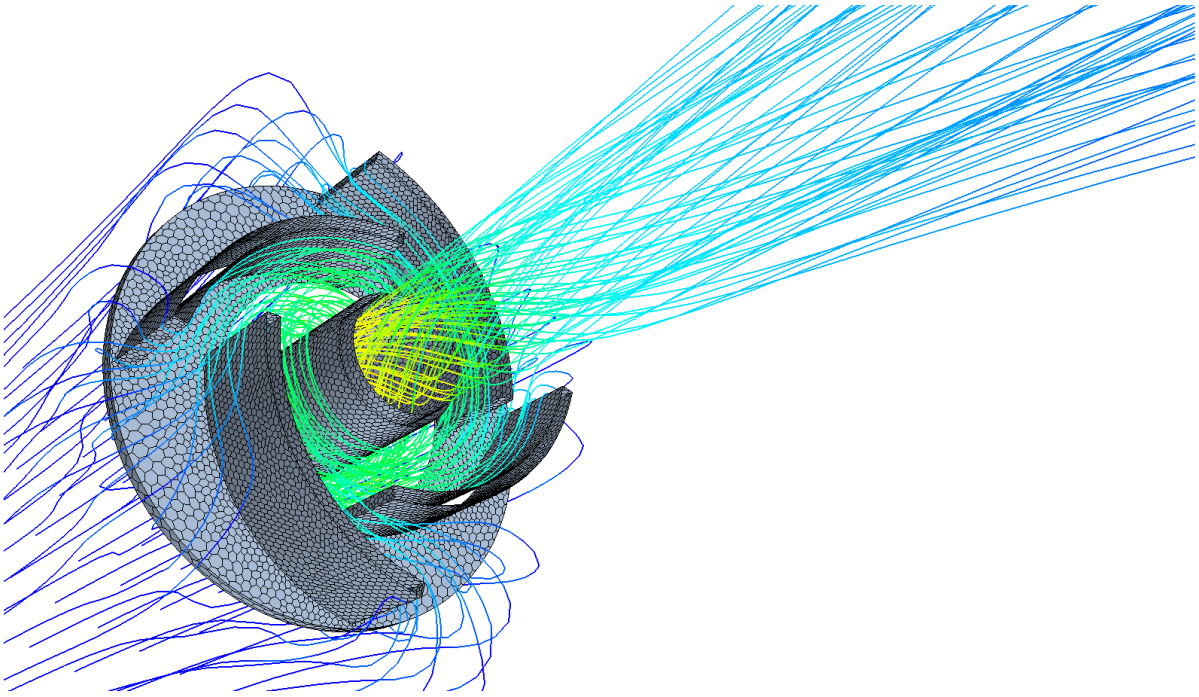
Università degli Studi di Udine
Dottorato di Ricerca in
Tecnologie Chimiche ed Energetiche
Ciclo XXIV

Tesi di Dottorato

Progettazione di dispositivi per la filtrazione dell'aria per cucine di tipo industriale: ottimizzazione e verifica sperimentale

Dott. Marco CARRIGLIO



COMMISSIONE

Prof. Riccardo AMIRANTE	Revisore
Prof. Valentino PEDIRODA	Revisore
Prof. Sergio CAVALIERI	Commissario
Prof. Giulio LORENZINI	Commissario
Prof. Piero PINAMONTI	Commissario
Prof. Carlo POLONI	Supervisore
Prof. Alfredo SOLDATI	Coordinatore del Dottorato

Posta elettronica dell'autore: marco.carriglio@gmail.com

Indirizzo dell'autore:

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Navale
Università degli Studi di Trieste
Via Valerio, 10
34127 Trieste – Italia
tel. +39 040 558 3231
web: `http://http://www.ing.units.it/`

Indice

Introduzione **1**

1 Simulazioni numeriche **3**
1.1 Il filtro 3
1.2 Mesh di calcolo 4
1.3 Condizioni al contorno 5
1.4 Risultati numerici 7
1.5 Realizzazione di un nuovo dispositivo 10
1.6 Simulazioni CFD 13

2 Ottimizzazione **17**
2.1 Filtro originale 17
2.2 Nuovo dispositivo 21
2.3 Confronto dei risultati 24

3 Prove sperimentali **27**
3.1 Filtro in produzione 27
3.1.1 Misurazioni di velocità 27
3.1.2 Misurazioni granulometriche 32
3.2 Nuovo dispositivo 35
3.2.1 Prototipazione rapida 36
3.2.2 Misurazioni di efficienza del filtro 38

4 Brevetto **45**
4.1 Descrizione dettagliata 45
4.2 Rivendicazioni 52

5 Conclusioni **57**

Bibliografia **59**

Elenco delle figure

1.1 La disposizione dei filtri in una cucina di tipo industriale 3
1.2 Il filtro (a) in foto e (b) nel CAD. 4
1.3 (a) Mesh di calcolo dell'intero dominio. Sono evidenziate le condizioni al contorno di entrata (inlet) ed uscita (outlet) dell'aria e le relative distanze dal filtro; (b) Ingrandimenti della mesh di calcolo nella zona delle superfici solide per evidenziare l'infittimento della mesh e lo strato di prismi a parete. 6
1.4 Particolare della sezione quotata. 7
1.5 Vista in sezione e dall'alto del dispositivo di filtrazione. In rosso la sezione presa in considerazione per i calcoli e le misure. 8
1.6 Andamento della pressione in funzione della portata nel i casi numerico e sperimentale. 10
1.7 Andamenti dei flussi di velocità all'interno del dominio di calcolo al variare del tempo. 11
1.8 Andamento dell'efficienza del filtro in funzione del diametro della particelle, per le 3 portate d'aria analizzate. 12
1.9 Schema di funzionamento in sezione di un singolo modulo costituente il nuovo filtro. 13
1.10 Mesh del filtro. 14
1.11 Sezione della mesh del filtro. 14

2.1 Quote parametrizzate durante l'ottimizzazione. 17
2.2 Il workflow definito in modeFRONTIER. 19
2.3 Un particolare della mesh a tetraedri in prossimità del filtro, realizzata con IcemCFD. 20
2.4 Scatter chart raffigurante efficienza e pressione a confronto; in grigio i designs virtuali, in rosso quelli reali. 21
2.5 Il workflow definito in modeFRONTIER. 22
2.6 Sei grandezze geometriche parametrizzate per l'ottimizzazione. 23
2.7 *Scatter chart* dei primi 40 *designs* valutati. 24
2.8 *Scatter chart* dei *designs* reali e virtuali a confronto e dei relativi fronti di pareto ottenuti. 25
2.9 Confronto risultati numerici delle varie geometrie 26

3.1 Particolare della struttura realizzata. 28
3.2 Apparecchiatura di misura: 1) Ottica, 2) Filtro, 3) Laser, 4) Elaboratore dati. 29
3.3 Uno dei piani ZY di misura. 29
3.4 Vettori di velocità ottenuti sperimentalmente. 30
3.5 Vettori di velocità ottenuti numericamente. 31
3.6 Distribuzione granulometrica del campione di prova. 32
3.7 Il filtro alla fine di una prova di aspirazione di particelle di vetro. 33
3.8 Distribuzione statistica dei campioni di vetro misurati. 34
3.9 Quote geometriche del filtro ottimizzato 35
3.10 Stampante "SOLIDO SD300 Pro" per la prototipazione rapida. 36
3.11 Impostazione dei piani di taglio per la stampante 3D. 37
3.12 Fasi di "sfogliatura" di alcuni pezzi costituenti il filtro 37
3.13 Il filtro completo stampato in PVC 38
3.14 La struttura di prova 40
3.15 Il nubulizzatore disegnato e costruito 41
3.16 Quantità percentuali di glicerina pesata su ciascun elemento del sistema di filtraggio 43

4.1 il filtro *Grease-X-Tractor* della ditta "Greenheck Fan Corporation" in (a) foto e in (b) un immagine presente nel brevetto. 46
4.2 Il filtro *JCE* della ditta "Jeven Oy" in (a) foto e in (b) un immagine presente nel brevetto. 47
4.3 Vista prospettica del nuovo filtro di separazione (matrice di 5 x 8 moduli). 48
4.4 Vista prospettica di un singolo modulo componente il filtro. 49
4.5 Vista in sezione assiale di un modulo con frecce indicanti la direzione del fluido. 50
4.6 Vista laterale del filtro di separazione. 51
4.7 Vista laterale di due filtri di separazione disposti in cascata 51
4.8 Una vista in esploso del filtro di separazione. 54
4.9 Vista inferiore di insiemi di parti definenti il filtro. 55
4.10 Vista inferiore di insiemi di parti definenti il filtro. 55

Introduzione

In diverse applicazioni industriali risulta necessario asportare il particolato presente nei fumi. In particolari circostanze, per esempio nelle stazioni di cottura delle cucine industriali, una insufficiente asportazione di particolato di grasso e vapori può essere pericoloso, in quanto tali sostanze possono risultare infiammabili ed entrare in contatto con parti del sistema di ventilazione.

La produzione di filtri di separazione di dispositivi di ventilazione è nota e consolidata da tempo, al punto che oramai risulta standardizzato l'impiego di acciaio inossidabile per la produzione degli stessi. Dunque, l'obbiettivo di tali filtri è ridurre la formazione di depositi ed incrostazioni nei condotti e nei ventilatori, diminuendo quindi la necessità di pulizia del sistema di ventilazione e migliorando la prevenzione di incendi e la salubrità dei luoghi in cui gli impianti di ventilazione sono installati.

I dispositivi di filtraggio vengono collegati al sistema di ventilazione ed installati, generalmente, in obliquo al di sopra di una zona di cottura, con l'obbiettivo di catturare e rimuovere i vapori e le particelle generati dalla preparazione dei cibi. La tecnica nota offre filtri comprendenti reti metalliche a nido d'ape, oppure filtri definenti labirinti in cui l'aria è costretta a passare percorrendo percorsi secondo due direzioni, imponendo cioè ai fumi spostamenti bidimensionali che inducano il particolare ad impattare con le pareti dei filtri per rimanervi imprigionate. Tale tipo di filtrazione meccanica risulta inefficiente, per particelle di dimensioni al di sotto dei 10 micron di diametro.

Un altro problema è legato al fatto che per incrementare l'efficienza dei filtri è necessario definire cammini di percorrenza dei fumi lunghi ed il più possibile contorti, cosa non particolarmente facile con lamierato in acciaio inossidabile che generalmente viene lavorato mediante presso-piegatura.

La cappa ad aspirazione forzata è diventata un elettrodomestico integrante delle cucine sia private che industriali. Negli anni si è evoluta sia tecnologicamente che esteticamente, migliorando in prestazioni e design. Lo sviluppo di nuove tecnologie sono indirizzate verso il miglioramento dell'efficacia, della silenziositàe della praticitàd'uso.

Il presente lavoro prende in esame una tipologia di filtro meccanico ampiamente diffuso sul mercato sia nazionale che internazionale [1, 2], per via della sua semplice geometria e della praticità d'uso e manutenzione.

In letteratura non sono però presenti articoli scientifici di analisi numeriche o sperimentali sulla fluidodinamica di tali dispositivi, ma principalmente si trovano articoli sui separatori di particelle a ciclone industriali [3]; inoltre è possibile trovare documentazione scientifica [4] oppure relazioni da parte di case produttrici [5] sull'intero sistema di ventilazione delle cappe da cucina ma nessun lavoro focalizzato principalmente sul filtro meccanico che viene impiegato.

Il dispositivo in esame è composto da una serie di lamierini di acciaio inossidabile piegati in modo tale da formare i canali di passaggio per il fluido e viene montato inclinato per consentire il drenaggio continuo dei grassi nella canaletta di raccolta inferiore.

La ricerca riguarda la definizione della fluidodinamica del dispositivo utilizzando codici numerici commerciali di termofluidodinamica computazionale. Le simulazioni sono state inizialmente semplificate partendo da una geometria ridotta bidimensionale e considerando il regime stazionario. Ma le simmetrie geometriche del dispositivo in esame non sono state riscontrate nella soluzione del problema e per tale motivo si è dovuto simulare la geometria completa considerando il tempo non stazionario ed impostando un intervallo massimo di 10 secondi.

Per ottenere una convalida dei risultati ottenuti numericamente, sono state effettuate delle misurazioni sperimentali presso il laboratorio del dipartimento realizzando una struttura di prova adatta a rilevare le velocitàdel campo di moto attraverso la tecnica di velocimetria laser Doppler. La caratteristica principale del sistema realizzato è la struttura in plexiglass trasparente in prossimità del filtro, fondamentale per permettere ai raggi laser di raggiungere le zone di interesse all'interno ed a valle del filtro.

L'analisi dei risultati ottenuti sia numericamente che sperimentalmente ha messo in evidenza il verificarsi di un fenomeno che non ci si aspettava di ottenere durante la fase iniziale di definizione del problema; l'aria in corrispondenza delle aperture di uscita dal dispositivo in esame subisce un'espansione improvvisa che provoca un'instabilitàmarcata ed una non simmetria del deflusso.

