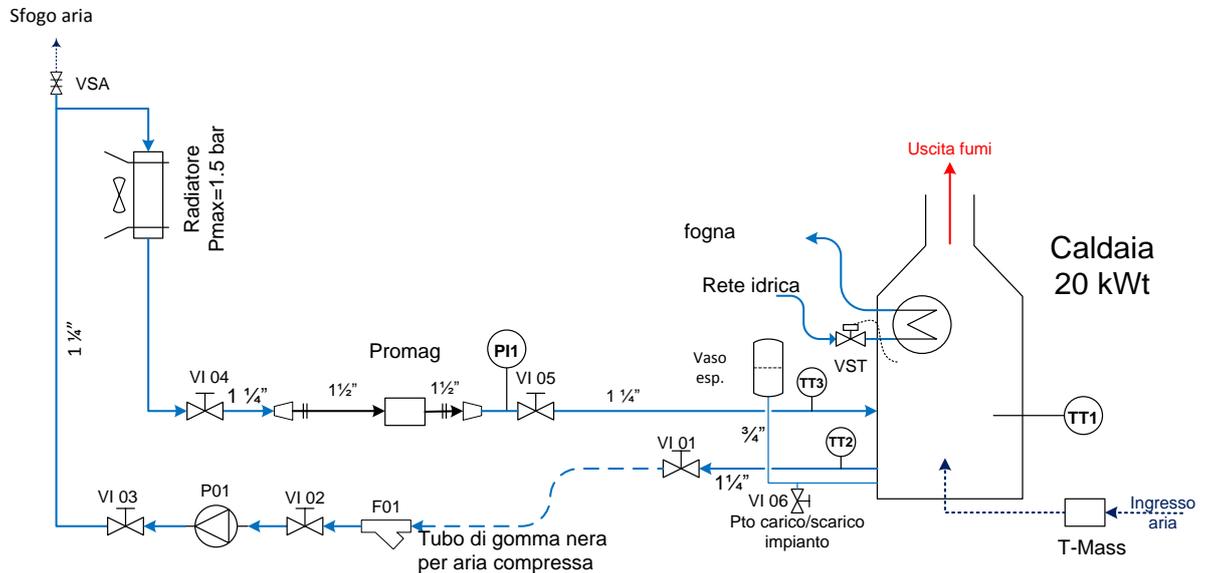


Figura 7 : P&I circuito idraulico caldaia

Lo scopo di questo P&I è quello di fornire una disposizione il più possibile fedele alla realtà, specificando solo nell'apposito capitolo tutta la strumentazione utilizzata.

SIGLA	STRUMENTO	SIG LA	STRUMENTO
F01	Filtro anti-impurità	VI01	Valvola a sfera 1 1/4
P01	Circolatore ksb-rio C30- 40	VI02	Valvola a sfera 1 1/4
PI1	Manometro 0-10 bar	VI03	Valvola a sfera 1 1/4
PROMAG	EH promag 10P40	VI04	Valvola a sfera 1 1/4
RADIATORE	furgone Iveco 100 cv	VI05	Valvola a sfera 1 1/4
T-MASS	Anemometro a filo caldo	VI06	Valvola a sfera 1 3/4
TT1	EH TAF 12D (termocop.)	VSA	Valvola sfogo aria (jolly)
TT2	EH RTD TST 90 (pt100)	VST	Valv. scarico termico(95°)
TT3	EH RTD TST 90 (pt100)	V.E.	Vaso espansione riscald.

Tabella 1: componenti circuito idraulico caldaia

#### 4.3.2.1 Radiatore



Figura 8 : radiatore impianto idraulico caldaia

Il radiatore ha lo scopo di mantenere la temperatura in caldaia sotto controllo. La sua accensione può essere comandata o manualmente dal quadro di controllo della caldaia, oppure partirà e si spegnerà automaticamente a seconda del range di temperatura impostato nel programma Labview. La pressione massima di esercizio dell'impianto idraulico della caldaia è di 1 bar, oltre tale valore massimo rischiamo di danneggiare irrimediabilmente il radiatore.

### 4.3.2.2 Pompa di circolazione



Figura 9 : pompa di circolazione KSB RIO C30-40

la cui curva caratteristica è la seguente:

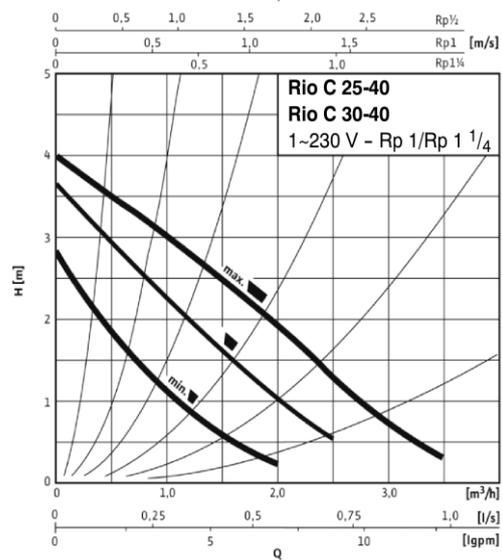


Figura 10: curva caratteristica pompa

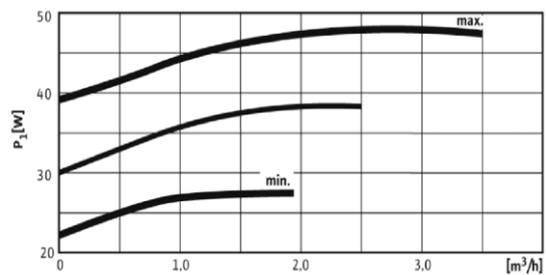


Figura 11: curva di assorbimento pompa

Notiamo che la pompa è stata progettata per funzionare a 3 differenti velocità, in grado di elaborare una portata di:

- 1) 43 l/min
- 2) 34 l/min
- 3) 25 l/min

#### 4.3.2.3 Valvola di scarico termico di sicurezza

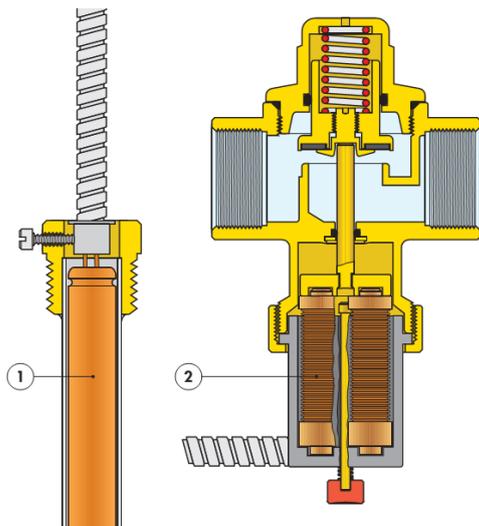


Figura 12: valvola scarico termico

Questa valvola di sicurezza è costituita di un elemento sensibile (1) immerso nel recipiente dell'acqua di caldaia. Quando la temperatura è elevata, abbiamo un passaggio di stato dell'acqua, tanto che il vapore in pressione spinge sui soffietti espandibili (2) i quali alzano l'otturatore determinando uno sfogo di sicurezza.

#### 4.3.2.4 Valvola di sfogo dell'aria (Jolly)

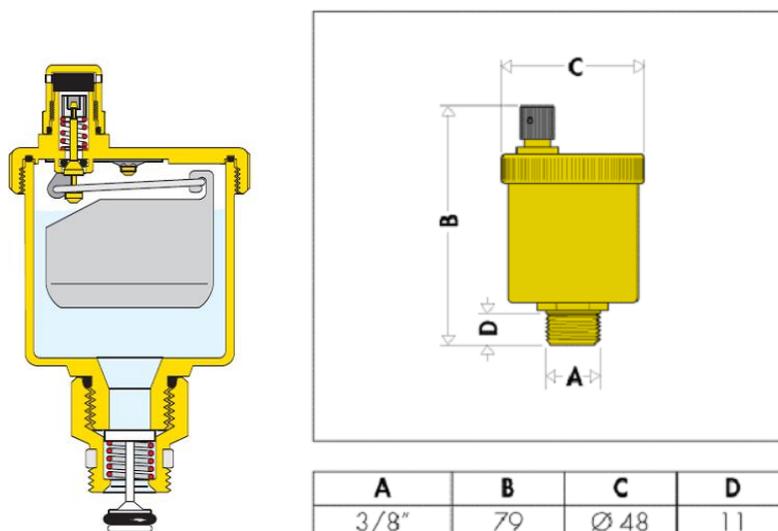


Figura 13: jolly

La valvola di sfogo dell'aria installata nel circuito ricopre un ruolo essenziale tipico negli impianti di climatizzazione. In genere posizionata nel punto più alto dell'impianto dove è più probabile che vengano raccolte delle sacche d'aria, opportunamente eliminate dallo sfiato della Jolly. La presenza di aria all'interno del circuito idraulico è dannosa per i seguenti motivi:

- rischio cavitazione della pompa
- diminuzione rendimento degli scambiatori
- fenomeni corrosivi dovuti alla presenza di ossigeno

Il principio di funzionamento è molto semplice, infatti con l'accumularsi di bolle d'aria, il galleggiante della jolly si abbassa, determinando l'apertura di un orifizio per lo scarico in atmosfera dell'aria presente nell'impianto. Il corretto funzionamento della valvola viene garantito fintanto che la pressione dell'acqua rimane sotto i 2,5 bar.

#### 4.3.2.5 Vaso di espansione

Il vaso di espansione è un componente in grado di mettere in pressione il fluido o di compensarne eventuali dilatazioni. E' costituito da un contenitore suddiviso in due regioni separate da una membrana flessibile in plastica. Una regione del vaso viene caricata con aria o azoto in pressione, mentre l'altra metà è collegata direttamente al circuito idraulico. Con questa configurazione le autoclavi a membrana sono in grado di compensare le dilatazioni del liquido dovuto all'aumento di temperatura in un impianto a circuito chiuso, oppure a rilasciare del liquido in caso di necessità come

avviene negli impianti di pressurizzazione. Il nostro vaso di espansione è in grado di lavorare fino a temperature di 100°, situazione irraggiungibile visto che la valvola a scarico termico è tarata sui 95°. La pressione massima di esercizio è di 8 bar, ampiamente superiore al nostro range di utilizzo.

#### 4.3.2.6 Riempimento impianto idrico della caldaia

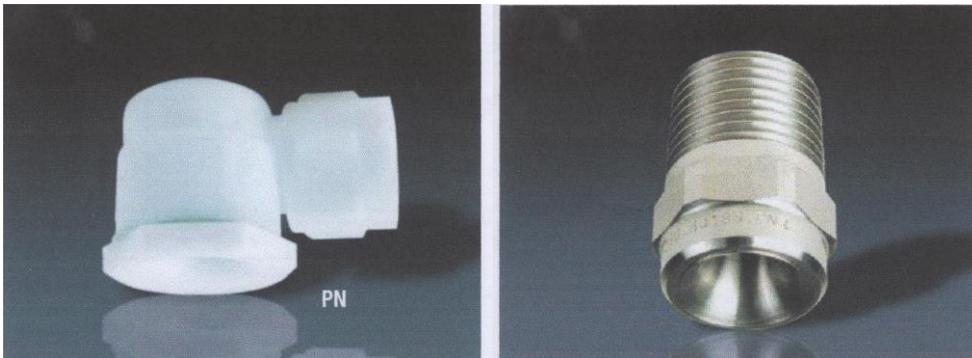
Una volta allacciati tutti i collegamenti, si procede, prima della messa in opera dell'impianto, al riempimento del circuito idrico della caldaia secondo questi passaggi:

- a) aprire la valvola VSA di sfiato dell'aria, bisogna svitare leggermente il tappo che si trova sulla sua sommità;
- b) Collegare la rete idrica alla caldaia, a tal proposito utilizzare il punto predisposto nel condotto di collegamento della caldaia con il vaso di espansione.
- c) Con la linea dell'acqua già alimentata, aprire il rubinetto
- d) Lasciare che l'acqua prenda il posto dell'aria nel circuito
- e) Chiudere il rubinetto di carico e le valvole di sfiato automatico
- f) Avviare la pompa per eliminare eventuali sacche d'aria,
- g) Spegnerne al pompa
- h) Riaprire la valvola VSA
- i) Ripetere le operazioni da f a h fino a che non si è sicuri di aver eliminato l'aria presente nel circuito
- j) verificare la tenuta idraulica dell'impianto, delle giunzioni, delle guarnizioni,
- k) verificare il regolare funzionamento delle pompe, la circolazione dell'acqua, la pressione d'esercizio.
- l) Scollegare l'alimentazione dell'acqua dal rubinetto di alimento e collegarla alla valvola di scarico termico (a tale proposito entrambe le valvole sono provviste di attacchi rapidi)

#### 4.3.2.7 Impianto idraulico torre di lavaggio:

nella torre di lavaggio abbiamo introdotto degli ugelli, necessari al lavaggio dei fumi provenienti dalla caldaia. A seconda delle prove, sono state utilizzate varie

configurazioni degli ugelli, scegliendo fra ugelli a cono pieno o a cono vuoto. Nello specifico le prove effettuate saranno spiegate in dettaglio più avanti, ora ci limitiamo ad introdurre solamente le tipologie di ugelli adottati.