La ricerca ha portato ad una corretta modellazione numerica del filtro e della fisica che lo coinvolge; l'accuratezza dei risultati ottenuti permetterà di effettuare delle analisi granulometriche che consentiranno di determinare l'efficienza di separazione del filtro, in funzione del diametro delle particelle aspirate. Infine si potrà effettuare un'ottimizzazione numerica al fine di ottenere un filtro dalle migliori prestazioni e quindi più competitivo sul mercato.

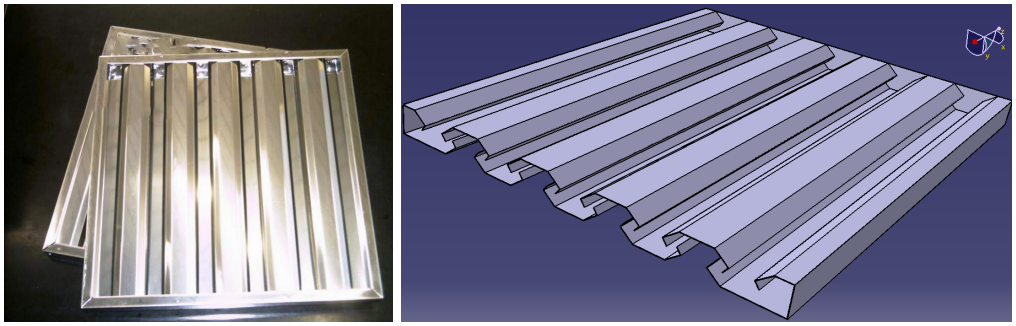
1

Simulazioni numeriche

1.1 Il filtro

Inizialmente tale tesi analizza il filtro più comune presente nella maggior parte delle cappe aspiranti industriali figura 1.1 e rappresentato in figura 1.2.

Figura 1.1: La disposizione dei filtri in una cucina di tipo industriale



(a) (b)

Figura 1.2: Il filtro (a) in foto e (b) nel CAD.

Il filtro è formato da due lamierini in acciaio inossidabile spesso 1 millimetro, e piegati in modo tale da formare un struttura delle dimensioni di 400 mm di larghezza, 500 mm di lunghezza e 28 mm di altezza (figura 1.2b) e viene montato in configurazione orizzontale o obliqua principalmente al di sopra di forni.

Il sistema di ventilazione connesso al forno aspira l'aria al di sopra della zona di cottura e la costringe a passare attraverso il filtro, che le fa attraversare un percorso a labirinto al suo interno con ripetuti cambi di direzione. Quest'ultimi hanno la funzione principale di favorire l'impatto delle particelle di grasso in sospensione nell'aria contro le pareti del filtro che vengono in questo modo trattenute al suo interno e non vengono espulse a valle del dispositivo nelle condutture di ventilazione che rimangono quindi maggiormente pulite.

1.2 Mesh di calcolo

Per analizzare la fluidodinamica del dispositivo, sono state effettuate delle simulazioni numeriche CFD tramite il software commerciale "Star-CCM+" della CD-Adapco[6].

Tutte le mesh sono composte da poliedri per l'intero dominio di calcolo e da prismi in prossimità delle superfici solide, in modo tale da cogliere lo strato limite che si genera a parete.

In particolar modo la mesh che è stata ritenuta adeguata per effettuare le simulazioni numeriche, presenta 196661 celle con le seguenti caratteristiche:

Il dominio di calcolo è stato dimensionato in modo tale che le zone di *inlet* ed *outlet* siano poste a debita distanza dal filtro, in modo tale che le condizioni al contorno non

	Poliedri		**Prismi**	
	parametri globali	parametri a parete		
dimensione min [mm]	6	0,3	-	
dimensione max [mm]	10	0,5	-	
rapp. di crescita [-]	1.1		1.2	
n° di strati [-]	-		4	
Spessore max [mm]	-		0.25	Totale:
n° celle [-]	191372		5266	196661

Tabella 1.1: Dimensioni caratteristiche della mesh.

influenzino i flussi convettivi; si è imposta dunque una distanza di $100mm$ a monte e $600mm$ a valle del filtro.

Per semplificare e ridurre il dispositivo, è stato previsto di andare a modellare solo la sezione centrale quadrata dello stesso di lato 240mm come indicato in rosso in figura 1.5. Tale scelta è stata principalmente orientata alle prove sperimentali che prevedranno la chiusura degli inserti metallici all'interno di un contenitore in plexiglas trasparente come verrà spiegato in seguito (capitolo 3).

1.3 Condizioni al contorno

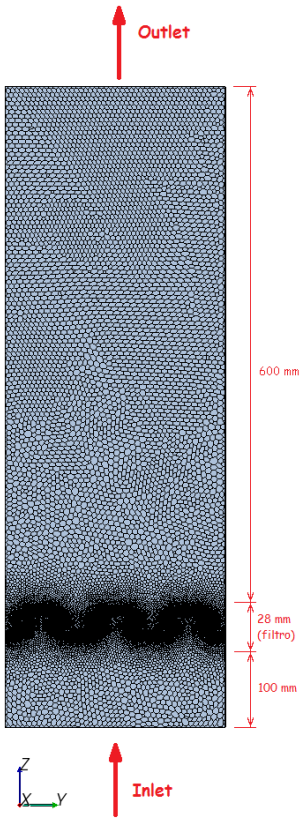
Per la risoluzione della fluidodinamica del problema, sono state scelte le equazioni del secondo ordine, in modo tale da ottenere dei risultati il quanto pi accurati possibile.

L'aria è stata considerata a densità costante e pari al valore (1.18415 kg/m^3) che avrebbe alla temperatura ambiente di 23° C e a pressione atmosferica.

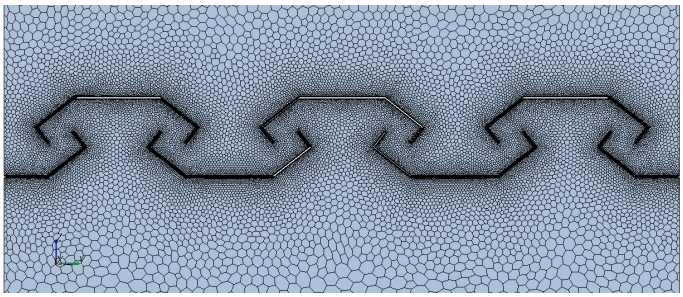
Tra le condizioni al contorno impostate, sulla superficie di inlet è stato imposto un valore di velocità in base alle portate di aspirazione (vedi tabella 1.2) e alla geometria del filtro, mentre all'outlet è stato impostato un valore di pressione pari alla pressione atmosferica ($101325Pa$).

Il calcolo è stato effettuato considerando la non stazionarietà temporale del sistema integrando i risultati in un intervallo temporale massimo di 10 secondi procedendo con degli step da 1/10 di secondo.

Durante il calcolo, sono stati monitorati i valori dei residui delle varie equazioni che il solutore stava risolvendo, ed è stato scelto come criterio di convergenza, il raggiungimento del valore pari a $1E-4$, ritenuto adeguato per il raggiungimento di risultati accurati.



(a)



(b)

Figura 1.3: (a) Mesh di calcolo dell'intero dominio. Sono evidenziate le condizioni al contorno di entrata (inlet) ed uscita (outlet) dell'aria e le relative distanze dal filtro; (b) Ingrandimenti della mesh di calcolo nella zona delle superfici solide per evidenziare l'infittimento della mesh e lo strato di prismi a parete.

Per quanto riguarda le simulazioni multi-fase, è stato scelto l'approccio Lagrangiano che ipotizza il sistema rappresentabile da un numero elevatissimo di particelle (in questo caso le particelle di grasso) in movimento casuale[9].

Per la definizione del grasso quindi si sono scelte le caratteristiche fisiche dell'olio di paraffina, lo stesso che è stato utilizzato per le prove sperimentali, impostando quindi una densità pari a $800kg/m^3$ e delle dimensioni variabili per quanto riguarda il diametro della particelle che vanno da 0.5 micrometri fino ad un massimo di $100\mu m$, in base ai dati reperiti in letteratura[7].

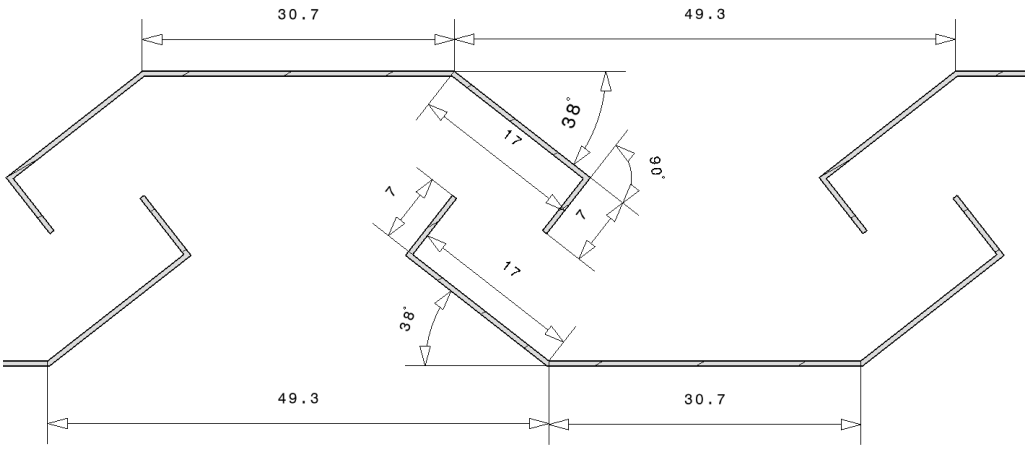


Figura 1.4: Particolare della sezione quotata.

Portata $[m^3/h]$		**Velocità** $[m/s]$
300	$\rightarrow$	0.417
450	$\rightarrow$	0.625
600	$\rightarrow$	0.833

Tabella 1.2: Conversione dal valore di portata a quello di velocità.

1.4 Risultati numerici

I risultati che si sono ottenuti tramite le simulazioni numeriche, sono stati poi confrontati con le misure sperimentali effettuate dalla "Stainless Steel Performance S.p.A."[10].

Le simulazioni eseguite si dividono in due parti; il primo step ha riguardato la messa a punto del modello fluidodinamico, per riuscire ad ottenere le stesse perdite di carico riscontrate sperimentalmente.

In tabella 1.3 e in figura 1.6 è riportato l'andamento delle pressioni ricavate numericamente, in confronto a quello ricavate sperimentalmente. Mentre i grafici in figura 1.7 riportano l'andamento dei flussi di velocità all'interno del dominio di calcolo al variare del tempo ad intervalli di mezzo secondo; sono riportate le immagini fino al 3° secondo computato, in quanto nel tempo rimanente la soluzione risulta stabile ed invariata.

Il flusso attraverso il filtro è risultato instabile e non stazionario e si è dimostrato corretto l'utilizzo di modelli non-stazionari impliciti integrando per un intervallo di tempo massimo di 10 secondi.

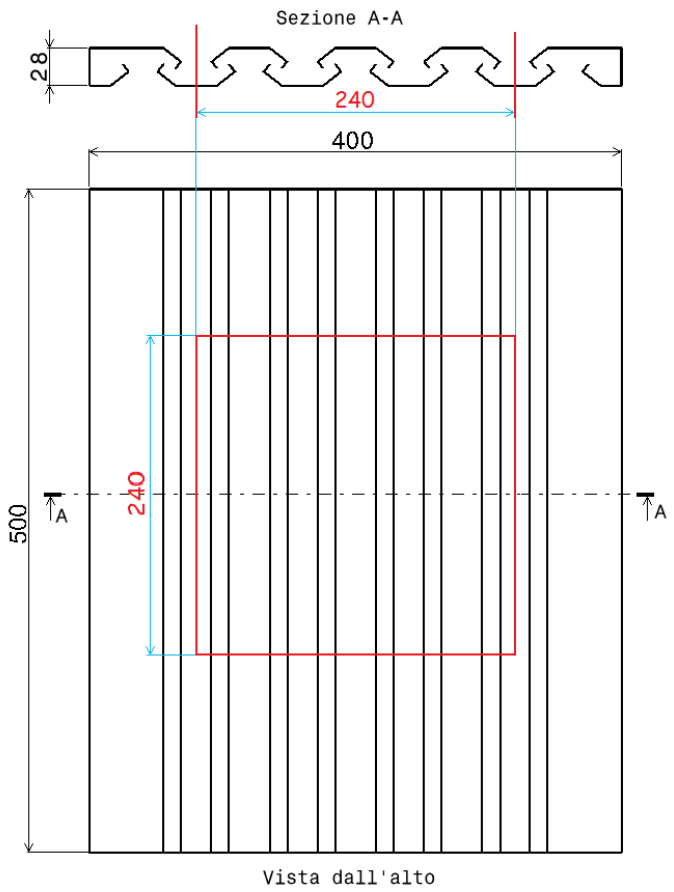


Figura 1.5: Vista in sezione e dall'alto del dispositivo di filtrazione. In rosso la sezione presa in considerazione per i calcoli e le misure.

Le simulazioni numeriche hanno messo in evidenza un fenomeno, successivamente confermato dalle prove sperimentali, che non ci si aspettava di ottenere durante la fase iniziale di definizione del problema; considerando la geometria semplice con la sua periodicità lungo le direzioni sia X che Z ci si aspettava di ottenere una simmetria pure per l'andamento del flusso in uscita dal filtro.

Al contrario l'aria in corrispondenza delle 4 aperture di uscita dal dispositivo in esame subisce un'espansione improvvisa (*Planar Sudden Expansion* - PSE) che provoca un'instabilità marcata e una non simmetria del deflusso.

Il PSE è un fenomeno che si verifica principalmente con flussi turbolenti e rapporti di espansione della sezione di passaggio maggiori di 3 [11, 12], come nel caso in questione. Il

Portata	**Pressioni** $[Pa]$		**Errore**	**Err. relativo**
$[m^3/h]$	Simulazioni	dati sperimentali	$[Pa]$	[%]
300	15.198	14	1.198	8.6
450	34.034	31	3.034	9.8
600	60.257	58	2.257	3.9

Tabella 1.3: Risultati numerici e sperimentali al variare della portata, con i relativi errori.

flusso in presenza della brusca espansione geometrica devia il suo percorso dall'asse delle singole uscite andando ad attaccarsi ad una delle due pareti laterali. Tale comportamento è ben visibile andando a visualizzare l'andamento dei flussi convettivi (figura 1.7) ottenuti numericamente.

Il secondo step di simulazioni ha invece riguardato la simulazione dell'andamento di particelle di grasso all'interno del dominio.

Sono state analizzate le precedenti 3 condizioni di funzionamento, alle portate di 300, 450 e 600 m^3/h, e variando la dimensione delle particelle da un minimo di 0.5 micron ad un massimo di 100 micron, per visualizzare in modo chiaro che tipo di particelle non riusciranno a superare il labirinto del filtro.

Successivamente si sono filtrati ed analizzati i risultati in modo tale da ricavare l'efficienza di separazione del filtro meccanico, calcolata tramite la seguente formula:

$$Efficienza = \frac{(massa_{particelle})_{inlet} - (massa_{particelle})_{outlet}}{(massa_{particelle})_{inlet}} * 100 \tag{1.1}$$

che rappresenta il rapporto tra la quantità di particelle trattenute dal dispositivo e la quantità totale che entra nel sistema. I risultati ottenuti sono riportati nel grafico di figura 1.8.

Come ci si poteva aspettare, a parità di diametro delle particelle iniettate, l'efficienza aumenta all'aumentare della portata di aria aspirata attraverso il filtro. Il grafico riporta solo il range di diametri da 0.5 a 25 micron, zona in cui si nota l'aumento di efficienza da circa il 0% fino al 100%.

Per tutte le portate simulate, si nota un aumento dell'efficienza nei sistemi in cui sono state iniettate particelle con diametro maggiore a circa 10 micron.

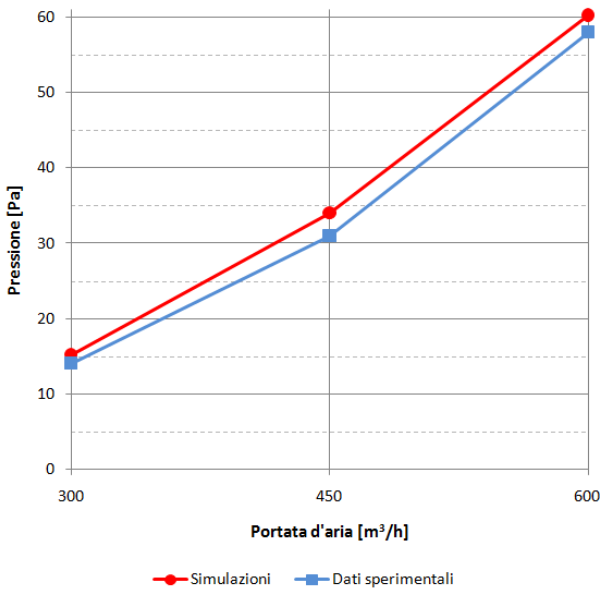


Figura 1.6: Andamento della pressione in funzione della portata nel i casi numerico e sperimentale.

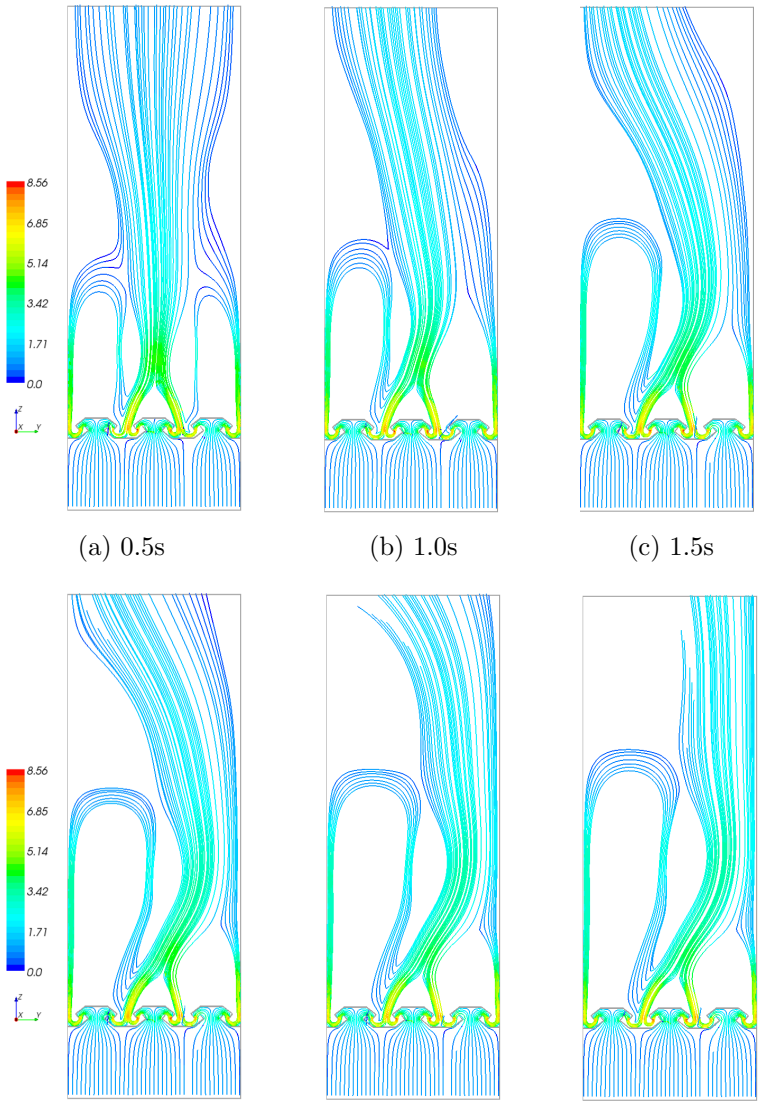
1.5 Realizzazione di un nuovo dispositivo

Il filtro esposto nei paragrafi precedenti ha presentato scarse prestazioni nel filtrare particelle di piccole dimensioni (diametro $<$ 10 micron) principalmente per i seguenti motivi :

- Flusso bidimensionale
- Tempo di percorrenza limitato del fluido al suo interno

Per tale motivo è stato ideato un nuovo dispositivo che sia in grado di risolvere gli inconvenienti riscontrati e che sia quindi caratterizzato da una geometria che consenta un percorso tridimensionale del fluido per un percorso maggiorato, con lo scopo di ottenere un filtro di separazione che sia più efficiente rispetto ai filtri tradizionali e che presenti una struttura particolarmente compatta e facilmente assemblabile.

Il nuovo filtro ideato è composto da una piastra sulla quale è prevista una matrice di moduli di filtrazione uguali; questi ultimi comprendono un elemento palettato avente forma tronco-cilindrica e definente un percorso centripeto la cui uscita è in comunicazione con un condotto anulare a sviluppo assiale definito da un primo condotto interno e



(a) 0.5s (b) 1.0s (c) 1.5s

(d) 2.0s (e) 2.5s (f) 3.0s

Figura 1.7: Andamenti dei flussi di velocità all'interno del dominio di calcolo al variare del tempo.

concentrico ad un secondo condotto. Tale secondo condotto è preferibilmente definito da un bicchiere comprendente un fondo giustapposto a cappuccio su detto primo condotto in modo da mettere in comunicazione detto condotto anulare con un volume interno a

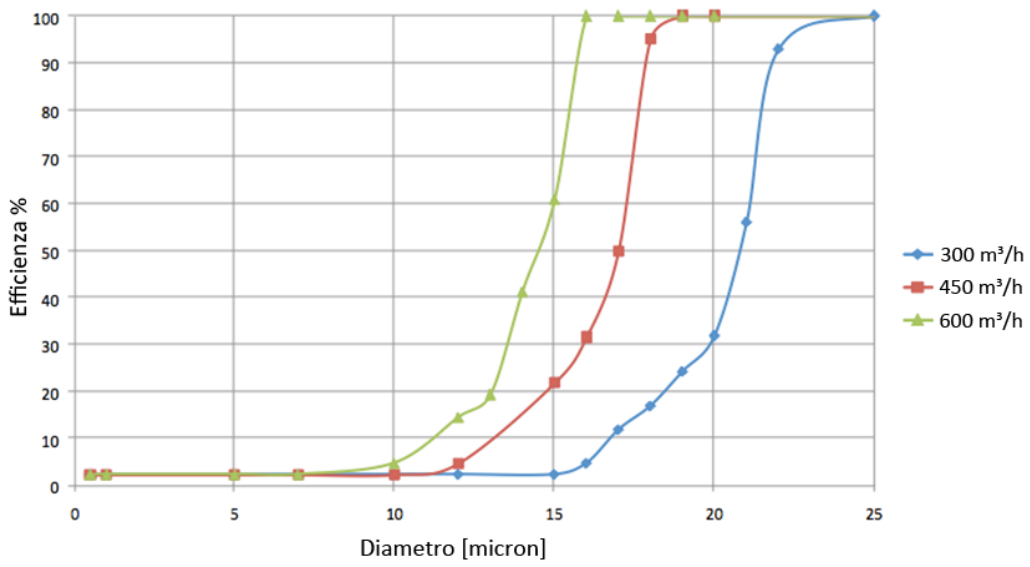


Figura 1.8: Andamento dell'efficienza del filtro in funzione del diametro della particelle, per le 3 portate d'aria analizzate.

detto primo condotto.

Facendo riferimento a figura 1.9 il flusso d'aria "sporca" di grasso entra nella zona superiore del filtro di forma cilindrica, e anche grazie a palette opportunamente disposte ed angolate l'aria al suo interno incomincia a girare vorticosamente dirigendosi verso il fondo conico dello stesso. A causa della forza centrifuga le particelle di grasso vengono proiettate sulle pareti dove scivolano verso la parte bassa. L'aria prosegue il suo percorso lungo il canale centrale uscendo assialmente dalla sommità del dispositivo.

Il filtro è stato pensato composto da semplici estrusioni in modo tale che risulti di semplice costruzione, con possibilità di essere stampato anche in plastica, garantendo la competitività anche per quanto riguarda i costi, oltre all'efficienza di separazione.

Ulteriore caratteristica del dispositivo è la sua disposizione multipla, come rappresentato nella figura 4.3. In tale modo si potranno ridurre le dimensioni di ciascun dispositivo a ciclone ed aumentarli o ridurli in numero in base alle esigenze operative.

Per aumentare l'efficienza di separazione di tale tipi di filtri è possibile prevedere di ottenere due o più piastre modulari (figura 4.7). Inoltre negli stadi successivi al primo si può considerare l'inserimento di catalizzatori chimicamente attivi, a rivestimento di alcune superfici interne (principalmente il tubo centrale di fuoriuscita dell'aria), che abbiano la doppia funzione di catturare a se le particelle trasportate dall'aria e di abbattere gli

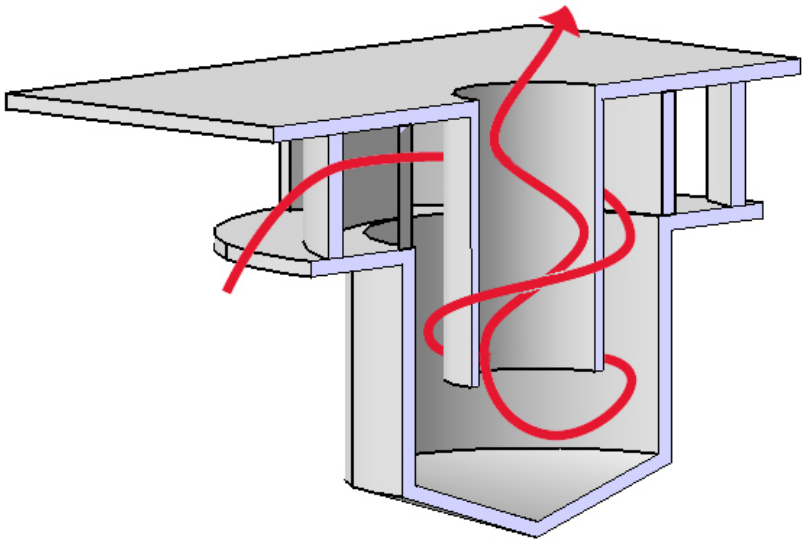


Figura 1.9: Schema di funzionamento in sezione di un singolo modulo costituente il nuovo filtro.

odori.