Gli ugelli sopra esposti hanno le seguenti caratteristiche tecniche:

1) CONO VUOTO:

- angolo di apertura del cono del getto: 130°
- portata alla pressione di 3 bar di 1,7 l/min

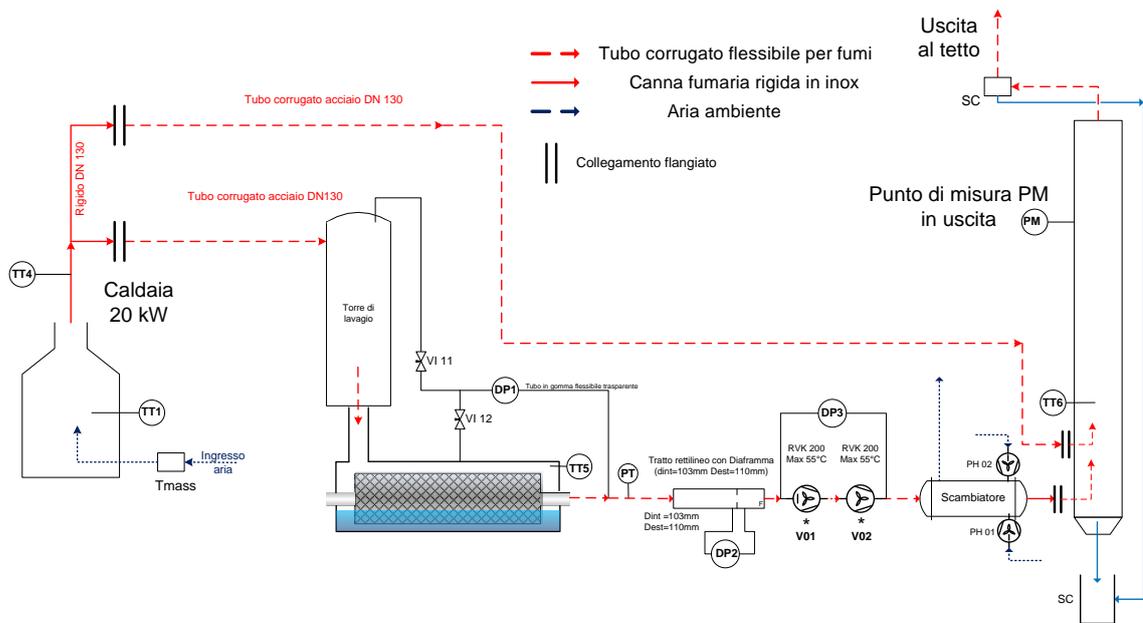
2) CONO PIENO:

- angolo di apertura del cono del getto: 120°
- portata alla pressione di 3 bar di 2,94 l/min

#### 4.3.3 CIRCUITO FUMI

Lo scopo del P&I sotto riportato è quello di mettere in luce i 2 possibili percorsi che i fumi possono percorrere. Nel primo percorso i fumi vengono convogliati verso l'uscita del camino senza passare attraverso il sistema di filtraggio, condizione resa necessaria all'avvio per non sporcare inutilmente i filtri. Inoltre, il passaggio diretto

dei fumi senza il filtraggio è necessario per il campionamento dei fumi tal quali provenienti dalla caldaia, in modo da avere il parametro di confronto necessario in seguito a calcolare l'efficienza di cattura dei filtri.



Sigla	oggetto	Sigla	Oggetto
DP1	GE LP 1000	TT1	EH TAF12D, Termocoppia
DP2	GE LP 1000	TT4	EH TR24, RTD
DP3	Manometro a U	TT5	Termocoppia tipo k
PH 02	Sverniciatore a caldo, Bosch PHG 500-2 1.6 kW	TT6	Termocoppia tipo k
PH01	Sverniciatore a caldo, Superstar 3003, 1.8 kW	V01	Aspiratori SystemAir RVK 200
PT	EH Cerabar M PMP51	V02	Aspiratori SystemAir RVK 200
SC	Punto per la raccolta / scarico della condensa	VI 13	Valvola a sfera ½"
Scambiatore	Scambiatore di calore a doppio tubo	VI11	Valvola a sfera per aria compressa
t-mass	EH t-Mass 65F50	VI12	Valvola a sfera per aria compressa

	(anemometro a filo caldo)		
--	---------------------------	--	--

#### 4.3.3.1 Collegamenti flangiati

Per la deviazione dei fumi, necessaria quando si vuole eseguire il campionamento dei fumi tal quali oppure quelli dei gas ripuliti dal filtro, abbiamo utilizzato dei collegamenti flangiati che possiamo notare in figura:

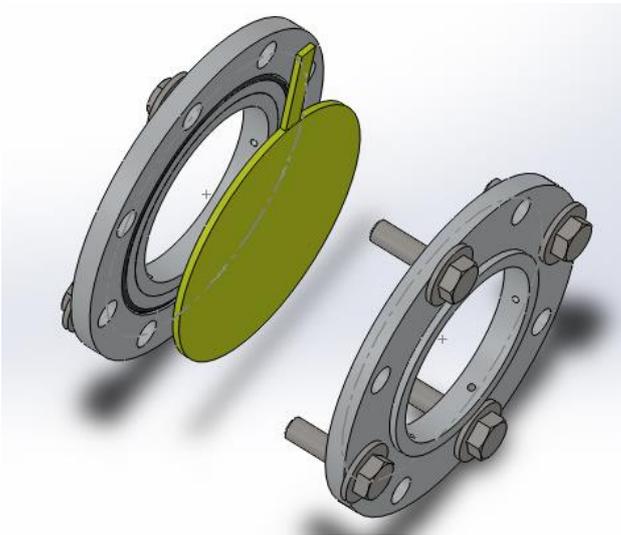


Figura 14: flangia e piattello

Come si può notare in figura, per deviare i fumi si utilizza un piattello cieco inserito fra le flange.

#### 4.3.3.2 Diaframma

Abbiamo utilizzato un diaframma in ottone, piazzato nei condotti orizzontali in plexiglass, per misurare la portata d'aria in uscita dal filtro, valore che deve corrispondere alla somma della portata d'aria in ingresso al t-mass più la portata di

combustibile, in questo modo sappiamo che non ci sono degli ingressi accidentali di aria per il percorso effettuato dai fumi.



Figura 15 tratto orizzontale con diaframma

Come prescritto dalla norma UNI ISO 5167-2 a monte e a valle del diaframma, abbiamo inserito delle prese di pressione che trasmettono il segnale al trasmettitore di pressione differenziale.

#### 4.3.3.3 Aspiratori

Al fine di garantire la giusta portata e prevalenza, abbiamo montato in serie due aspiratori della Systemair modello RVK 200. Trattasi di aspiratori centrifughi, in cui i fumi vengono aspirati al centro ed in uscita escono radialmente rispetto alla girante,

mentre è lo statore stesso a indirizzare il flusso in uscita dall'aspiratore in direzione assiale.

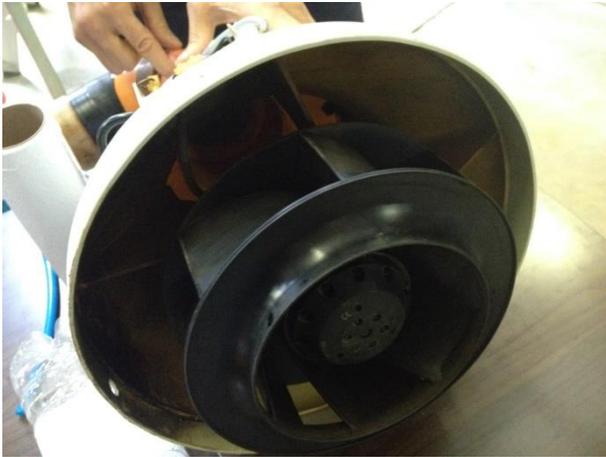


Figura 16: aspiratore

Nei seguenti grafici analizziamo la curva caratteristica degli aspiratori e la relativa curva di assorbimento di energia elettrica:

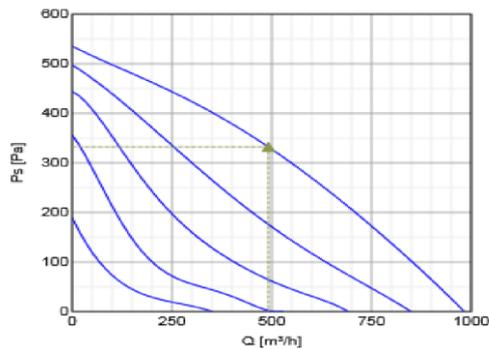


Figura 17: curva portata-prevalenza

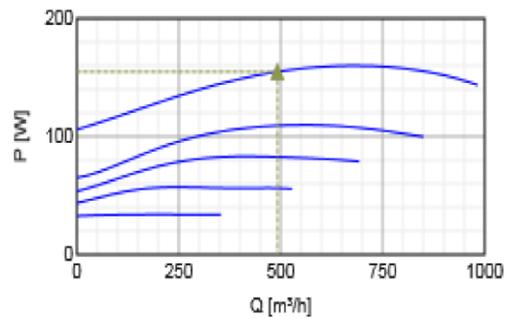


figura 18: curva potenza assorbita

Il controllo degli aspiratori viene affidato agli inverter presenti nel quadro elettrico del filtro, variando la frequenza varia la velocità di rotazione della girante.

#### 4.3.3.4 Scambiatore di calore

L'abbattimento del particolato nella torre di lavaggio determina un brusco calo della temperatura dei fumi, i quali raggiungono una condizione di umidità relativa prossima

al 100%. Il brusco calo di temperatura, unito all'alto contenuto di acqua all'interno dei fumi, può causare la condensazione dei fumi, i quali possono trasportare delle gocce d'acqua che potrebbero entrare nel dispositivo TECORA per il campionamento del particolato. Se i filtri dediti al campionamento si bagnano, viene falsificato il processo, in quanto i tamponi non riuscirebbero a catturare tutto il particolato contenuto nei fumi. Per ovviare a questo problema abbiamo costruito uno scambiatore in controcorrente, avente lo scopo di riscaldare i fumi allontanandoli dal punto di condensazione. Come possiamo evincere dalle foto, lo scambiatore è costituito di un tubo interno in acciaio inox (DN100) di 1 metro di lunghezza. Esternamente, il tubo interno è stato incamicciato da un cilindro corrugato in alluminio, entro il quale scorre in controcorrente aria calda proveniente da 2 sverniciatori industriali da 1,8 Kw l'uno. Al fine di massimizzare l'effetto, i due phon sono disposti perpendicolarmente al tubo di acciaio nella prossimità della sezione finale.

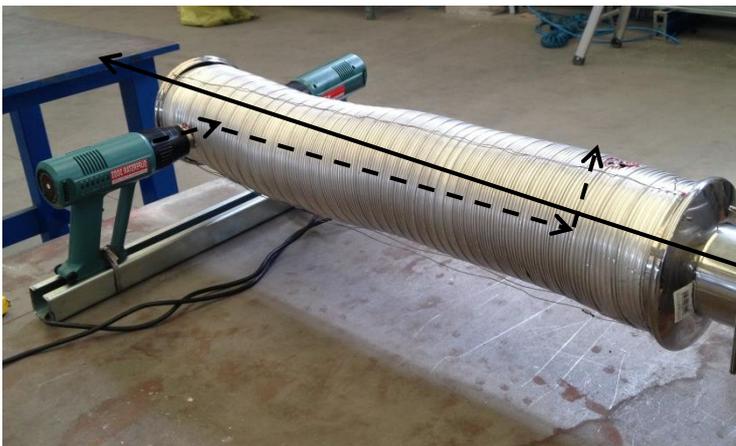


Figura 19: scambiatore controcorrente: linea tratteggiata aria calda, linea continua fumi freddi.

#### 4.3.3.5 Camino

Ultimo componente del percorso fumi è un camino in acciaio inox che deve svolgere le seguenti funzioni:

- 1) permettere l'uscita dei fumi quando viene utilizzato il circuito di bypass (fumi tal quali dalla caldaia);

2) permettere l'uscita dei fumi provenienti dallo scambiatore avendo quindi subito il processo di filtraggio;

3) permettere il processo di campionamento dei fumi con l'utilizzo dello strumento TECORA.

Abbiamo in seguito individuato il punto corretto di campionamento in base alla norma UNI 13284-1:2003 che recita:

*“ I requisiti suddetti sono generalmente soddisfatti nelle sezioni di condotto con almeno cinque diametri idraulici di condotto diritto a monte del piano di campionamento e due diametri idraulici a valle (cinque diametri idraulici formano la parte superiore di un condotto). Pertanto, si raccomanda vivamente di progettare le posizioni di campionamento in modo conforme.”*

Vediamo nella seguente foto il camino realizzato in acciaio inox DN250:



Figura 20: camino, degno di nota lo scarico di condensa posto alla base della struttura

#### 4.3.4 STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI NELLA SPERIMENTAZIONE

Nei paragrafi precedenti abbiamo introdotto la collocazione di ogni particolare dell'impianto, adesso entreremo più nel dettaglio sulla strumentazione utilizzata, sottolineando che i principali strumenti di misura appartengono a due famose marche, “Endree & Hauser” e “General Electric”, rispettivamente.

#### 4.3.4.1 Misura della portata d'aria in ingresso nella caldaia

Nella corretta combustione di biomasse, come in genere per tutti i combustibili solidi, per ottenere una buona combustione, ricopre un ruolo fondamentale il corretto utilizzo della portata in massa di aria in ingresso nella camera di combustione, che avrà valori maggiori rispetto alla condizione stechiometrica, dove per stechiometria si intende il giusto rapporto fra combustibile e comburente in grado di assicurarmi la completa combustione di tutto il combustibile. Per ottimizzare la combustione, abbiamo calcolato come corretto un eccesso d'aria del 100%. Per il calcolo della portata d'aria in ingresso abbiamo utilizzato il Proline t-mass 65 della ditta "Endree & Hauser", ovvero un anemometro a filo caldo il cui principio di funzionamento è il seguente:

- l'anemometro nella sezione di passaggio della portata d'aria, presenta un filo riscaldato per effetto Joule da una corrente elettrica. Nell'anemometro si misura la velocità del flusso attraversante il filo caldo, calcolando la variazione della resistenza elettrica, la quale dipende dalla velocità del fluido, mantenendo la corrente elettrica attraversante il filo, costante. Nel nostro misuratore, invece, viene fatto variare il valore dell'intensità di corrente, in modo da mantenere la resistenza e quindi la temperatura del filo costante. In base all'intensità di corrente utilizzata si riesce a capire quale sia la reale velocità del fluido attraversante la sezione contenente il filo caldo. Presentiamo la relazione che lega il calore scambiato fra fluido e filamento:

$$Ql = \Delta T [K + (2\pi \cdot K \cdot cv \cdot \rho \cdot v \cdot d)]^{0,5}$$

Dove:

Ql= calore sottratto al filo caldo

$\Delta T$ = differenza di temperatura fra filo e fluido

K= conducibilità termica del fluido

cv= calore specifico a volume costante del fluido

$\rho$ = densità del fluido

v= velocità del fluido

d= diametro del filamento



Figura 21: misuratore di portata EH proline t-mass 65

Nel t-mass da noi utilizzato sono presenti due termoresistenze, una delle quali ha il compito di rilevare la temperatura, mentre l'altra di riscaldare. La termoresistenza riscaldante viene mantenuta in sovratemperatura rispetto al fluido. In base alle variazioni di velocità del fluido, varia il calore asportato e varia l'intensità della corrente elettrica applicata alla termoresistenza, per mantenere costante differenza di temperatura fra le due termoresistenze. Un opportuno sistema elettronico invia in uscita un segnale analogico in corrente che verrà valutato dal sistema di acquisizione dati.

#### 4.3.4.2 Portata dei fumi

Per misurare la portata dei fumi nel circuito di campionamento, abbiamo inserito un diaframma in un tubo di plexiglass, in modo da calcolare la velocità del fluido attraverso la misura delle perdite di carico concentrate sul diaframma. Nota, quindi, la

sezione e la velocità di passaggio, rimane banale calcolarsi la portata volumetrica dei fumi. Per il calcolo della portata in massa bisogna solo moltiplicare la portata volumetrica per la densità dei fumi. La densità a sua volta dipende dalla temperatura e dalla pressione che vanno, quindi, calcolate. La formula per il calcolo della densità è la seguente:

$$\rho = \frac{P(273,15 + 20)}{101325(273,15 + T)} 1,02$$

Quindi, ricapitolando per calcolare la portata in massa dei fumi dobbiamo conoscere:

- caduta di pressione al diaframma
- pressione assoluta del gas in Pa
- temperatura del gas in °C



Figura 22: diaframma in ottone montato in un tubo in plexiglass

A monte e a valle del diaframma sono montati dei traduttori di pressione i quali emettono un segnale di corrente che, elaborato da un software, indica le perdite sul diaframma. Per il calcolo della pressione assoluta dei fumi utilizziamo un sensore di pressione EH Cerabar M PMP 51, che possiamo vedere nella foto sottostante:



Figura 23: trasduttore di pressione assoluta EH Cerabar M PMP 51

Questo traduttore è costituito da un diaframma di separazione in materiale metallico, al di là del quale un liquido viene messo in pressione direttamente dal gas, trasmettendo questa pressione ad un elemento piezoresistivo. Alla tensione prodotta dall'elemento piezoresistivo corrisponde quindi un determinato valore di pressione. Tale strumento può lavorare in un range di pressioni fra 0,1 e 400 bar.

La misura della temperatura dei fumi sarà invece determinata da una termocoppia di tipo K.

#### 4.3.4.3 Portata d'acqua

La misura della portata d'acqua del circuito caldaia è fondamentale per essere sicuri di contenere al minimo gli stress termici della caldaia stessa. A tale scopo abbiamo installato un sistema EH Proline Promag 10 P40:



Figura 24: sistema Promag per la misurazione della portata d'acqua

Il principio di funzionamento di questo misuratore di portata si basa sulla teoria della legge dell'induzione di Faraday, la quale sostiene che un conduttore, che si muove in una regione soggetta a campo magnetico, genera una differenza di potenziale calcolabile dalla seguente relazione:

$$V_e = B \cdot L \cdot v$$

dove:

$V_e$ = tensione indotta

$B$ = intensità del campo magnetico

$v$ = velocità del corpo conduttore (acqua)

$L$ = distanza degli elettrodi

Il funzionamento è molto semplice, due bobine generano un campo magnetico di intensità  $B$ , nel condotto intanto scorre a velocità  $v$  il conduttore (acqua), due elettrodi diametralmente opposti ricevono la tensione generata dal movimento del conduttore immerso nel campo magnetico e inviano il segnale ad un amplificatore.

Essendo nota la sezione di passaggio, una volta calcolata la velocità con l'equazione sopra esposta è facile ricavare la portata volumetrica che, moltiplicata per la densità dell'acqua mi fornisce la portata in massa.

#### 4.3.4.4 Perdite di carico nella torre di lavaggio

Per la misurazione delle perdite di carico che i fumi subiscono nell'attraversamento della torre di lavaggio con riempimento strutturato, abbiamo utilizzato un manometro differenziale a U, posizionando una porta di ingresso per la pressione statica prima e dopo l'ingresso dei fumi nella torre di lavaggio, come potete osservare dalla foto:



Figura 26: manometro differenziale per calcolo perdite di carico

Il calcolo delle perdite è molto semplice e consiste nella misurazione del dislivello presente fra la colonna di destra collegata alla base della torre, prima dell'ingresso dei fumi nel processo di filtraggio e la colonna di sinistra collegata ad una presa di pressione posizionata sopra gli ugelli dediti al lavaggio dei fumi. Una volta effettuata la misurazione tenendo conto del millimetro, abbiamo introdotto la quota nella seguente formula:

$$\Delta P = h \cdot g \cdot \rho$$

dove:

$\Delta P$ = perdite di pressione

$\rho$ = densità dell'acqua

$g$ = accelerazione di gravità

#### 4.3.4.5 Strumenti per la misurazione delle temperature:

Le termoresistenze e termocoppie utilizzate nell'impianto avevano lo scopo di controllare:

-temperatura dei fumi appena usciti dalla camera di combustione, termoresistenza tipo Pt100

-temperatura dei fumi circolanti nel diaframma, termocoppia tipo k

-temperatura dell'acqua in uscita dal circuito idraulico della caldaia (circuito radiatore) termoresistenza Pt100

-temperatura dell'acqua in ingresso dal circuito idraulico della caldaia (circuito radiatore) termoresistenza Pt100

-temperatura in camera di combustione, termocoppia di tipo D

Le termoresistenze basano il loro principio sulla variazione della resistività che i materiali offrono al variare delle condizioni termiche. L'equazione che descrive come varia la resistività in funzione della temperatura è la seguente:

$$R_t = R_o(1 + \alpha t)$$

dove:

$R_t$  = resistività alla temperatura  $t$

$$\alpha = \left( \frac{R(100^\circ) - R(0^\circ)}{100^\circ C \cdot R(0^\circ)} \right) = \text{coefficiente medio di temperatura}$$

$R_0$  = resistività a  $0^\circ$

Il coefficiente di temperatura non è costante ma varia con la temperatura.

L'elemento sensibile di una termoresistenza altro non è che un filo metallico annegato nel vetro o nella porcellana. Il materiale utilizzato per costituire il filo deve garantire resistenza meccanica ed alta resistività, in modo da poter utilizzare filamenti anche corti. A tali scopi si prediligono materiali come il platino, nichel oppure rame. La termoresistenza da noi utilizzata presenta il filo in platino avente una resistività di  $100 \Omega$  a  $0^\circ$ . Di seguito nella tabella formiamo alcuni valori della resistività del platino al variare della temperatura:

### DIN IEC 751 Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors

$^\circ\text{C}$	$\Omega$	$^\circ\text{C}$	$\Omega$	$^\circ\text{C}$	$\Omega$	$^\circ\text{C}$	$\Omega$
-200	18.52	20	107.79	240	190.47	460	267.56
-195	20.68	25	109.73	245	192.29	465	269.25
-190	22.83	30	111.67	250	194.10	470	270.93
-185	24.97	35	113.61	255	195.91	475	272.61
-180	27.10	40	115.54	260	197.71	480	274.29
-175	29.22	45	117.47	265	199.51	485	275.97
-170	31.33	50	119.40	270	201.31	490	277.64
-165	33.44	55	121.32	275	203.11	495	279.31
-160	35.54	60	123.24	280	204.90	500	280.98
-155	37.64	65	125.16	285	206.70	505	282.64
-150	39.72	70	127.08	290	208.48	510	284.30
-145	41.80	75	128.99	295	210.27	515	285.96
-140	43.88	80	130.90	300	212.05	520	287.62

Tabella 2: valori di resistività del filamento al platino al variare della temperatura

-Per la lettura della temperatura nei fumi appena usciti dalla camera di combustione e spinti dalla ventola della caldaia, utilizziamo sempre una termoresistenza del tipo Pt100 perché molto sensibile, nonché in grado di sopportare un range di temperature molto ampio (-40°:500°), il che lo rende praticamente universale a qualsiasi utilizzo. Conoscere la temperatura dei fumi appena usciti dalla camera di combustione è fondamentale, perché ci permette di capire come e con che qualità stiamo bruciando in caldaia.



Figura 27: termoresistenza EH Omnigrad T TR24

-Per sapere quanta potenza termica il circuito idraulico della caldaia ha sottratto ai fumi, dobbiamo conoscere la temperatura dell'acqua in ingresso, quella in uscita, il calore specifico dell'acqua nonché la portata di liquido circolante. Per il calcolo delle due temperature sopra citate, abbiamo utilizzato 2 RTD Omnigrad TST 90 come possiamo vedere nella foto:



Figura 28: RTD Omnigrad TST 90

-Per tutte le altre misure di temperatura abbiamo utilizzato termocoppie di tipo K, sicuramente meno precise, ma più maneggevoli.