1.6 Simulazioni CFD

Sono state effettuate delle simulazioni numeriche CFD con il software "Star-CCM+" [6] di un filtro costituito da un solo modulo. La sua geometria è stata parametrizzata con il software CAD "CATIA" andando a prevedere un box esterno che la racchiudesse e che avrebbe servito a simulare il dominio fluido che circonda il filtro. Tale dominio è stato dimensionato considerando $120mm$ a monte del filtro e $600mm$ a valle in modo tale da definire le condizioni al contorno a distanze adeguate che non influenzano la zona di interesse.

Come per le precedenti simulazioni numeriche, la mesh è composta da poliedri per l'intero dominio di calcolo e da prismi in prossimità delle superfici solide per la risoluzione dello strato limite che si genera a parete. Dopo un'analisi *grid independent* atta a valutare l'indipendenza dei risultati dal tipo di mesh, è stata imposta una dimensione globale delle celle pari a $10mm$ ed un infittimento a parete di $0.5mm$; le celle prismatiche sono state dimensionate in 6 strati per un'altezza totale di $0.5mm$ e con un fattore di crescita pari

a 1.2.

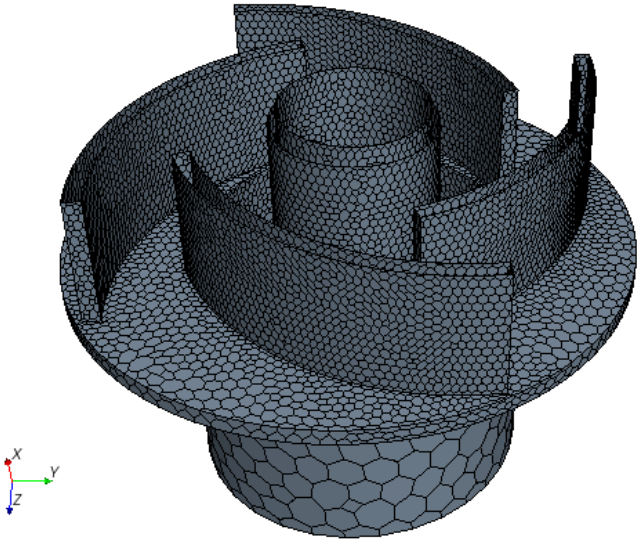


Figura 1.10: Mesh del filtro.

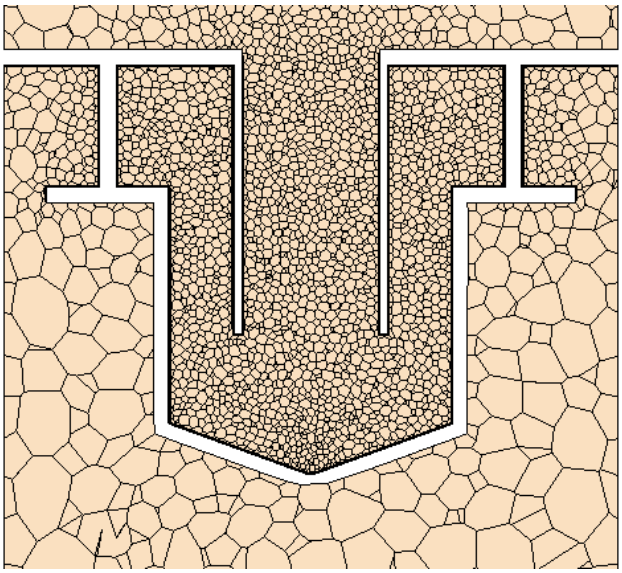


Figura 1.11: Sezione della mesh del filtro.

Per la risoluzione fisica del problema sono state considerate le stesse condizioni al contorno utilizzate per il filtro originale ed esposte nel capitolo 1.3.

L'aria è stata considerata ad un temperatura di 23° C e a pressione atmosferica (imposta pari a $101325Pa$ sulla superficie di outlet); sulla superficie di inlet è stato imposto un valore di velocità in base alle stesse portate di aspirazione operative del filtro originale in produzione (tabella 1.2).

Le simulazioni sono state impostate come non stazionarie nel campo temporale, integrando i risultati in un intervallo temporale massimo di 10 secondi (con step da 1/10 di secondo); è stato scelto l'approccio multi-fase Lagrangiano e le particelle di grasso sono state imposte ad una densità pari a $800kg/m^3$ (la stessa densità dell'olio di paraffina) ed aventi il diametro variabile da 0.5 micrometri fino ad un massimo di $100\mu m$.

2

Ottimizzazione

2.1 Filtro originale

Il filtro originale presenta buoni valori di efficienza per particelle di diametro superiore a 12 micron (figura 1.8); per valori inferiori invece, anche aumentando la portata d'aria del sistema, le particelle di grasso riesco ad oltrepassare il filtro senza venir trattenute dallo stesso.

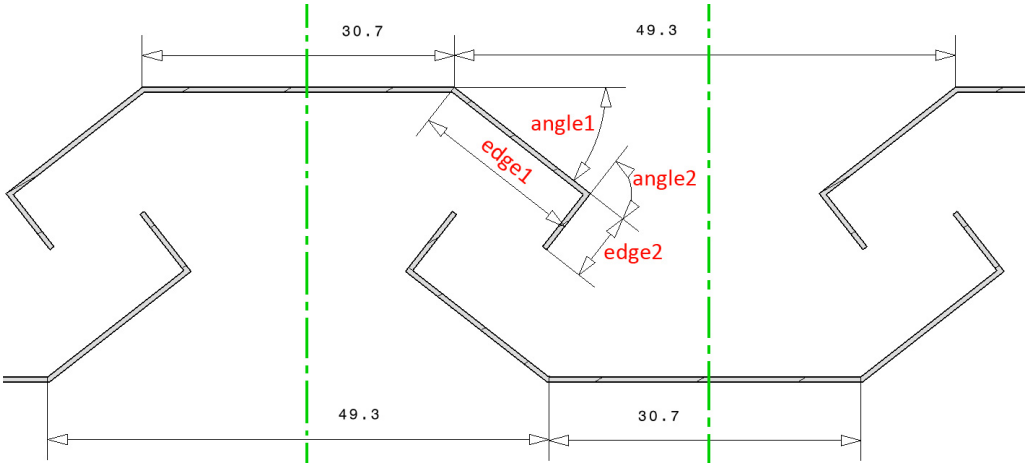


Figura 2.1: Quote parametrizzate durante l'ottimizzazione.

Per ottenere prestazioni migliori anche per diametri inferiori di 13 micron, si è deciso di ottimizzare la geometria andando a parametrizzare le seguenti 5 grandezze:

- i 2 angoli di piegatura della lamiera, che formano i canali del filtro, *angle1* e *angle2*;
- i 2 lati piegati, *edge1* e *edge2*;

- in numero di aperture del filtro.

In figura 2.1 sono evidenziati in rosso tali parametri su una zona della superficie piegata, i quali per simmetria del sistema risultano identici per le altre zone di piegatura.

Dalle simulazioni precedenti (vedi paragrafo 1.4) è risultato che l'instabilità del flusso si verifica solo a valle del filtro; inoltre si è rilevato sia numericamente che sperimentalmente che le particelle si depositano solamente sulle pareti interne del canale e non su quelle esterne a valle del canale stesso. Tali risultati indicano che l'espansione improvvisa del flusso all'uscita del filtro e il moto instabile che ne comporta, non influenzano l'effetto filtrante del dispositivo, visto che non si sono ritrovate particelle sulle superfici del filtro a valle dell'uscita dei canali interni.

Per i motivi appena descritti si è deciso di semplificare la geometria e sfruttare le sue molteplici simmetrie per la fase di ottimizzazione. È stato considerata solo la parte di filtro tra i due assi colorati in verde in figura 2.1 in modo tale da ottenere un dominio di calcolo inferiore e ridurre in tale modo il costo computazionale.

L'ottimizzazione è stata eseguita utilizzando il software modeFRONTIER[16]. In figura 2.2 è riportato il workflow utilizzato durante questa fase e che descrive il flusso logico ed il flusso dei dati impostato.

Come anticipato in precedenza, sono stati impostate 5 variabili di input alle quali sono stati applicati dei vincoli geometrici, mentre gli output sono composti dalla perdita di carico del sistema e dall'efficienza di separazione per diversi diametri delle particelle e calcolata in base all'equazione 1.1. Sono stati imposti degli obbiettivi al sistema per minimizzare la perdita di carico provocata dal filtro e per massimizzare il rendimento del dispositivo.

Il flusso logico definito in modeFRONTIER, ed esattamente i programmi che sono stati utilizzati per portar a compimento ciascun design durante l'ottimizzazione sono composti da:

- *CATIA*, il software CAD utilizzato per realizzare la geometria parametrica;
- *IcemCFD*, per realizzare la mesh di calcolo (figura 2.3);
- *CFX*, per la definizione delle condizioni al contorno (con CFX-Pre), per la soluzione (CFX-Solver) e la lettura dei risultati (CFX-Post).

Per l'interfaccia con il software CATIA si è utilizzato il suo nodo di integrazione diretto disponibile nel software di ottimizzazione, mentre per automatizzare il processo con IcemCFD e con CFX si sono realizzate delle macro apposite per poter lanciare ciascun software in batch direttamente da modeFRONTIER.

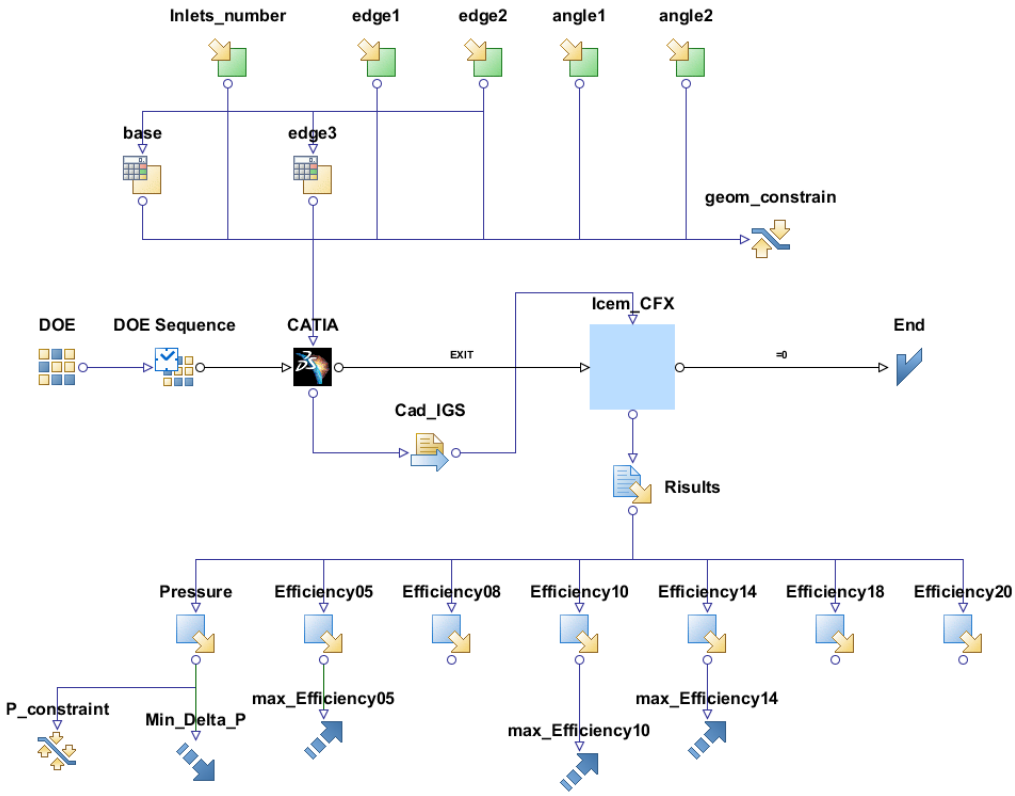


Figura 2.2: Il workflow definito in modeFRONTIER.

Inizialmente si è realizzato DOE (*Design of Experiments*) composto da 40 configurazioni geometriche diverse e create in modo random in base al range di variazione di ciascun parametro di input definito in precedenza.

Ciascun design è stato processato da modeFRONTIER in modo automatico ed ha richiesto in media un tempo pari a 1 ora e mezza circa per l'ottenimento degli output richiesti.

Visto l'elevato onere computazionale richiesto, principalmente per la fase di creazione della mesh e di risoluzione da parte del solver CFD, successivamente si sono realizzati delle superfici di risposta (*Response Surface Methodology* o RSM) sui quali valutare la successiva fase di ottimizzazione.

Si sono quindi realizzate 7 RSM, una per ogni output definito nel workflow e ciascuna funzione di tutti gli input, utilizzando il DOE, calcolato nella fase precedente, come database di training per la loro creazione, effettuata tramite l'algoritmo *Kriging*. Essendo

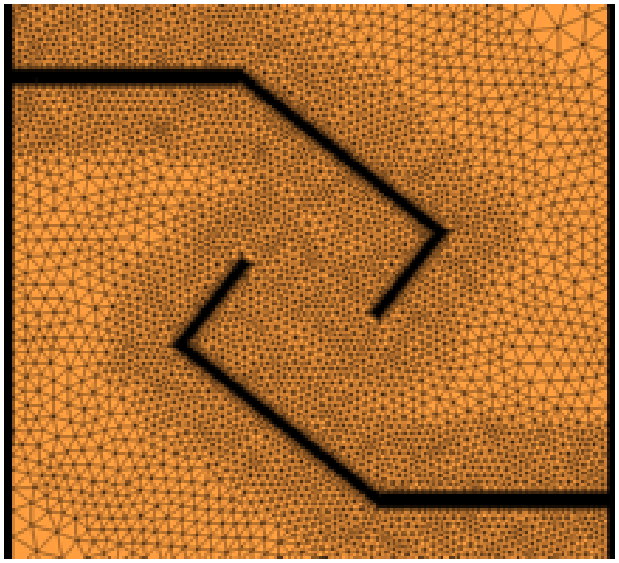


Figura 2.3: Un particolare della mesh a tetraedri in prossimità del filtro, realizzata con IcemCFD.

le RSM dei metamodelli, dei modelli matematici approssimati, è possibile valutare un numero elevato di configurazioni in tempi pressochè trascurabili in confronto allo loro risoluzione reale attraverso il solver CFD.

La seconda fase ha quindi riguardato l'ottimizzazione del sistema interamente sulle superfici di risposta, utilizzando l'algoritmo genetico multi-obbiettivo NSGA-II ed impostandolo in modo tale che evolva per 50 generazioni.

Tale fase, terminata in pochi secondi, ha generato 4000 nuovi designs. Tali configurazioni, essendo state calcolati su dei modelli matematici, si definiscono virtuali e per tale motivo devono essere validati. Da un analisi del fronte di pareto virtuale, che rappresenta l'insieme delle soluzioni non dominate, sono stati selezionati 20 designs per effettuare la validazione delle RSM; la successiva fase consisteva quindi nel validare tali 20 configurazioni per ottenere quindi il reale valore degli output.

I nuovi risultati reali sono stati aggiunti al DOE iniziale e sono state create delle nuove RSM, che risultano essere più accurate delle precedenti, visto che si è utilizzato un *training set* più ampio, e sono poi state verificate come in precedenza. Tale procedimento di creazione delle RSM, della loro successiva ottimizzazione virtuale e validazione è stato eseguito per 3 volte.

Alla fine di questo processo di ottimizzazione attraverso l'uso delle RSM ne è risultato un database composto da circa 6800 configurazione diverse, di cui 180 erano i design reali.

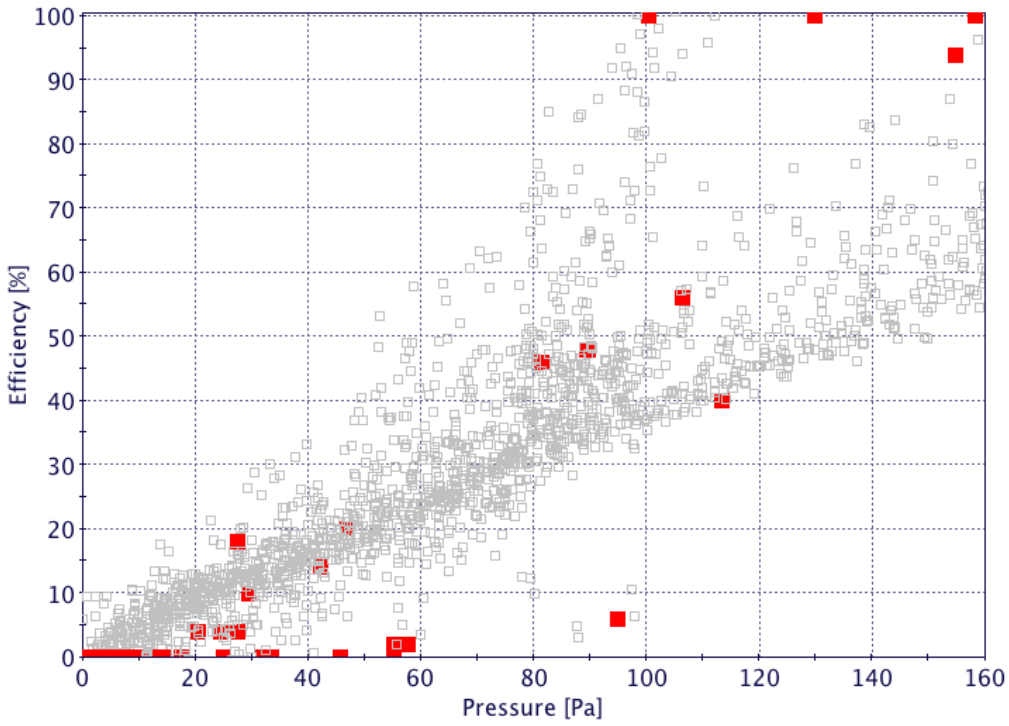


Figura 2.4: Scatter chart raffigurante efficienza e pressione a confronto; in grigio i designs virtuali, in rosso quelli reali.

In figura 2.4 è riportato uno *scatter chart* con tutti i designs rappresentati in funzione delle perdite di pressione e dell'efficienza. I designs in grigio sono quelli virtuali mentre quelli in rosso sono i reali.

2.2 Nuovo dispositivo

Il filtro di nuova ideazione è stato realizzato con il software CAD impostando dai valori soggettivi alle quote. Si è reso quindi necessario ottimizzare la geometria in funzione degli obbiettivi prefissati per questo lavoro, che riguardano la minimizzazione delle perdite di carico e la massimizzazione dell'efficienza.

Per tale fase di ottimizzazione si è utilizzato il software modeFRONTIER[16]. In figura 2.5 è riportato il workflow utilizzato durante questa fase e che descrive il flusso logico ed il flusso dei dati impostato. Il flusso logico è definito dall'algoritmo di ottimizzazione prescelto, dal nodo CATIA con il quale verrà creata la geometria, e dal nodo DOS con

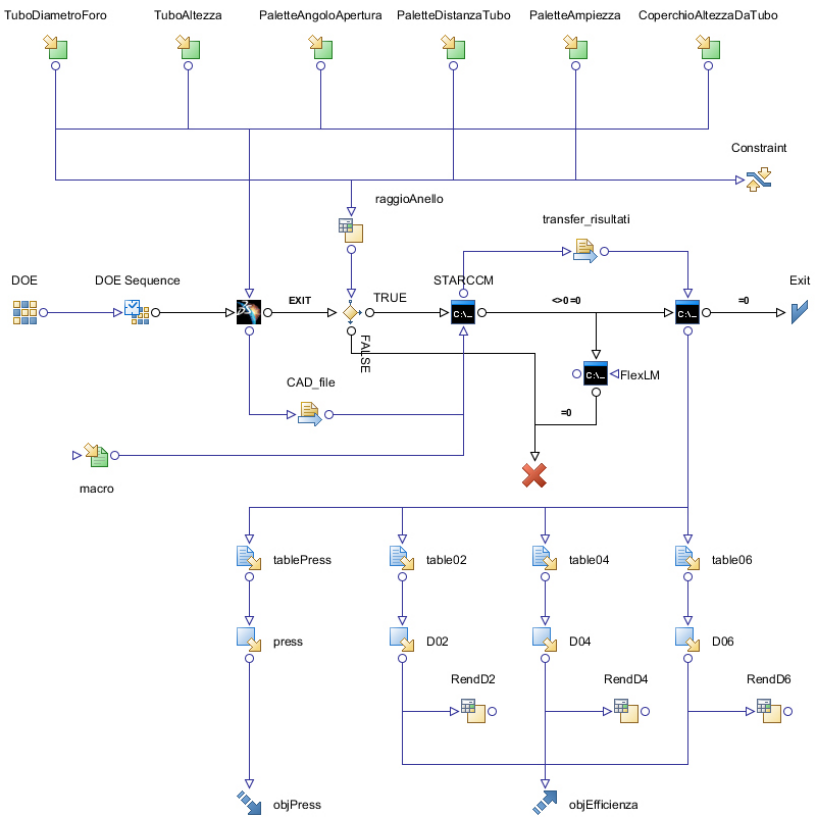


Figura 2.5: Il workflow definito in modeFRONTIER.

il quale verrà eseguito un script per eseguire Star-CCM+ in modalità batch. Mentre il flusso dei dati è costituito dai parametri di input, quelli di output ed gli obbiettivi desiderati.

Per impostare l'ottimizzazione di sono scelti i seguenti parametri geometrici come input variabili, all'interno di ciascun *bounds* di variazione, e che sono rappresentati in figura 2.6 :

1. Ampiezza del canale di ingresso formato dalle palette - estremi di variazione da un minimo di 8 mm ad un massimo di 16 mm

2. Estensione angolare delle palette - estremi 80 ÷ 120 gradi

3. Diametro del foro di uscita dal filtro - estremi 12 ÷ 26 mm

4. Altezza del tubo di uscita dal filtro - estremi 20 ÷ 60 mm

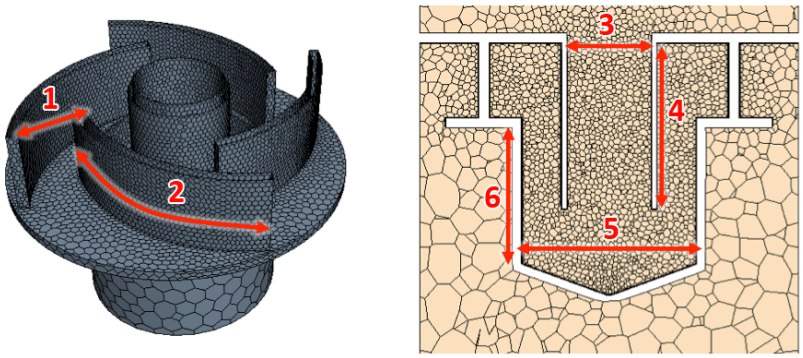


Figura 2.6: Sei grandezze geometriche parametrizzate per l'ottimizzazione.

5. Diametro interno della camera formata dal coperchio del filtro - estremi 5 ÷ 15 mm
6. Numero di palette - estremi 3 ÷ 6
7. Altezza delle palette - estremi 10 ÷ 25 mm

La prima fase dell'ottimizzazione ha riguardato il lancio di una serie di *Designs of Experiments* costituiti da 40 configurazioni geometriche diverse create utilizzando l'algoritmo *Sobol* ed il cui risultato finale è riportato in figura 2.7 che riporta graficamente a confronto i valori di pressione ed efficienza valutati.

Ciascun design impiega all'incirca 2 ore di calcolo per essere valutato, e per tale motivo è stata utilizzata la tecnica delle superficie di risposta o RSM (*Response Surface Methodology*) per ridurre i tempi di calcolo onerosi.

Sono state create diverse RSM (una per ciascun output definito nel workflow) attraverso l'algoritmo interpolante *Kriging*, e si è avviata un ottimizzazione con l'algoritmo genetico NSGA-II impostando un valore massimo pari a 100 generazioni. L'ottimizzazione effettuata sulle RSM viene definita virtuale in quanto il calcolo non viene effettuato in base alla definizione del workflow (quindi attraverso un software CFD), ma bensì sui modelli matematici. Per tale motivo tale tipo di ottimizzazione è durata solamente 1.2 secondi per la valutazione di 4000 configurazioni geometriche differenti.

I risultati dell'ultima ottimizzazione risultano però essere delle approssimazioni della realtà e per cui si è reso necessario validarli: si sono selezionati 20 *designs* appartenenti al fronte di pareto e sono stati calcolati nuovamente senza l'uso delle RSM, ottenendo così il loro valore reale tramite il *solver* CFD.