-Temperatura in camera di combustione

La conoscenza di questo valore risulta fondamentale per capire con quale qualità stiamo bruciando in caldaia e, quindi, quali tipi di inquinanti stiamo immettendo in atmosfera. Si è notato, infatti, che all'aumentare della temperatura diminuisce il tenore di PM 2.5. Trattandosi di temperature comunque abbastanza elevate, l'unico strumento in grado di assicurarci un corretto utilizzo è la termocoppia, il cui principio di funzionamento verrà brevemente spiegato:

la termocoppia è costituita di due fili di materiali diversi isolati per tutta la loro lunghezza e attaccati in una estremità che prende il nome di giunto caldo, mentre sono accoppiati allo strumento di misurazione dalla parte opposta dei fili, in un punto chiamato giunto freddo. Qualora si instaurasse una differenza di temperatura fra i due giunti per effetto Seebeck, verrebbe prodotta una differenza di potenziale proporzionale al  $\Delta T$ . L'effetto Seebeck deriva dalla somma di due fenomeni scoperti rispettivamente da Peltier e Thomson. L'effetto Peltier altro non è che la generazione di calore localizzata nella giunzione fra due materiali diversi, sui quali scorre una corrente. Invertendo la corrente viene assorbito calore, allo stesso modo, aggiungendo o sottraendo calore si crea una corrente generante una differenza di potenziale ai capi dei corpi metallici. Thomson, inoltre, scoprì che facendo circolare corrente su corpi metallici soggetti a gradiente di temperatura si ha generazione di calore. Le termocoppie vengono classificate con delle lettere, in base ai materiali che le costituiscono, come possiamo vedere in tabella:

*Tipo di  
termocoppia*

Materiali

<i>Tipo di termocoppia</i>	Materiali
S	Platino + Rodio (10%) / Platino
R	Platino + Rodio (13%) / Platino
B	Platino + Rodio (30%) / Platino + Rodio (6%)
J	Ferro / Rame + Nichel
T	Rame / Rame + Nichel
K	Nichel + Cromo (10%) / Nichel + Alluminio (6%)
E	Nichel + Cromo (10%) / Rame + Nichel

Tabella 3: classificazione termocoppie in base ai materiali

A tale scopo, la termocoppia da noi acquistata per la rilevazione della temperatura di combustione è una termocoppia del tipo platino-rodio/platino, in grado di reggere temperature fino a 1800°, grazie al doppio rivestimento in ceramica.



Foto 29: termocoppia EH Omnigrad TAF 12 D

Abbiamo abbinato alla termocoppia un trasmettitore di temperatura, in grado di ricevere il segnale dallo strumento, dando in uscita su un display la temperatura effettiva



Figura 30: lettore digitale di temperatura

#### 4.3.5 QUADRO ELETTRICO

La presenza di un quadro elettrico è giustificata dalla necessità di poter variare durante le sperimentazioni alcuni parametri operativi, come ad esempio la velocità di rotazione degli aspiratori. A tale scopo abbiamo utilizzato un quadro elettrico costituito da:

- 1 interruttore generale 10 A
- interruttore motori con avviamento manuale/automatico da pannello
- spia funzionamento motori
- 1 inverter con ingresso monofase ed uscita trifase per alimentare la pompa a palette dell'acqua
- 1 inverter ingresso monofase uscita monofase per alimentare 2 aspiratori per il tiraggio dei fumi

Ecco una foto del quadro elettrico:

Figura 31: foto quadro elettrico



Dai pannelli regolatori si comandano gli inverter utilizzati negli scopi sopra citati.

#### 4.3.6 PROCEDURE DI CAMPIONAMENTO

In questo paragrafo tratteremo nello specifico le procedure di campionamento utilizzate per la raccolta del particolato sottile, sia nel caso dei fumi tal quali ovvero senza nessun processo di filtraggio, sia dopo che i fumi sono stati elaborati dalla torre di lavaggio. In generale, per il campionamento del particolato esistono due tipi di processi:

- processo ottico: viene utilizzato un laser che conta le particelle sospese nei fumi
- processo gravimetrico: quello da noi utilizzato, consiste nel campionare i fumi facendo impattare una portata nota in un filtro tampone. In seguito, calcolato il peso delle polveri raccolte e rapportate al volume dei fumi campionati, siamo in grado di risalire alla concentrazione del particolato nei fumi.

Dei due metodi abbiamo utilizzato il secondo perché:

- il metodo ottico seppur molto preciso, non è in grado di distinguere il particolato dalle gocce d'acqua che inevitabilmente rimangono nei fumi dopo il processo di lavaggio;

- il metodo gravimetrico è, inoltre, molto meno costoso del metodo ottico (circa 10 volte).

Indichiamo le normative di riferimento per il campionamento dei fumi:

UNI10169: determinazione della velocità e della portata dei gas convogliati per mezzo del tubo di pitot;

UNI EN 13284-1: emissioni da sorgente fissa. Determinazione della concentrazione in massa di polveri a basse concentrazioni. Metodo manuale gravimetrico

UNI EN ISO 23210: emissioni da sorgente fissa. Determinazione della concentrazione in massa di PM10/PM2,5 in fluidi gassosi. Misurazione a ridotte concentrazioni tramite impattori multistadio.

UNI EN 14905:2005: qualità dell'aria dell' ambiente. Metodo normalizzato di campionamento gravimetrico per determinare la concentrazione massica di PM2,5.

UNI EN 12341:2001: qualità dell'aria. Determinazione del particolato PM10. Metodo di riferimento e procedimento per prove in campo, atte a dimostrare l'equivalenza dei metodi di misurazione, rispetto ai metodi di riferimento.

DL 152:2006: norme in ambito ambientale.

Le norme elencate sono da eseguirsi a cascata per il corretto campionamento del particolato. Per avere una misura nota della concentrazione del particolato in sospensione nei fumi, dobbiamo sporcare un filtro di campionamento con una portata nota V. La formula che esprime la concentrazione del particolato raccolto su un filtro a tamponi posizionato nell'impattore è la seguente:

$$C = \frac{P_{\text{filtro finale}} - P_{\text{filtro iniziale}}}{V}$$

dove:

Pfiltro iniziale è il peso del filtro pulito

Pfiltro finale è la misura da calcolare dopo aver effettuato il test ed aver sporcato il filtro

V è il volume noto di fumi campionati

Una volta calcolata la concentrazione con la formula sopra esposta, dobbiamo rapportarla all'11% di ossigeno dato che abbiamo il 100% di eccesso d'aria:

$C_{\text{all'11\% di O}_2} = \frac{C(21-11)}{(21-\%O_2)}$  Dove per %O2 si intende la % di ossigeno misurata al camino dopo ogni test.

#### 4.3.6.1 Strumentazione utilizzata per il campionamento

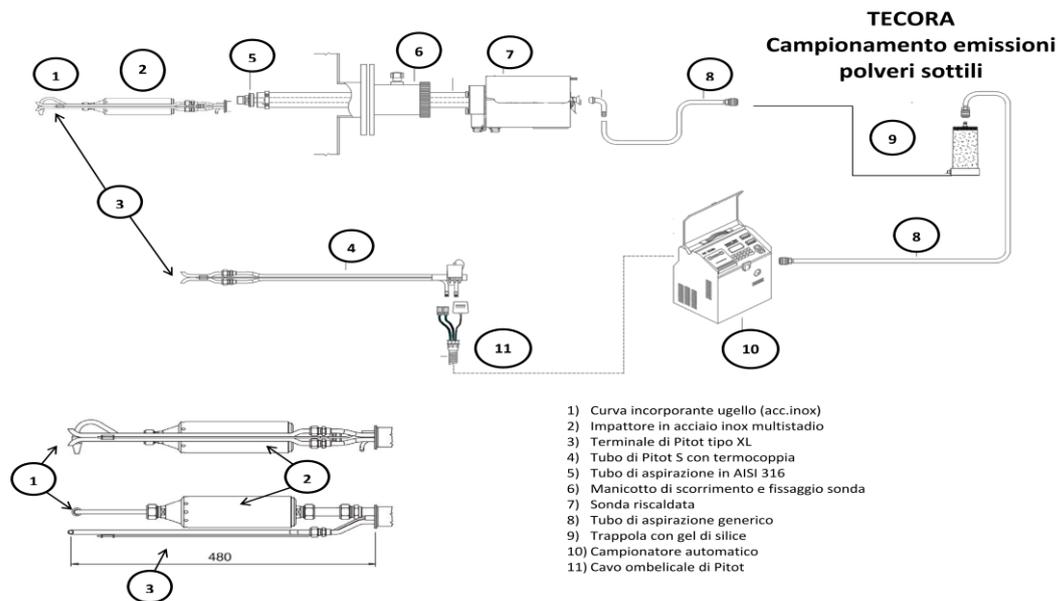
Tutto il materiale utilizzato per il campionamento può essere riassunto nella tabella sottostante:

<b>Codice Tecora</b>	<b>Nome</b>	<b>Riferimento in Errore. 'origine riferimento non è stata trovata.</b>
Campionatore + Misuratore di portata		
AC99-025-0001SP	ISOSTACK G4 ONE 8 M3/H 220 V	10
AC99-025-9902SP	ISOSTACK G4 TERMOREGOLAT. BOX SONDA	All'interno di 10
AC99-025-9920SP	CAVO OMBELICALE PITOT G4 DA 5 M	11
AD99-012-0010SP	TRAPPOLA PER GEL-SILICE NUOVA 1L	9
SONDA RISCALDATA DA 1 metro		
AC99-090-0001SP	SONDA RISC.INTERCAMB.220V 1 M	7
AC99-090-0041SP	TUBO PITOT S LUNGO CON TK, 1 M	4
AC99-090-9800SP	MANIC.SCORR.SON.RISC.FINO/1,5M	6
TUBI ASPIRAZIONE INTERNI		
AC99-090-9901SP	TUBO ASPIR.316X SONDA RISC.1 M	5
IMPATTORE MSSI		
AC99-107-0010KP	IMPATT.CASCATA INOX MULTST.MSSI	2
AC99-106-0001KP	KIT PREL. INOX P.F.D47 CURVA E UGEL	1
AC99-099-0064SP	PITOT S XL PER CICL.PM10 + 2.5	3
CAMPIONAMENTO AMBIENTALE per PM10 e PM2.5		
AA99-010-0020SP	TESTA PREL. LVS PM10 2.3 M3/H	ND
AA99-010-0003SP	STATIVO PORTATILE PER TESTE PM	ND
AA99-010-0035KP	8 UGELLI INT.LVS PM2.5 2.3M3/H	ND

Tabella 4: componenti Tecora per analisi del PM

Tutti questi componenti andranno assemblati come possiamo notare nella figura seguente:

Figura 32: complessivo strumentazione Tecora



#### 4.3.6.1.1 ISOSTACK G4 ONE 8 M3/H 220 V

Trattasi di una pompa avente lo scopo di campionare la giusta portata dei fumi. Può essere utilizzata per test anche molto lunghi, al termine dei quali si spegne automaticamente e tiene in memoria i dati raccolti, con la possibilità di poterli esportare con l'utilizzo di una pendrive. Si inserisce come dato di input la portata da voler campionare, dopodiché la pompa si gestisce da sola, correggendo il suo funzionamento rispetto alle perdite di carico che può incontrare a causa dell'intasamento del filtro campionatore. La pompa Tecora è molto sensibile all'umidità, per questo risulta fondamentale porre fra la Isostack e il multi-impattore un contenitore contenente gel di silice, in grado di eliminare o quantomeno ridurre sensibilmente l'umidità presente nei fumi.

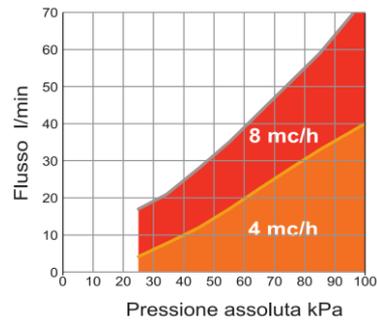


Figura 33: pompa Isostack G4 one da 8 mc/h Figura 34: Curva di compensazione

#### 4.3.6.1.2 TUBO PITOT S XL PER PM10:2,5

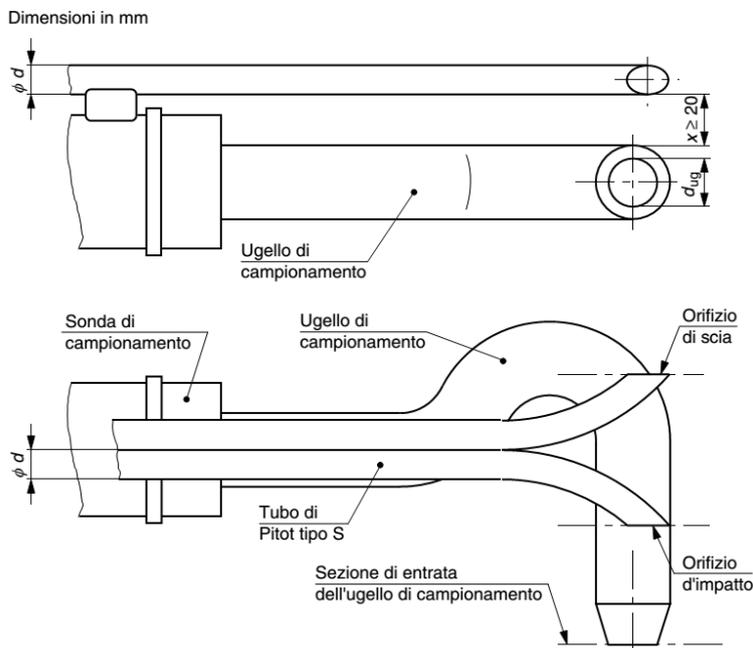


Figura 35: tubo Pitot

Accoppiamento ugello di campionamento con tubo di pitot

#### 4.3.6.1.3 Contenitore gel di silice per deumidificazione fumi

Risulta fondamentale far passare i fumi campionati, prima del loro ingresso nella centralina dell'isostack, attraverso una "trappola" contenente gel di silice, il quale presenta delle importanti proprietà disidratanti nonché assorbenti, in grado di deumidificare in maniera importante i fumi.



Figura 37: contenitore gel di silice: freccia gialla ingresso fumi, freccia rossa uscita fumi

Risulta importante collegare ingresso e uscita fumi come nella foto sopra esposta, in quanto l'umidità tende a raccogliersi alla base del contenitore. Il gel di silice chiaramente non ha vita infinita, infatti, tende a degradarsi con il tempo, acquistando una colorazione che permette di capire il momento giusto per la sostituzione. Una volta evacuato il gel di silice umido, può essere facilmente rigenerato, mettendolo in un normale forno, togliendogli tutta l'umidità acquisita durante la lavorazione. I filtri a tamponi utilizzati per raccogliere le polveri nel processo di campionamento, devono soddisfare i seguenti requisiti:

- 1) avere un'efficienza di cattura almeno del 99,5% per un aerosol contenente particelle aventi un diametro aerodinamico di  $0,3 \mu\text{m}$  (tale efficienza va certificata dal produttore);
- 2) il materiale utilizzato nei filtri campionatori deve essere assolutamente inerte, rispetto ai composti chimici contenuti nella corrente gassosa.

I suddetti filtri possono essere costruiti in vari materiali come la cellulosa, la fibra di vetro, la fibra di quarzo oppure il policarbonato. Noi abbiamo scelto di utilizzare dei tamponi aventi un diametro di 47mm costituiti di fibra di quarzo, in grado di trattenere tutte le particelle solide che impattano su di esso e di resistere alle alte temperature.



Figura 38,39: filtro in fibra di quarzo prima e dopo il campionamento

Sono dei componenti molto delicati, da maneggiare esclusivamente con l'uso di pinzette. Dopo il campionamento bisognerà verificare che la faccia opposta del tampone sia rimasta bianca e priva di aloni, dati dalla condensa.

#### 4.3.6.1.4 Impattore per polveri totali

L'impattore per le polveri totali permette la raccolta di tutto il particolato utilizzando un singolo stadio e, quindi, un singolo filtro al quarzo. Rispetto al multi-impattore, ha il vantaggio di dover utilizzare solo un singolo filtro per volta, facendoci risparmiare non poche procedure nella preparazione dei tamponi. D'altro canto, lo svantaggio sta nel non essere in grado di suddividere le particelle in base alla loro grandezza, cosa che in fondo non ci interessa più di tanto, perché sappiamo dalla letteratura che, le dimensioni del particolato provenienti dalla combustione di biomasse sono per il 99% circa inferiori ad  $1\mu\text{m}$  di diametro. Utilizzando l'impattore monostadio come nel nostro caso, è possibile utilizzare una qualsiasi portata di campionamento, noi abbiamo scelto 10 l/min.



Figura 40: portafiltro monostadio Tecora

#### 4.3.6.1.5 Impattore multistadio:

Utilizzato per effettuare una separazione di PM10 e PM2,5 sfruttando metodi inerziali il cui funzionamento è illustrato nelle figure seguenti:

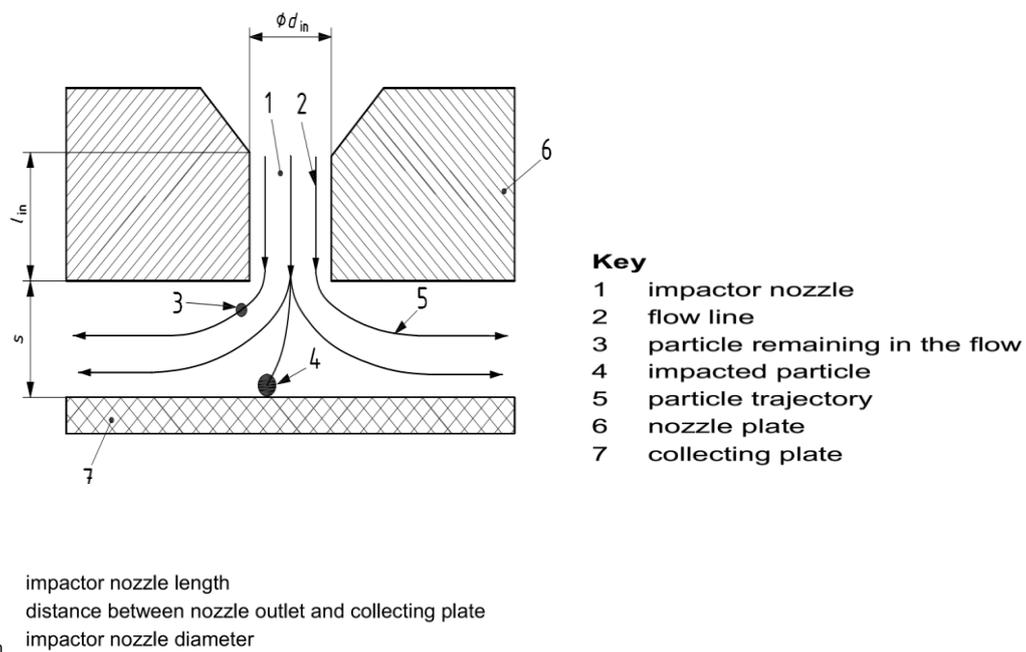


Figura 41: principio funzionamento impattore

Dalla figura si nota che le particelle aventi le dimensioni e quindi l'inerzia adeguata impattano e vengono catturate dal tampone, mentre le altre deviano per poi impattare nel tampone adatto alle loro dimensioni.



Figura 42: multi-impattore con cono a becco d'oca

Nel multi-impattore sono presenti 3 stadi, il primo cattura tutte le particelle aventi diametro maggiore di 10  $\mu\text{m}$ , il secondo permette la cattura del particolato aventi dimensioni superiori a 2,5  $\mu\text{m}$  mentre il terzo stadio è un filtro totale nel senso che cattura tutto il particolato presente nei fumi.



Figura 43: multi-impattore disassemblato

N°	Componente
1	Ingresso fumi-collegamento all'ugello
2	Ugelli per accelerazione del flusso (1° stadio di separazione)
3	Cassetta portafiltro-cono d'espansione
4	Ugelli per accelerazione del flusso (2° stadio di separazione)
5	Cassetta portafiltro-cono d'espansione
6	Corpo portafiltro e cono di collegamento alla sonda di prelievo

Tabella 5: numerazione elementi del multi-impattore

La numerazione degli elementi è progressiva partendo da destra

Notiamo che i filtri nell'elemento 3 e 5 vanno fustellati con un accessorio messo in dotazione da Tecora. Per ottenere un campionamento affidabile, è necessario che il

flusso all'interno dell'ugello a becco d'oca sia isocinetico rispetto al flusso di gas all'interno del camino. Il rapporto fra le velocità del fluido all'interno e fuori dell'ugello deve essere compreso, quindi, fra 0,9 e 1,3.

#### 4.3.6.1.6 Punto di campionamento

Il punto di campionamento va scelto con molta cura, adottando le seguenti scelte:

- 1) Velocità dei fumi non troppo bassa;
- 2) Campionare in un tratto verticale sufficientemente lungo e lontano da raccordi, valvole e curve di ogni genere

#### 4.3.6.1.7 Processo di pesatura dei filtri

L'attrezzatura presente in laboratorio è costituita dai seguenti oggetti:

-stufa di essiccazione: permette di raggiungere circa 300°

-essiccatore: dispositivo utilizzato nei laboratori di chimica, è costituito da un recipiente al cui interno vengono posizionati i campioni da essiccare. Alla base del contenitore viene messo del gel di silice o del pentossido di fosforo. Nella sommità dell'essiccatore, può essere presente una valvola per poter collegare il recipiente ad una pompa meccanica in grado di realizzare il vuoto all'interno del contenitore.

- bilancia a 5 cifre decimali: estremamente sensibile, per il suo utilizzo corretto bisogna disporre di un tavolo isolato dalle vibrazioni, nonché la totale assenza nella stanza di strumentazioni di vario genere.

-forno: il forno a muffola permette di avere una distribuzione uniforme delle temperature al suo interno, arrivando a circa 1000°

##### 4.3.6.1.7.1 Pesatura filtro pulito

Accendiamo la stufa a 180° e poniamo i filtri vergini al suo interno lasciandoli asciugare per circa 1 ora di tempo. Il secondo step consiste nel mettere i filtri dentro l'essiccatore, lasciandoli a riposo per 4 ore. Dopo tutto ciò abbiamo effettuato 3 pesature dei filtri vergini, indicando come valore ottimale la media delle 3 pesature.

##### 4.3.6.1.7.2 Pesatura filtro sporco:

estraiamo il filtro dall'impattore con le pinzette e lo introduciamo nella sua scatola, dopodiché abbiamo messo i filtri sporchi di nuovo nella stufa a 180° per un'ora e a riposo nell'essiccatore, in modo da eliminare tutta l'acqua accumulata dai fumi. Una volta pronti abbiamo effettuato le 3 pesature, prendendo come valore la media dei tre valori.

#### 4.3.6.1.7.3 Rendimento di filtraggio

Il rendimento di filtraggio altro non è che la differenza fra la concentrazione iniziale e quella finale dei fumi campionati, esprimibile attraverso la seguente formula:

$$\eta = \frac{C_{iniziale} - C_{finale}}{C_{iniziale}} * 100$$

### 4.4 SPERIMENTAZIONI

Nell'impianto sperimentale, situato nella sede di ingegneria presso i laboratori del "Lazzaretto" di Bologna, abbiamo condotto le prove sperimentali, utilizzando differenti configurazioni impiantistiche, variando cioè:

- 1) Numero di moduli del riempimento strutturato
- 2) Numero e tipologia di ugelli dediti alla nebulizzazione dell'acqua nella torre di lavaggio.

Prima di introdurre i risultati reali ottenuti, dedico un piccolo paragrafo per la descrizione del riempimento strutturato utilizzato.

#### 4.4.1 *Riempimento strutturato Refill Tech:*

Il riempimento strutturato ci è stato gentilmente concesso dall'azienda Refill Tech di Biassono (MB), al fine di testarne l'utilizzo per la raccolta del particolato sottile. Nella seguente tabella possiamo vedere alcune caratteristiche tecniche fornite dall'azienda produttrice e relative ad un modulo di separazione:

superf.specifica	altezza	spess.materiale	grado di vuoto	materiale	Diametro del riempimento
245 (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	0,15 (m)	250 (μm)	97%	PVC	0,24 (m)

Come possiamo vedere dalla foto in basso, questi moduli sono costituiti da fogli di PVC in modo da creare un disegno di tipo incrociato con canaline inclinate rispetto all'orizzontale di 60° e aventi una sezione di imbocco alta 24 mm.