In figura 2.8 sono riportati tutti i risultati dei designs appena calcolati: i 60 punti in rosso rappresentano ciascun design reale che è stato calcolato attraverso il workflow,

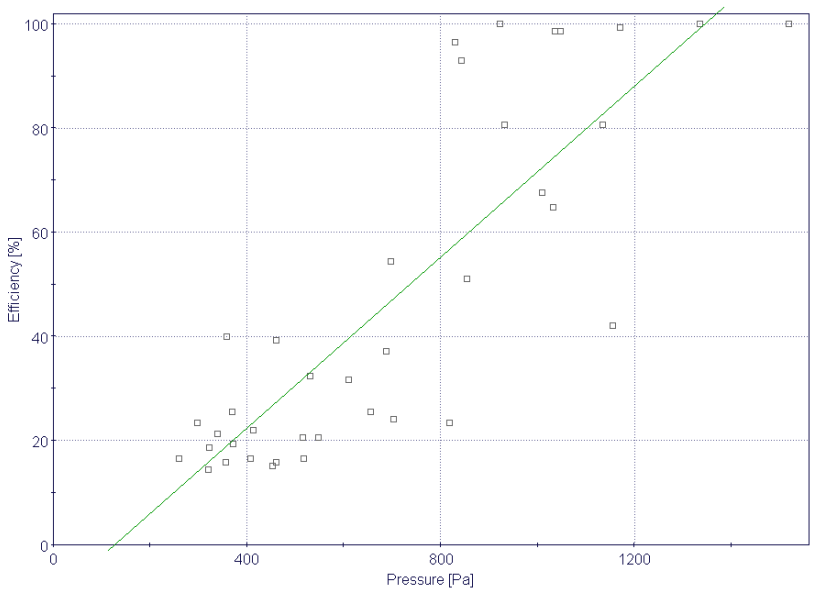


Figura 2.7: *Scatter chart* dei primi 40 *designs* valutati.

mentre i punti in grigio rappresentato tutti i 4000 designs virtuali calcolati sulle RSM. Le curve colorate rappresentano i diversi fronti di pareto ottenuti: la curva blu rappresenta il fronte di pareto del primo database di 40 configurazioni reali; la curva rossa rappresenta il fronte di pareto dei designs virtuali, mentre la curva verde rappresenta il fronte di pareto virtuale validato.

2.3 Confronto dei risultati

La tabella 2.1 riporta a confronto tutti i risultati di pressione ed efficienza ottenuti attraverso le simulazioni numeriche CFD sui seguenti dispositivi :

- il *filtro originale* in produzione
- il *filtro originale ottimizzato*
- il *nuovo dispositivo ottimizzato*

Come si evince dalla tabella, analizzando principalmente le differenze percentuali calcolate rispetto al filtro originale, il nuovo dispositivo presenta ottimi valori di efficienza pari al 95% (+206% rispetto all'originale) a discapito però delle perdite di carico che ne comporta (+676% rispetto all'originale).

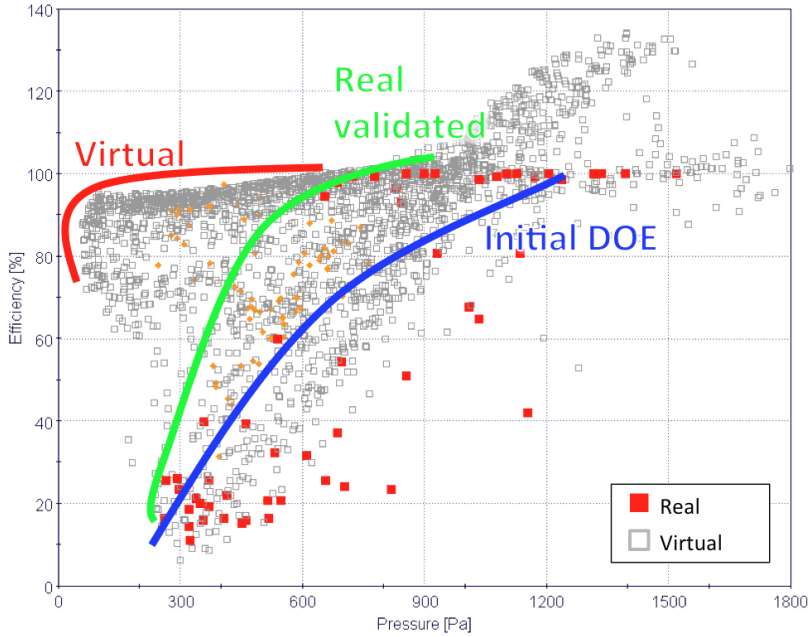


Figura 2.8: *Scatter chart* dei *designs* reali e virtuali a confronto e dei relativi fronti di pareto ottenuti.

Nel caso di un azienda già dotata del filtro originale nelle proprie cucine, l'adozione dello stesso modello nella versione ottimizzata non comporterebbe la necessità del cambio del sistema di aspirazione in quanto le perdite di carico sono solo lievemente superiori (+9%); mentre nel caso in cui si voglia adottare il nuovo dispositivo ottimizzato ed usufruire della sua efficienza maggiore, bisognerà prevedere un sistema che vinca le pressioni in gioco che risultano essere nettamente superiori.

	Filtro originale	Filtro originale ottimizzato	Nuovo dispositivo ottimizzato
Efficienza [%]	31	82 *+165%*	95 *+206%*
Perdite di carico [Pa]	58	63 *+9%*	450 *+676%*

Tabella 2.1: Risultati numerici a confronto.

Il grafico di figura 2.9 infine mostra l'efficienza dei tre tipi di filtro in funzione della dimensione delle particelle; risulta molto evidente che solo con le geometrie ottimizzate è stato possibile ottenere buoni livelli di filtraggio anche per dimensioni di particelle molto fini, con diametri inferiori ai 12 micron.

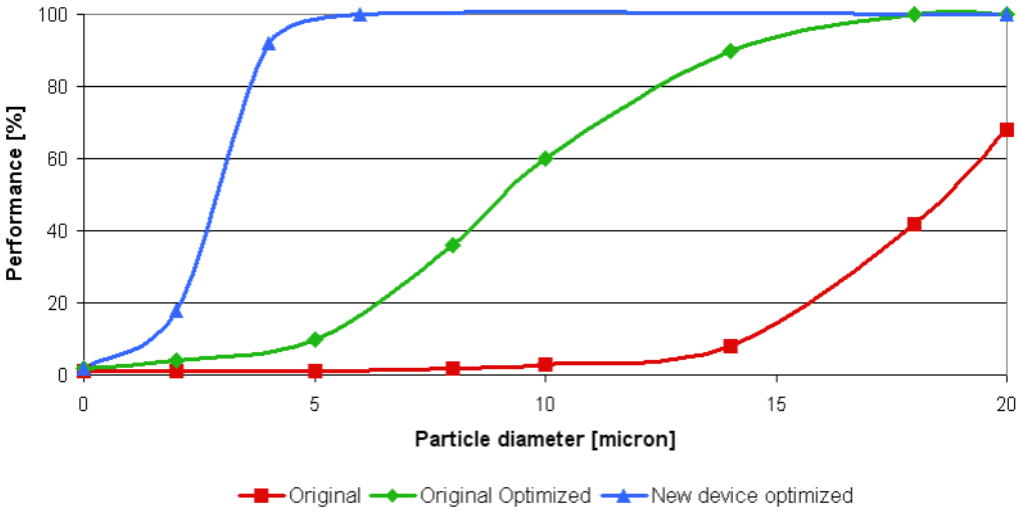


Figura 2.9: Confronto risultati numerici delle varie geometrie

3

Prove sperimentali

Le prove sperimentali sono state eseguite per ottenere una convalida dei modelli numerici adottati e dei risultati ottenuti.

Come per le simulazioni numeriche, anche le prove in laboratorio sono suddivise in due fasi: la prima riguarda la misura dei campi di velocità dell'aria all'interno del filtro e nella zona subito a valle di quest'ultimo, mentre la seconda parte consiste nel valutare l'efficienza di separazione del dispositivo con l'inseminazione dello stesso con particelle di diversa granulometria.

3.1 Filtro in produzione

3.1.1 Misurazioni di velocità

Le misure "a freddo" sono state eseguite utilizzando la nota tecnica di velocimetria laser Doppler o LDV (*Laser Doppler Velocimetry*), una metodica utilizzata per rilevare la velocità di un fluido utilizzando luce laser. Tale tecnica valuta la variazione di lunghezza d'onda o di frequenza dei fotoni che hanno "colpito" dei corpuscoli in movimento (effetto Doppler).

Il sistema LDV del Dipartimento di Ingegneria Meccanica è composto da un generatore di luce laser agli ioni di argo della "ILT", modello 5500 A, che viene alimentato dal generatore di corrente ad alta frequenza. La potenza luminosa in uscita dal laser viene regolata da un potenziometro. Il raggio laser, uscendo dal generatore, entra nel gruppo ottico, che ha lo scopo di separare le componenti di lunghezza d'onda diversa nelle frequenze a maggior potenza emessa ($514.5nm$ per il verde, $488nm$ per il blu e $476.5nm$ per il blu); all'interno del gruppo ottico si trova inoltre una cella di Bragg, che permette di ottenere una differenza di frequenza di $40MHz$ tra due raggi in uscita dal gruppo ottico aventi la stessa lunghezza d'onda, e determinare così il verso con cui procede la

Figura 3.1: Particolare della struttura realizzata.

particella. Dal gruppo ottico, attraverso un cavo a fibre ottiche, i raggi giungono alla sonda posta su un sistema traversante.

La sonda ha una lunghezza focale di $310mm$, ed attraverso un sistema di specchi e lenti, forma due coppie di raggi che si intersecano in una zona comune, il cosiddetto volume di misura; da quest'ultimo, nel momento in cui vi transita una particella, viene riflessa un'onda luminosa, che contiene le informazioni relative alle componenti della velocità della particella stessa. Il segnale ritorna indietro fino a due fotomoltiplicatori che convertono l'onda elettromagnetica in un segnale elettrico. Quest'ultimo viene mandato indietro a 2 analizzatori di segnale BSA (*enhanced Burst Spectrum Analyzer*) della "Dantec Measurement Technology" (modelli 57N20 e 57N35S), che ha il compito di risalire alla velocità della particella attraverso la tecnica di analisi Fast Fourier Transform (FFT).

È stata realizzata la struttura portante dei filtri in plexiglass trasparente da $5mm$ di spessore (vedi figura 3.1) per poter utilizzare tale metodologia e permettere al laser di entrare all'interno dei canali del filtro oltre che alla zona a valle dello stesso. I lamierini di acciaio che formano il filtro sono stati incastrati in apposite scanalature realizzate con una fresa a controllo numerico.

La struttura (vedi figura 3.2) è stata collegata ad un ventilatore centrifugo e nel mezzo

Figura 3.2: Apparecchiatura di misura: 1) Ottica, 2) Filtro, 3) Laser, 4) Elaboratore dati.

son stati interposti dei dispositivi particolari detti raddrizzatori di filetti fluidi per ridurre il più possibile l'eventuale turbolenza dell'aria generata dall'aspiratore e dalla geometria dei canali di passaggio dell'aria ed ottenere in prossimità del filtro un campo di velocità omogeneo sull'intera sezione di passaggio.

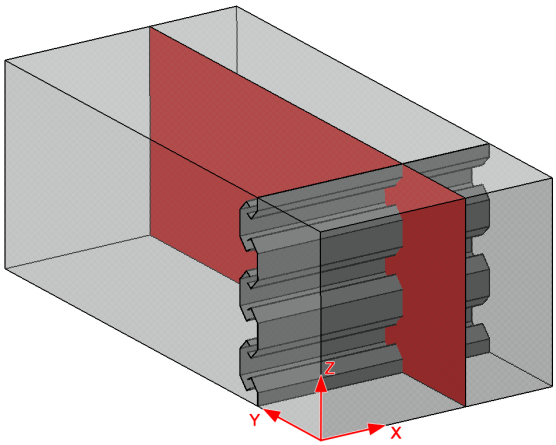


Figura 3.3: Uno dei piani ZY di misura.