Figura 44, 45: riempimento strutturato Refill Tech



#### *4.4.2 PROVE SPERIMENTALI SULL'IMPIANTO*

Le prove sperimentali sono state eseguite nel laboratorio del “Lazzaretto” a bologna, con lo scopo di testare varie configurazioni impiantistiche. Scopo dei test è quello di calcolare l’efficienza di filtraggio di una torre di lavaggio, al cui interno sono stati disposti degli ugelli per l’atomizzazione dell’acqua necessaria al lavaggio dei fumi. La torre di lavaggio è composta da un cilindro di policarbonato alto 0,94 m ed avente diametro interno di 0,24 m. All’apice del cilindro sono stati posizionati gli ugelli per il lavaggio dei fumi, i quali vengono introdotti dalla base della torre e convogliati grazie a dei tubi in acciaio inox. Possiamo ammirare la torre nella foto qui sotto:

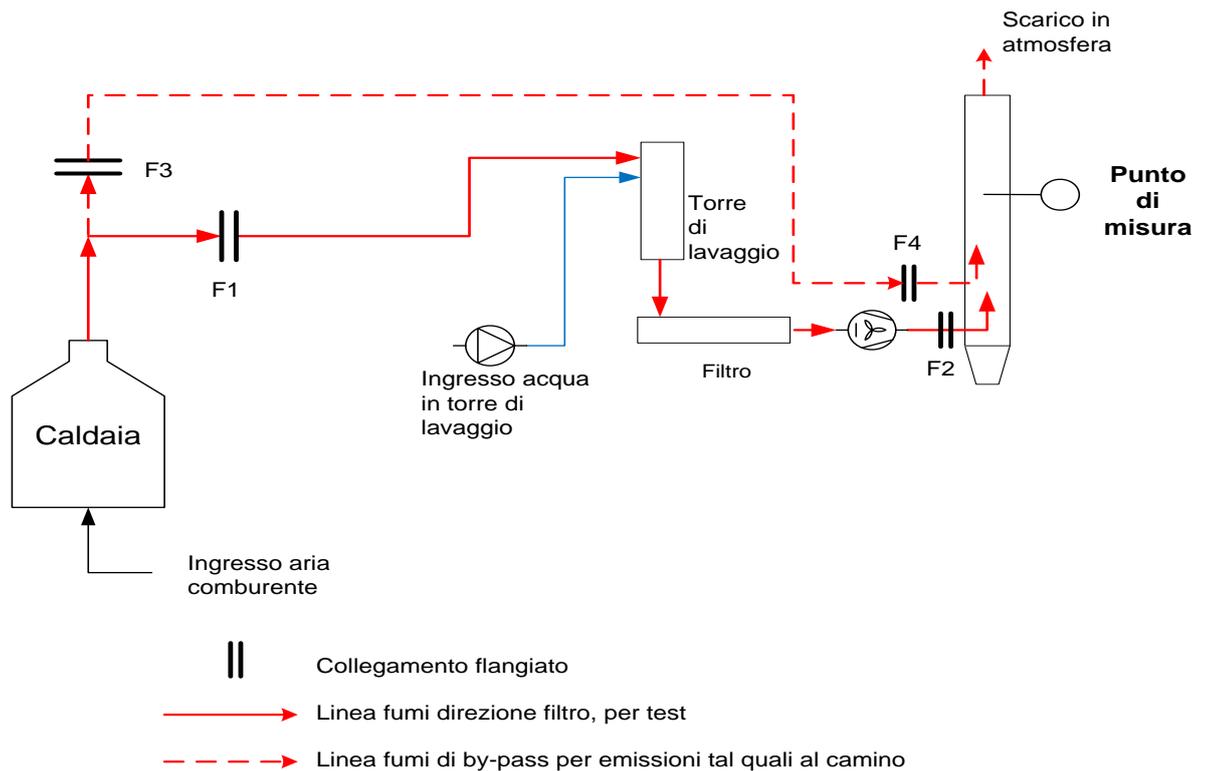


Figura 46 : ingresso fumi torre di lavaggio



Figura 47 : torre di lavaggio

4.4.2.1 Procedure da eseguire prima di ogni sperimentazione:



#### 4.4.2.1.1 Deviazione da circuito bypass a circuito filtro

Abbiamo già menzionato in precedenza l'esistenza di un circuito di bypass che ci permette di effettuare i campionamenti dei fumi tal quali provenienti dalla caldaia, nonché gestire, senza sporcare inutilmente i filtri, i transitori di avviamento della caldaia. Per dirottare il flusso dal circuito di bypass al circuito di prova e viceversa, posizioniamo opportunamente dei piattelli nelle flange indicate dalle lettere F nel P&I sopra indicato.

#### 4.4.2.1.2 Riempimento circuito idraulico

Prima dell'inizio delle prove sperimentali abbiamo riempito il circuito idraulico della caldaia di acqua direttamente dalla rete. Abbiamo aperto la valvola jolly in modo da permettere la fuoriuscita di eventuali sacche d'aria presenti nel circuito, introducendo acqua fino al raggiungimento di una pressione di circa 0,5 bar e, quindi, avviato la pompa.

#### 4.4.2.1.3 Parametri di impianto

Abbiamo utilizzato una portata di combustibile (mais) pari a 2,996 kg/h e una portata d'aria al t-mass di circa 37 kg/h, in modo da generare un portata in massa di fumi di circa 40 kg/h. Tale portata dovrà necessariamente essere registrata al diaframma, in modo da permetterci di capire se vi siano dei rientri d'aria attraverso fori presenti nel circuito. I parametri da monitorare con attenzione sono:

- portata in massa di aria in ingresso in camera di combustione tramite t-mass, parametro da cui dipende la qualità della combustione;

- temperatura nella coclea del mais, misurata tramite termocoppia di tipo K. Se questa temperatura sale sopra i 40-50 gradi significa che il fumo non riesce a passare attraverso il filtro, perché le perdite di carico sono troppo elevate, cercando come percorso di uscita appunto la coclea del mais e rischiando di far incendiare il combustibile nella tramoggia. In caso di aumento della temperatura, è sufficiente incrementare il tiraggio dei fumi tramite le ventole della caldaia oppure gli aspiratori a valle del diaframma, modificando il valore della frequenza tramite inverter.

- temperatura in camera di combustione: deve mantenersi circa sui 550°, in modo da avere una combustione ottimale con produzione di poco particolato.

- pressione degli ugelli nella torre di lavaggio: regolata intorno ai 3 bar per ogni ugello. Parametro da cui dipende la portata di ogni ugello e la grandezza delle gocce.

Raggiunta la stabilità (dopo circa 1 ora dall'accensione) si procede con il campionamento.

I parametri oggetto di variazione sono stati:

- 1) Numero di moduli del riempimento strutturato;
- 2) Portata d'acqua variando il numero di ugelli in funzione

#### 4.4.2.2 Configurazione 1

Nel primo test abbiamo utilizzato un solo modulo di riempimento strutturato(15cm), utilizzando 2 ugelli a cono pieno e 2 ugelli a cono vuoto ottenendo:



Figura 48: cilindro policarbonato ugelli e presa di pressione della torre di lavaggio

- $\eta = 25,74\%$  con una portata in massa di acqua  $m = 0,1524 \text{ Kg/s}$
- perdite di carico= circa 30 Pa

#### 4.4.2.3 Configurazione 2

Abbiamo introdotto un secondo modulo di riempimento strutturato, portando l'altezza del riempimento a 30 cm. Sono state eseguite le seguenti prove variando la portata in massa di acqua nella torre di lavaggio:



Figura 49: torre di lavaggio a 2 riempimenti strutturati

- 1) Utilizzo di 2 ugelli a cono pieno ottenendo  $\eta= 22,94$  con una portata d'acqua di  $m= 0,0992375$  kg/s, perdite di carico= $39,23$  Pa
- 2) Utilizzo di due ugelli a cono pieno + due ugelli a cono vuoto generando un  $\eta=34,91$  con una portata d'acqua di  $0,1524$  kg/s, perdite di carico= $117,68$  Pa

#### 4.4.2.4 Configurazione 3

L'ultima configurazione impiantistica prevede l'utilizzo di 3 moduli di riempimento strutturato, arrivando ad un'altezza complessiva di riempimento di  $0,45$ m. Le prove sono state effettuate variando la portata d'acqua nebulizzata nel seguente ordine:



Figura 50: torre di lavaggio 3 riempimenti strutturati

- 1) Utilizzo di 4 ugelli, di cui 2 a cono vuoto e 2 a cono pieno, ottenendo un rendimento del  $\eta=30,32$ , con una portata d'acqua di  $m=0,1263$  kg/s, perdite di carico= $137,30$  Pa
- 2) Abbiamo utilizzato 3 ugelli a cono pieno, generando rendimenti del  $\eta=25,44$  a fronte di una portata d'acqua di  $m=0,16$  kg/s, perdite di carico= $118$  Pa
- 3) 2 ugelli a cono pieno ottenendo:  
 $\eta=23,36\%$  con  $m=0,0908$  kg/s di acqua nebulizzata, perdite di carico= $68,64$  Pa

#### 4.4.2.5 Considerazioni sui risultati

##### 4.4.2.5.1 Perdite di carico

Le perdite di carico sono un fattore fondamentale per valutare le prestazioni di un filtro, infatti, da esse dipende il consumo energetico del sistema, nonché i relativi costi d'esercizio.

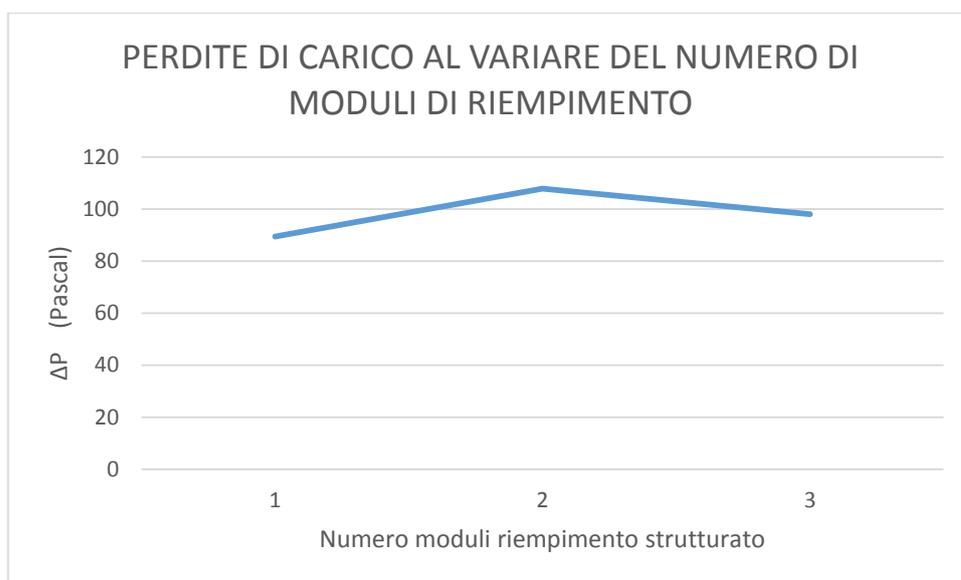


Figura 51: perdite di carico valutate al variare del numero di riempimenti strutturati, mantenendo costante la portata in massa di acqua agli ugelli nebulizzatori.

In accordo con il grafico relativo al rendimento di filtraggio, che dimostrava maggiore efficienza per l'utilizzo di 2 setti rispetto a 3, anche le perdite di carico sono maggiori nella configurazione a 2 setti, rispetto all'utilizzo di un terzo riempimento strutturato. Questa affermazione si trova d'accordo con una teoria sviluppata da Semrau (1963) denominata "Contact power theory", basata sulle analisi condotte da Lapple e Lamack. L'assunzione fondamentale di tale teoria è la seguente:

"Se si paragonano i sistemi scrubbing a parità di energia consumata essi hanno la stessa efficienza di rimozione di particolato, indipendentemente dal meccanismo di rimozione coinvolto e indipendentemente dal fatto che la caduta di pressione sia ottenuta per mezzo della alta portata del gas o del liquido." (Lapple and Lamack 1955)

In parole povere, l'efficienza è determinata unicamente dalle perdite di carico ottenute, che si traducono nel consumo di energia per il tiraggio e non dal disegno dello scrubber. Un'importante implicazione di questa affermazione è che una volta

decise le spese energetiche di gestione, si può disegnare lo scrubber in base alle esigenze di spazio ed economicità di costruzione/manutenzione.