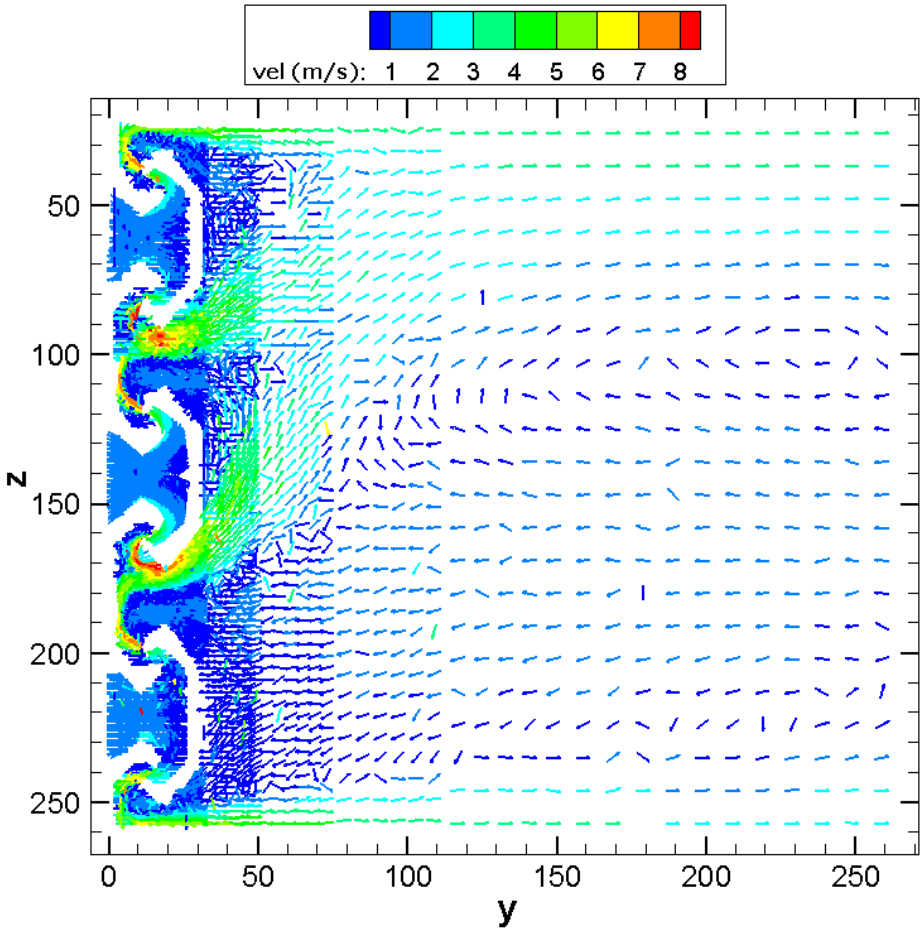


Figura 3.4: Vettori di velocità ottenuti sperimentalmente.

Per effettuare le misure tramite la tecnica LDV, l'aria in aspirazione attraverso il filtro è stata inseminata con una sospensione nebulizzata di acqua e glicerina (10% in volume).

Per effettuare le misure si è suddiviso il dominio di misura in diversi piani ZY (in base al sistema di coordinate della traversa di movimentazione dell'ottica del laser, rappresentato in figura 3.3) e si è effettuata una prima serie di rilievi impostando una griglia di acquisizione rada in modo tale da ottenere l'andamento globale del campo di moto dell'aria a valle del filtro.

Il flusso è risultato essere simmetrico su ciascun piano di misura ZY e per tale motivo le successive analisi si sono concentrate su un unico piano ZY al quale si è infittita la

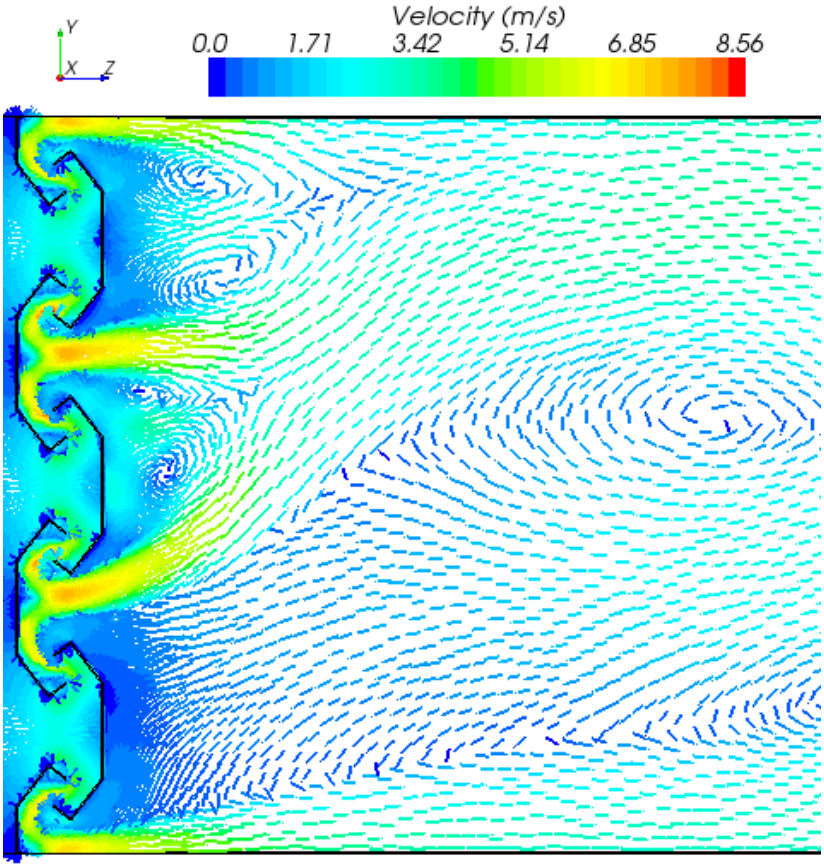


Figura 3.5: Vettori di velocità ottenuti numericamente.

griglia di acquisizione, che presentava una spaziatura minima di $1mm$ in prossimità del filtro ed una spaziatura massima di $10mm$ nella zona più a valle dello stesso.

Per l'acquisizione dei risultati si è impostato un tempo di $30s$ per ciascun punto di misura, in modo tale da rilevare il maggior numero di particelle ed ottenere una distribuzione statistica di velocità più accurata.

Si sono effettuate 51 sessioni di prove, per ottenere una griglia di 12765 punti di misura per un totale di 134 ore di acquisizione dati.

I risultati che si sono ottenuti sono riportati in figura 3.4; come si può notare il campo di moto non è simmetrico, come è stato evidenziato anche dalle simulazioni effettuate e descritte precedentemente, ed il flusso d'aria ha la tendenza a seguire la parete superiore e a creare un vortice nella zona inferiore. In tale grafico ciascuna freccia colorata in

funzione della velocità, corrisponde ad un punto di misura.

In figura 3.5 sono riportate le immagini ricavate numericamente per poter effettuare un confronto dei risultati ottenuti, e come si evince le simulazioni effettuate riproducono puntualmente quello che accade realmente nel sistema sperimentale.

3.1.2 Misurazioni granulometriche

Per ottenere l'efficienza di separazione del dispositivo, è stata utilizzata la stessa struttura descritta nel paragrafo precedete ed illustrata in figura 3.2, disposta verticalmente in modo tale da cogliere gli effetti dell'accelerazione di gravità sui campioni di prova che sono stati utilizzati.

La misurazione dei campioni di prova è stata effettuata tramite un granulometro laser che consente di effettuare analisi precise della distribuzione granulometrica di qualsiasi sospensione, emulsione o polvere, riuscendo a determinare, in pochi secondi, la grandezza delle particelle compresa in un range che va da 0.1 a 1000 micron.

Tale apparecchiatura effettua le misure su campioni sospesi in acqua, che non devono quindi essere solubili in essa. Per le prove con tale strumentazione quindi non si è potuto utilizzare il grasso, ma si è optato per particelle di vetro finemente macinato con dimensioni inferiori ai 40 micron (figura 3.6), che rappresenta il range di interesse per le prove su un filtro da cucina.

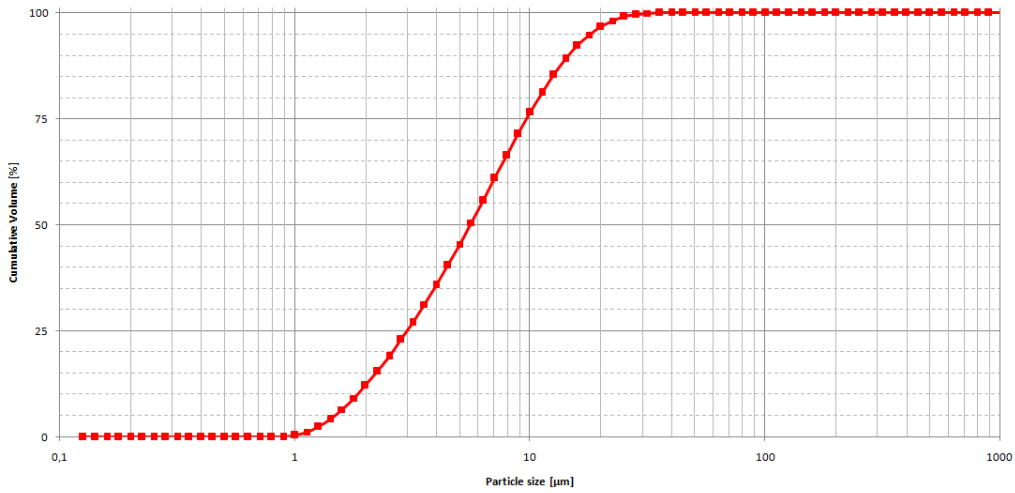
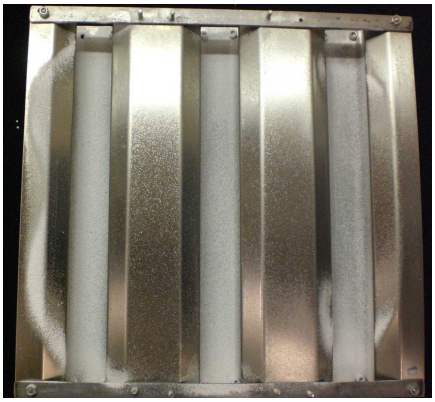
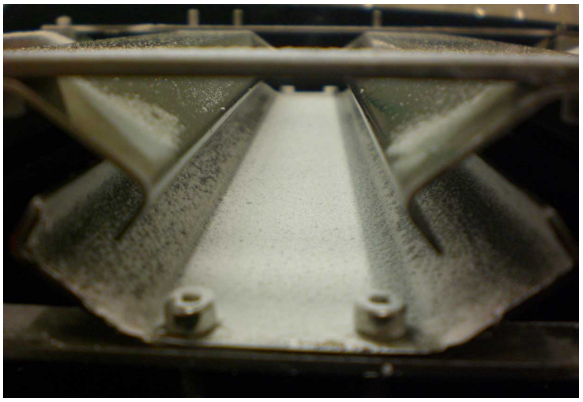


Figura 3.6: Distribuzione granulometrica del campione di prova.



(a) Vista inferiore



(b) Un particolare dell'interno dei canali

Figura 3.7: Il filtro alla fine di una prova di aspirazione di particelle di vetro.

Affinchè le particelle di vetro vengano catturate e trattenute dal filtro, lo stesso è stato ricoperto da un sottile film di liquido adesivo. Le prove si sono effettuate facendo aspirare diversi campioni per un peso pari a 50 grammi ciascuno all'interno della struttura per un tempo di 10 minuti ciascuno.

Alla fine di ciascuna prova il filtro risultava ricoperto dei campioni di vetro come in figura 3.7. I lamierini di acciaio sono stati successivamente smontati e lavati per poter raccogliere il vetro accumulato e poterlo misurare.

Dopo ciascuna prova il campione iniziale ($M_{Iniziale}$) di vetro risultava suddiviso in 3 campioni diversi:

$$M_{Iniziale} = M_{leggere} + M_{trattenute} + M_{pesanti} \tag{3.1}$$

dove

- $M_{leggere}$ sono le particelle di vetro che hanno oltrepassato il filtro;
- $M_{trattenute}$ sono le particelle accumulate sul filtro;
- $M_{pesanti}$ sono le particelle più pesanti che non hanno raggiunto il filtro e sono rimaste all'interno del tubo a monte del filtro stesso.

Di questi 3 campioni di vetro, quello di maggiore interesse è il primo ($M_{Iniziale}$) ed esattamente la distribuzione di particelle più fini che non vengono catturate dal filtro. Tale campione risulta anche essere l'unico che non è possibile misurare direttamente, ma che in teoria risulta essere semplicemente ottenibile in base all'equazione 3.1.

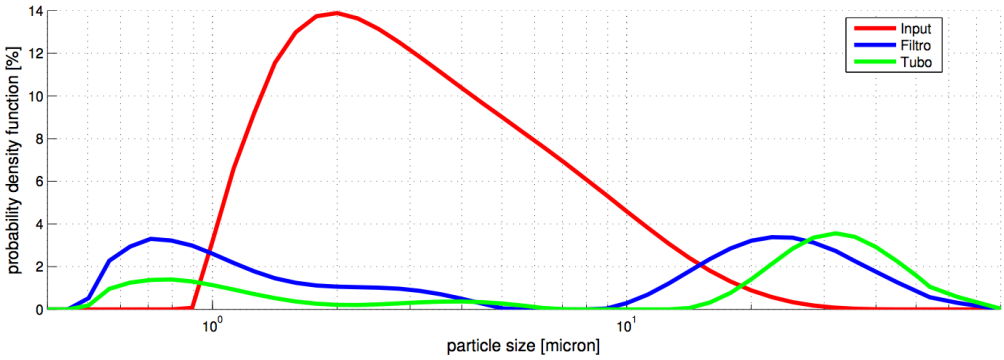


Figura 3.8: Distribuzione statistica dei campioni di vetro misurati.