Il prossimo grafico vuole descrivere come variano le perdite di carico mantenendo costante il numero di moduli riempienti e variando unicamente la portata in massa di acqua:

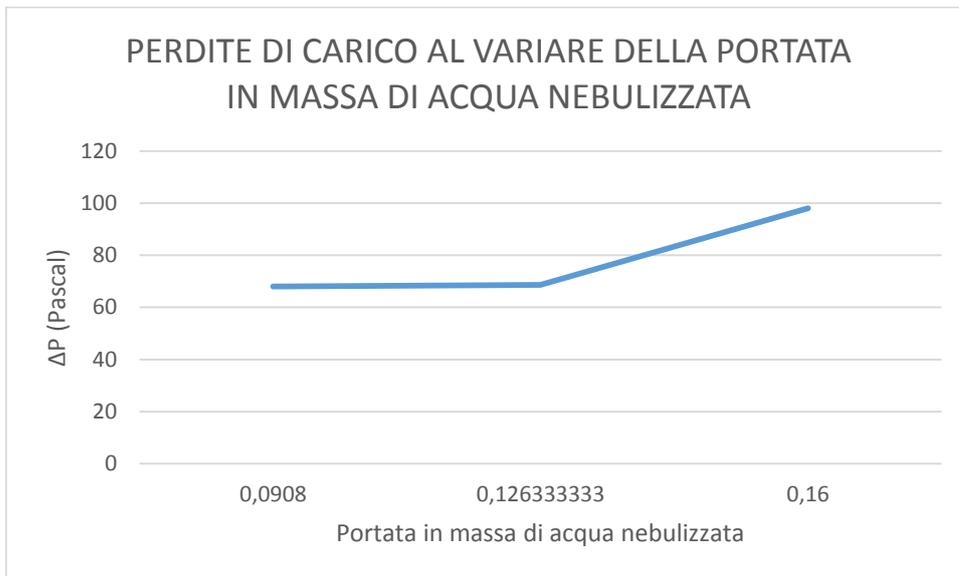


Figura 52: perdite di carico al variare della portata in massa di acqua nebulizzata mantenendo costante il numero di riempimenti strutturati.

Come volevasi dimostrare, l'aumento della portata di acqua agli ugelli determina un incremento delle perdite di carico.

#### 4.4.2.5.2 Rendimento totale del sistema di filtraggio

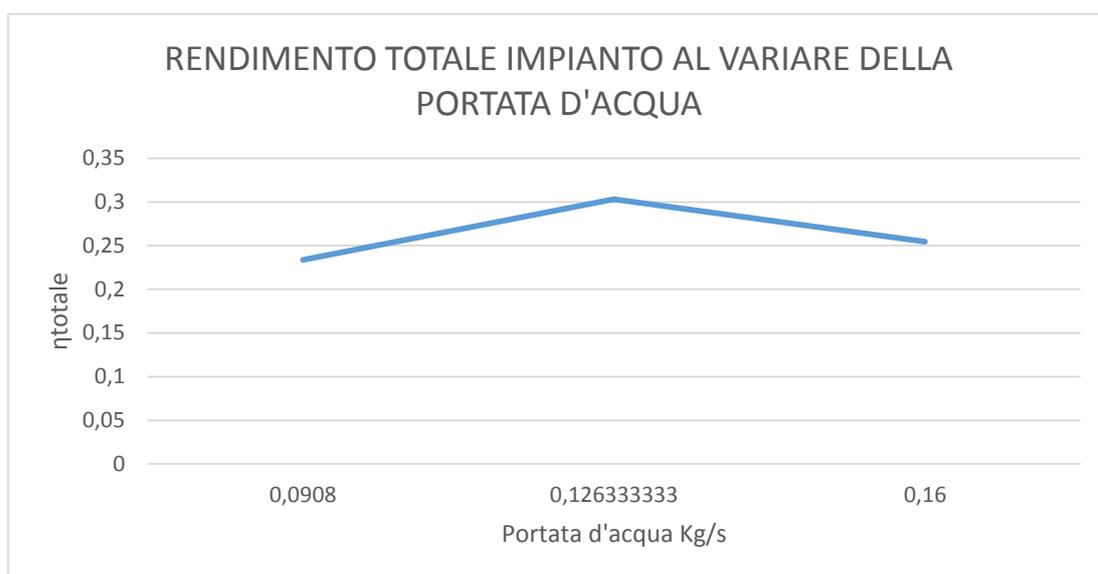


Figura 53: grafico del rendimento totale di impianto al variare della portata d'acqua mantenendo costante il numero di moduli di riempimento.

Purtroppo il rendimento di filtraggio non è una funzione monotona crescente con la portata d'acqua nebulizzata. Possiamo giustificare questa affermazione considerando che, raggiunta una portata d'acqua limite il separatore raggiunge la configurazione di flooding point ovvero allagamento del riempimento, determinando un aumento delle perdite di carico con caduta dei rendimenti di filtraggio. Tutto ciò si verifica quando la velocità del gas o la portata del liquido sono tali da far rimanere del liquido intrappolato nel separatore, impedendo al fluido di scorrere verso il basso.

L'ultimo grafico mostra l'efficienza di raccolta del PM dai fumi della caldaia a biomassa, lasciando invariata la portata d'acqua e facendo variare il numero di riempimenti strutturati:

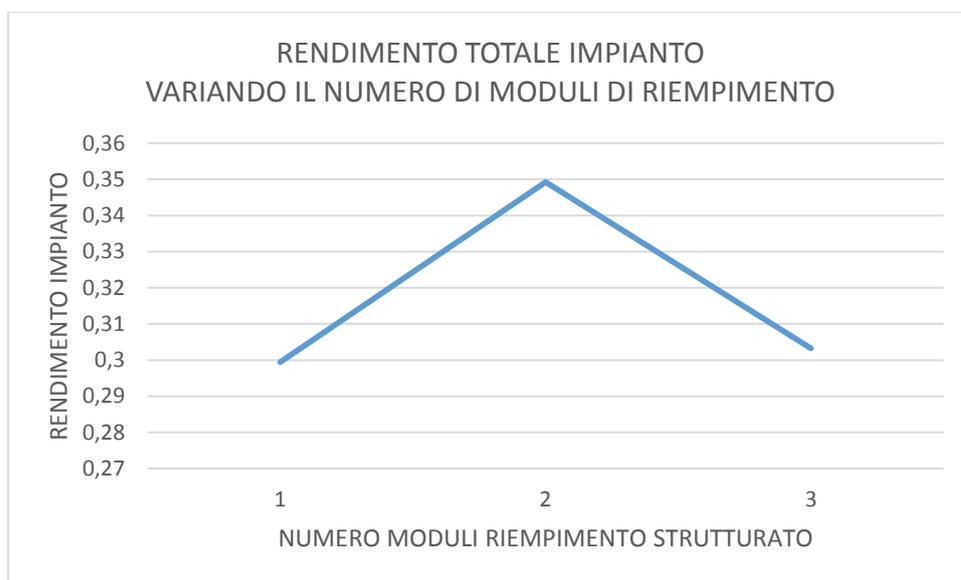


Figura 54: andamento del rendimento di raccolta al variare del numero di riempimenti strutturati mantenendo costante la portata di acqua agli ugelli.

Come ci aspettavamo dal calcolo delle perdite di carico, il rendimento della seconda configurazione è maggiore della configurazione avente un riempimento strutturato in più.

#### 4.4.2.5.3 Conclusioni sperimentazione riempimenti Refill Tech

Abbiamo cercato di replicare le condizioni operative di alcune aziende dedite alla pulizia di fumi da particolato proveniente da processi di saldatura. Tali imprese dichiarano di ottenere efficienze di rimozione del particolato superiori al 90%, affermazione che trova giustificazione nell'utilizzo della condensazione eterogenea. Gli esiti da noi raggiunti sono poco soddisfacenti, rispetto ai rendimenti ottenuti dalle aziende sopra citate, in quanto abbiamo dei limiti impiantistici determinati dalle piccole dimensioni delle caldaie utilizzate, nonché dai bassi costi di esercizio richiesti. Per favorire la condensazione eterogenea, infatti, bisogna garantire un certo grado di

saturazione dei fumi, come spiegheremo più dettagliatamente in seguito. Molte società operanti con temperature fumi prossime ai 200° hanno la possibilità di ottenere vapore a basso costo, sfruttando lo scambio termico fra portata di fumi e portata d'acqua nella torre scrubber. Purtroppo, i nostri fumi non hanno l'energia termica necessaria a favorire la formazione della giusta quantità di vapore in grado di saturare l'aria al 100% e, successivamente, in caso di raffreddamento, determinare un apporto di acqua sotto forma di gocce dell'ordine del micrometro che, sfruttando il particolato come nucleo di accrescimento, ne determineranno un sostanziale aumento dimensionale. Andiamo ora a calcolare di quanto riescono ad ingrandirsi le particelle aventi un diametro di 1 micrometro, grazie alla condensazione eterogenea, generando una saturazione dei fumi pari al 100%:

1 In uscita dalla caldaia i fumi possiedono un'umidità relativa del 15-20% ovvero il contenuto di vapore acqueo nell'aria secca è il 20% del suo massimo valore a quella data temperatura.

2 Nella nostra configurazione, quindi, non utilizziamo la condensazione eterogenea perché i fumi, secondo il diagramma di Mollier, raffreddandosi da 100° a circa 35°, rilasciano una quantità pari a 100 mg/Nm<sup>3</sup> di vapore che, considerando una portata di fumi di 34 Nm<sup>3</sup>/h si deduce facilmente la quantità totale di vapore prodotto all'ora. Essendo la concentrazione del particolato nell'ordine dei 200 mg/Nm<sup>3</sup>, risulta una concentrazione doppia del particolato rispetto alla concentrazione di vapore. Risulta evidente l'impossibilità di sfruttare la condensazione eterogenea nel nostro sistema impiantistico, dato che non possiamo produrre il vapore necessario dal raffreddamento dei fumi della caldaia.

3 Supponendo di poter iniettare vapore lungo l'isoterma a 100° faccio saturare i fumi al 100% a 100°. Raffreddando, libero circa 18 g di acqua per kilogrammo di fumi, ottenendo una quantità di acqua vaporizzata nettamente superiore rispetto alla quantità di particolato presente nella corrente gassosa. La quantità d'acqua ottenuta è circa 180 volte superiore alla nostra condizione operativa precedente.

4 Avendo tanta acqua vaporizzata a disposizione, posso supporre che la condensazione eterogenea determini un significativo contributo di accrescimento del particolato. Vediamo ora dai calcoli, quanto riesco ad accrescere le particelle.

Supponiamo:

- particelle aventi dimensione di 1 micrometro
- particelle perfettamente sferiche

Allora calcolo:

- volume particella =  $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 5,236 \cdot 10^{-19} \text{ m}^3$
- $\rho$  particella =  $1500 \text{ kg/m}^3$
- m particella =  $7,854 \cdot 10^{-16} \text{ kg}$
- numero particelle =  $\frac{cp}{mp} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{mp} = 2,54648 \cdot 10^{11}$
- numero particelle per una portata di fumi di un'ora  $nh = n \cdot 34 = 8,7257 \cdot 10^{12}$
- in un'ora ho  $18 \cdot 34 = 612$  grammi di acqua vaporizzata
- per calcolare quanta acqua in massa viene catturata da ogni particella =  $mh_{2o} = \frac{0,612}{nh} = 8,2514 \cdot 10^{-14} \text{ Kg}$
- volume acqua depositata sulla particella =  $\frac{mh_{2o}}{\rho_{h_{2o}}} = 8,2514 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3$
- volume finale particella accresciuta =  $8,30376 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3$
- diametro finale particella accresciuta =  $5,41 \text{ }\mu\text{m}$

Concludiamo che l'introduzione di vapore ha determinato un sensibile aumento dimensionale del PM che in queste dimensioni può essere facilmente raccolto. Dato però l'elevato costo d'esercizio della produzione del vapore, ci siamo diretti verso un'altra soluzione, ovvero l'aumento del packing density, al fine di massimizzare i rendimenti di filtraggio. L'obiettivo può essere raggiunto introducendo un adeguato numero di corpi riempienti a forma di sfera, capaci di diminuire il grado di vuoto del sistema di filtraggio, aumentando di conseguenza i rendimenti.

#### 4.4.2.6 Configurazione extra

Visti i modesti risultati ottenuti con l'utilizzo dei separatori Refill tech e gli ugelli nebulizzatori, abbandoniamo la strada dei riempimenti strutturati per analizzare le prestazioni dei packed bed ovvero letti riempiti di sfere di polietilene aventi raggio 3 mm e costituenti un letto alto 10 cm. I risultati ottenuti  $\eta = 43\%$  dimostrano l'apparente efficacia di questa soluzione, che in prima battuta si è dimostrata migliore delle sperimentazioni in precedenza effettuate, determinando rendimenti prossimi al 50%, seppur con perdite di carico intorno ai 570 Pa. Oggetto di future sperimentazioni può essere la modellazione della torre di lavaggio contenente le sfere di riempimento, scegliendo la migliore configurazione impiantistica.



Figura 55: packed bed tower utilizzata nella sperimentazione

#### 4.4.2.7 Cenni teorici sui packed bed

##### 4.4.2.7.1 Calcolo delle perdite di carico

Per il calcolo delle perdite di carico, considerando che in controcorrente al letto di riempimento è presente una portata d'acqua, bisogna fare uno step intermedio calcolando le perdite di carico in situazione di totale asciutto:

$$\frac{\Delta P_{dry}}{L} = f \cdot \frac{1}{dh} \cdot \rho g \cdot v(g)^2$$

con:

$$f = \text{fanning friction factor} = \frac{1,84}{Re g^{0,333}}$$

$$Re g = \text{numero di Reynolds della corrente gassosa} = \frac{\rho g \cdot v g \cdot dh}{\mu g}$$

$$dh = \text{diametro idraulico} = \frac{4 \cdot \epsilon oc}{A sp}$$

$$v(g) = \text{velocità attraverso gli orifizi} = \frac{U g}{\epsilon oc}$$

$\epsilon oc$  = frazione volumica della parte vuota

infine le perdite in condizioni di umido si calcolano nel seguente modo:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\Delta P_{dry}}{L} \cdot \exp\left(1,3 \cdot \epsilon l, oc \left(\frac{Rel, oc}{Frl, oc}\right)^{0,3}\right)$$

dove:

$Rel, oc$  = numero di Reynolds per il liquido

$$Frl, oc = \text{numero di Fruode per il liquido} = \frac{vl, oc}{\sqrt{g \cdot dh}}$$

$$vl, oc = \frac{Ul, oc}{\epsilon oc}$$

#### 4.4.2.8 Future sperimentazioni

Visti i buoni risultati ottenuti con l'utilizzo delle sfere in polietilene saranno oggetto di tesi future le seguenti configurazioni impiantistiche:

- 1) Utilizzo di una torre scrubber modificata come in figura:

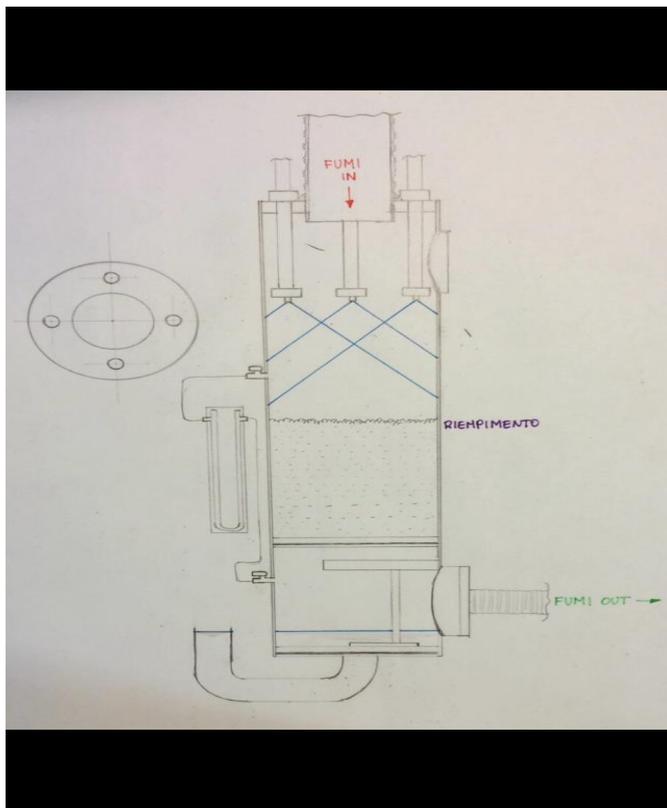


Figura 56: torre modificata

La torre proposta verrà utilizzata come base per le sperimentazioni di future tesi. Le modifiche sostanzialmente sono:

- ingresso fumi dalla flangia centrale sul tetto della torre;
- ugelli in controcorrente con i fumi, in modo da generare un effetto motore utile ad abbassare le perdite di carico;

- “packed bed” composto da corpi riempienti in polietilene;
  - corpo otturatore posto perpendicolarmente alla direzione del flusso di fumi, in modo da favorire il mescolamento dei fumi con l’acqua nebulizzata, posizionato sopra la sezione di uscita dei fumi;
  - utilizzo di 4 ugelli a cono pieno.
- 2) La seconda ipotesi di sperimentazione consiste nel riempire i separatori Refill da noi utilizzati con le sfere in polietilene, aumentando il packing density.
- 3) L’ultima ipotesi prevede l’utilizzo di tensioattivi da aggiungere all’acqua, in modo da permettere una migliore bagnabilità, diminuendo cioè l’angolo di contatto fra la goccia d’acqua e le sfere in polietilene, creando un film liquido attorno al corpo riempiente in grado di colmare gli spazi presenti fra una sfera e l’altra e incrementando ulteriormente il packing density.



## CONCLUSIONI

Le biomasse rappresentano una nobile iniziativa da parte del governo, volta a diminuire l'inquinamento derivante dall'aumento di gas serra nell'ambiente. D'altro canto, seppur limitando l'apporto di CO<sub>2</sub>, le biomasse rigettano in atmosfera dosi di particolato molto superiori rispetto i combustibili fossili, causando gravi problemi all'organismo. Siamo fiduciosi che possano essere introdotte nuove limitazioni sulle emissioni di particolato in atmosfera, in modo da garantire un futuro migliore per noi e per le generazioni a venire. Fino ad ora, purtroppo, non è stato possibile ottenere efficienze elevate per particolato compreso fra 0,3 e 1  $\mu\text{m}$ , mantenendo i consumi di energia elettrica consoni ad un utilizzo domestico. Il separatore che ho ottimizzato d'altro canto, a livello teorico, riesce ad ottenere dei buoni risultati a fronte di perdite di carico non troppo elevate. Rimando alle sperimentazioni successive il test riguardante il reale rendimento dell'oggetto da me analizzato, al fine di testarne l'affidabilità, nonché le reali performance di filtraggio. I test effettuati sul sistema di filtraggio contenente il separatore Refill si sono dimostrati molto economici, sia in termini di investimento d'impianto sia come costi di esercizio, purtroppo, però non hanno dimostrato altrettanta validità in termini di rendimento, che è rimasto sempre e comunque sotto il 50%. Da non sottovalutare, invece, il letto riempito di palline in policarbonato che, con i giusti accorgimenti che ho esposto nel paragrafo precedente, possono dare buoni risultati.

## BIBLIOGRAFIA

J.A.ROCHA, J.L.BRAVO AND J.R.FAIR, Distillation columns containing structured packings: a comprehensive model for their performance.1 hydraulic models, Separations research program, The university of Texas at Austin 1993

H.K.KOOPMAN, “An analitic model for droplet separation in vane separators and measurements of grade efficiency and pressure drop”. Institute of fluid mechanics Friedrich-Alexander University Germany (2014)

T.Charinpanitkul, “Deterministic model of open-space dust removal system using water spray nozzle: Effects of polydispersity of water droplet and dust particle”(2010)

H.T.Kim, C.H. Jung “Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception and impaction” (2001)

J.Ellenberger, R.Krishna “Counter-current operation of structured catalytically packed distillation columns: pressure drop, holdup and mixing” (1999).

C.Galletti,E.Brunazzi “A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels” (2008).

F.Fan “Experimental investigation on removal of coal-fired fine particles by a condensation scrubber” (2008).

E.Narimani “Optimization of vane mist eliminators” (2009).



# INDICE

INTRODUZIONE .....	3
CAPITOLO 1 LE BIOMASSE.....	5
1.1 CENNI SULLE BIOMASSE.....	5
1.2 PECULIARITA' E CLASSIFICAZIONE.....	8
1.3 PROCESSI PER L'UTILIZZO DI BIOMASSE .....	11
1.3.1 PROCESSI BIOCHIMICI .....	11
1.3.2 PROCESSI TERMOCHIMICI .....	13
1.4 NORMATIVE TECNICHE.....	15
1.4.1 NORMA UNI EN 3030-5:2012:.....	16
CAPITOLO 2 IL PARTICOLATO ATMOSFERICO .....	18
2.1 CLASSIFICAZIONE.....	19
2.2 EFFETTI DEL PARTICOLATO SULLA SALUTE UMANA .....	21
2.3 PARTICOLATO PRODOTTO DALLA COMBUSTIONE DI BIOMASSA .....	23
2.4 ENTITA' DELLE EMISSIONI.....	25
2.5 CONCENTRAZIONI SUL TERRITORIO ITALIANO.....	28
CAPITOLO 3 PRINCIPALI SISTEMI DI FILTRAGGIO DEL PARTICOLATO .....	31
3.1 CLASSIFICAZIONE DEI FILTRI SECONDO LA NORMA CEN EN 779-2002.....	32
3.2 FILTRI MECCANICI.....	33
3.2.1 CAMERE DI CALMA .....	34
3.2.2 CICLONI .....	35
3.2.3 DEPOLVERIZZATORE A MANICHE.....	38
3.2.4 DEPOLVERIZZATORE ELETTROSTATICO.....	41
3.2.5 FILTRO A UMIDO .....	42
3.2.5.1 Cicloni ad umido .....	42
3.2.5.2 Wet scrubber.....	43
CAPITOLO 4 PARTE SPERIMENTALE .....	56

4.1 STUDIO TEORICO ALLA BASE.....	56
4.2 RISULTATI TEORICI CON L'UTILIZZO DEL CALCOLATORE .....	62
4.2.1 OTTIMIZZAZIONE DEL SEPARATORE .....	62
4.2.2 CALCOLO TEORICO DELLE PERDITE DI CARICO .....	66
4.3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	67
4.3.1 CALDAIA.....	67
4.3.1.1 Comandi caldaia.....	68
4.3.1.2 Curva caratteristica della coclea con alimentazione a mais .....	69
4.3.1.3 Curva caratteristica dell'aspiratore fumi .....	69
4.3.1.4 Circuito per lo scarico termico .....	70
4.3.2 CIRCUITO IDRAULICO:.....	71
4.3.2.1 Radiatore .....	72
4.3.2.2 Pompa di circolazione .....	73
4.3.2.3 Valvola di scarico termico di sicurezza.....	74
4.3.2.4 Valvola di sfogo dell'aria (Jolly).....	75
4.3.2.5 Vaso di espansione .....	75
4.3.2.6 Riempimento impianto idrico della caldaia.....	76
4.3.2.7 Impianto idraulico torre di lavaggio:.....	76
4.3.3 CIRCUITO FUMI.....	77
4.3.3.1 Collegamenti flangiati .....	79
4.3.3.2 Diaframma.....	79
4.3.3.3 Aspiratori .....	80
4.3.3.4 Scambiatore di calore .....	81
4.3.3.5 Camino .....	82
4.3.4 STRUMENTI DI MISURA UTILIZZATI NELLA SPERIMENTAZIONE.....	83
4.3.4.1 Misura della portata d'aria in ingresso nella caldaia.....	84
4.3.4.2 Portata dei fumi .....	85
4.3.4.3 Portata d'acqua .....	88
4.3.4.4 Perdite di carico nella torre di lavaggio.....	89
4.3.4.5 Strumenti per la misurazione delle temperature:.....	90
4.3.5 QUADRO ELETTRICO.....	95
4.3.6 PROCEDURE DI CAMPIONAMENTO .....	96
.....	97
4.3.6.1 Strumentazione utilizzata per il campionamento .....	97
4.4 SPERIMENTAZIONI .....	106
4.4.1 Riempimento strutturato Refill Tech: .....	106
4.4.2 PROVE SPERIMENTALI SULL'IMPIANTO.....	108
4.4.2.1 Procedure da eseguire prima di ogni sperimentazione:.....	109
4.4.2.2 Configurazione 1 .....	112
4.4.2.3 Configurazione 2 .....	112

4.4.2.4 Configurazione 3 .....	113
4.4.2.5 Considerazioni sui risultati .....	114
4.4.2.6 Configurazione extra .....	120
4.4.2.7 Cenni teorici sui packed bed .....	120
4.4.2.8 Future sperimentazioni .....	122
CONCLUSIONI.....	125
BIBLIOGRAFIA.....	126
INDICE.....	128