I due campioni che sono stati raccolti dalle prove effettuate ($M_{trattenute}$ e $M_{pesanti}$), sono stati successivamente analizzati con il granulometro; per effettuare delle misure più accurate, le quantità di vetro, oltre ad essere mescolate all'interno di un dosatore con un agitatore, sono state anche sottoposte ad ultrasuoni in modo tale da essere sicuri che le diverse particelle non si agglomerassero le une con le altre, andando a sfalsare la misura.

Il grafico in figura 3.8 riporta a confronto le curve di probabilità (dette *probability density function* o PDF) dei campioni misurati: in rosso la quantità iniziale ($M_{Iniziale}$), in blu la quantità trattenuta dal filtro ($M_{trattenute}$), ed in verde le particelle pi pesanti rimaste a monte del filtro ($M_{pesanti}$).

Come si può notare dal grafico, le 2 curve blu e verde presentano uno strano andamento, ed esattamente in corrispondenza di diametri molto piccoli (< 1 micron) e diametri di circa 20 micron, presentano una distribuzione probabilistica maggiore del campione di partenza utilizzato. Tale strano andamento ha 2 motivazioni:

- i picchi al di sotto dei 0.1 micron si possono trascurare in quanto la macchina non è calibrata per operare al di sotto di tale misura;

- invece per i picchi di misura intorno ai 20 micron sono dovuti alla clusterizzazione delle particelle le une alle altre, che non si è riusciti a separare neanche utilizzando gli ultrasuoni.

Per tali problemi riscontrati nella misurazione delle distribuzioni geometriche delle particelle, non si può ottenere dai dati rilevati la distribuzione di particelle che hanno attraversato il filtro, in modo tale da poterle confrontare con i dati numerici.

3.2 Nuovo dispositivo

Le prove sperimentali della nuova tipologia di filtro, con dimensioni (figura 3.9) ottimizzate in precedenza, sono state condotte andando inizialmente a realizzare l'oggetto in esame attraverso la tecnica della prototipazione rapida.

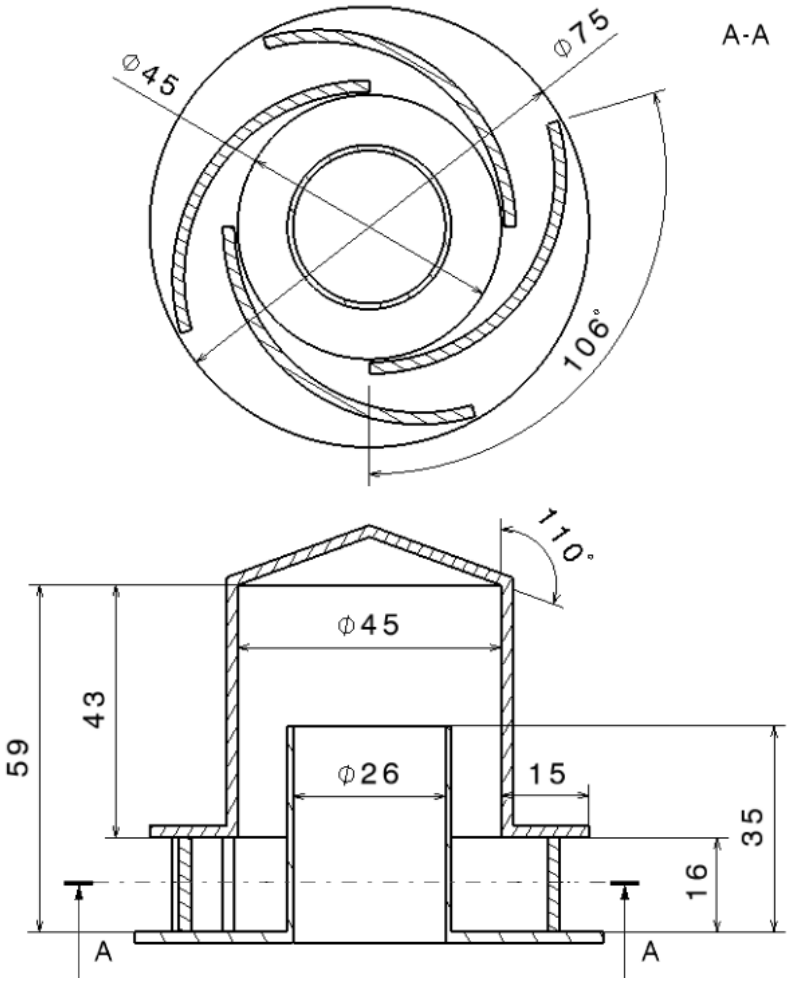


Figura 3.9: Quote geometriche del filtro ottimizzato

3.2.1 Prototipazione rapida

La nuova tipologia di filtro, essendo ancora in fase di sviluppo, è stato realizzata attraverso una "stampante 3D" in dotazione presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica : Stampante "SD300 Pro" della "SOLIDO"[21] (figura 3.10).

La geometria del filtro ottimizzato è stata realizzata tramite il software CAD "CATIA" e tagliata in modo tale da non presentare sottosquadri in fase di stampaggio ed in modo tale che risulti semplice il successivo montaggio.

I singoli componenti del dispositivo di filtraggio sono stati esportati nel formato STL per poter essere utilizzati nel software di controllo della stampante ("SDview"), e sono stati posizionati in modo tale da adattarsi alla dimensione massima stampabile, pari a 18 *cm* di larghezza, 25 *cm* di profondità e 30 *cm* di altezza, ed in modo tale da risparmiare materiale.

La stampante utilizzata modella l'oggetto andando a depositare fogli di PVC (*PolyVinyl Chloride*), di colore ambra trasparente, uno sopra all'altro interponendovi una colla solo nelle zone solide dell'oggetto finale, ed effettuando dei tagli ad ogni strato, corrispondenti ai bordi dell'oggetto.

Per ottenere un buon risultato, nell'impostazione della stampa bisogna prevedere l'aggiunta di ulteriori piani di taglio che andranno ad agevolare la fase finale di "sfogliatura" del modello, che consiste nella rimozione del materiale di scarto che circonda l'oggetto appena realizzato. Tali piani sono evidenti in blu in figura 3.11, mentre in giallo sono raffigurati gli oggetti da realizzare.

Figura 3.10: Stampante "SOLIDO SD300 Pro" per la prototipazione rapida.

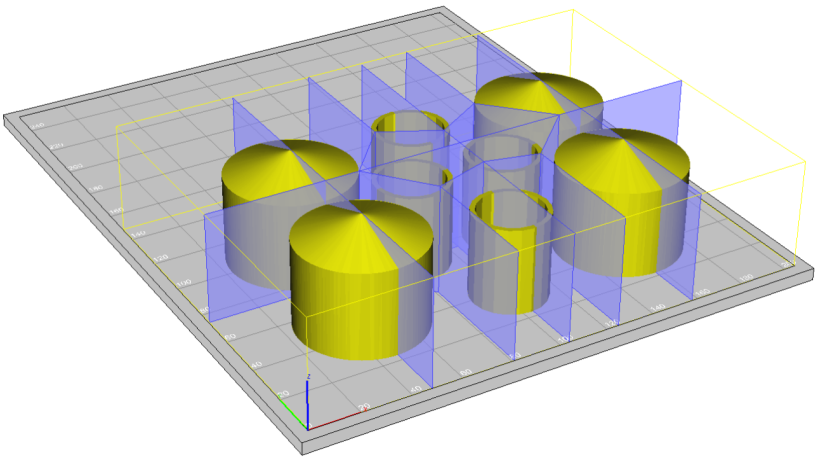
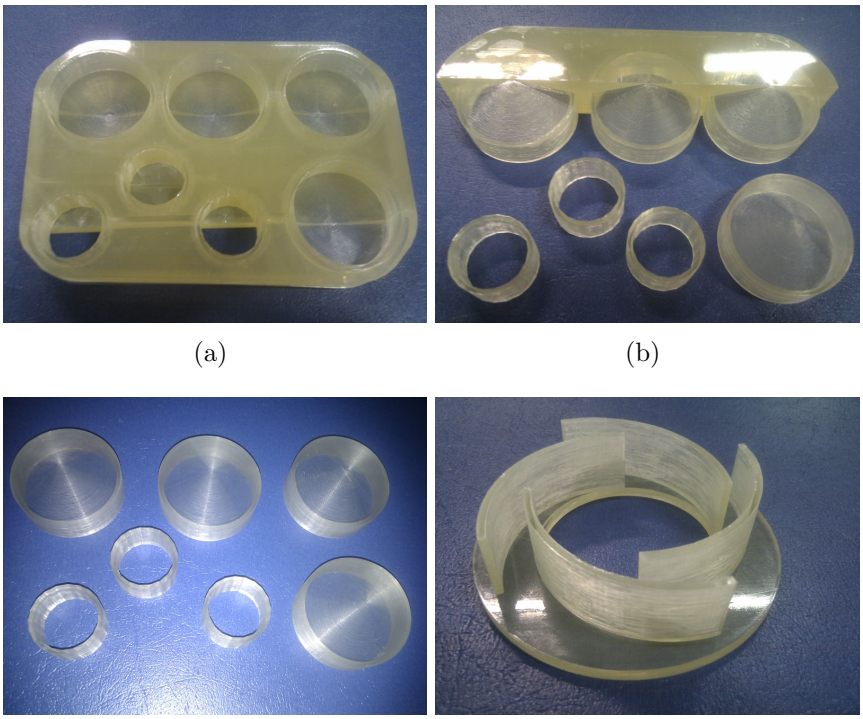


Figura 3.11: Impostazione dei piani di taglio per la stampante 3D.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.12: Fasi di “sfogliatura” di alcuni pezzi costituenti il filtro

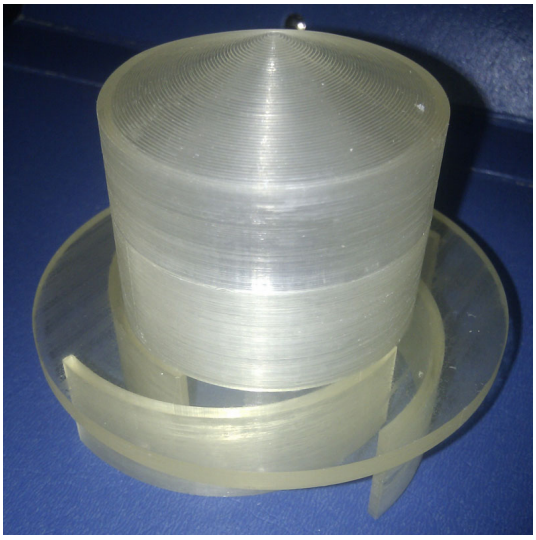


Figura 3.13: Il filtro completo stampato in PVC

In figura 3.12 è illustrata la cosiddetta "mattonella" di PVC contenente i pezzi impostati in figura 3.11, durante alcuni istanti di "sfogliatura"; mentre in figura 3.13 è raffigurato uno dei 4 filtri assemblati che sono stati stampati per prototipazione rapida.

3.2.2 Misurazioni di efficienza del filtro

Per effettuare delle misurazioni per ottenere l'efficienza della nuova tipologia filtro, si è deciso di intraprendere una metodologia diversa da quella usata in precedenza e descritta nel capitolo 3.1.2, viste le numerose difficoltà riscontrate soprattutto per quanto riguarda l'analisi dei risultati finali.

Le sessioni di prove effettuate sul filtro stampato, sono state affrontate con lo scopo di ottenere la sola efficienza di filtraggio globale e non l'efficienza in funzione della dimensione delle particelle aspirate.

Si è scelto di alimentare il sistema di filtraggio ad una velocità di $1m/s$ (misurata a monte del filtro) in quanto, in base ad alcune prove preliminari, è risultato il valore minimo che poteva garantire il funzionamento corretto da parte di tutti i dispositivi di misura che sono stati impiegati, e che verranno esposti nei paragrafi successivi.

Si è realizzata una linea di prova (rappresentata in figura 3.14) che sia in grado di produrre delle particelle e aspirarle attraverso il filtro. I requisiti fondamentali che doveva soddisfare la struttura sono i seguenti :

- da poter raccogliere in modo agevole e pesare la quantità di particelle che non sono state aspirate, in modo tale da ottenere per differenza la porzione di particelle aspirate ed espulse dal sistema.
- ogni singolo componente da pesare avrebbe dovuto avere un peso lordo massimo pari al fondo scala di $300g$ della bilancia di precisione ($0.01g$) che si sarebbe utilizzato in seguito

La struttura è costituita dei seguenti componenti, numerati in figura 3.14 :

1. "piatto" di raccolta: realizzato in polistirolo e ricoperto nella parte superiore da una pellicola in PVC per alimenti, serve per raccogliere le particelle troppo pesanti che non riescono ad innalzarsi fino a raggiungere il filtro per essere aspirate;
2. nebulizzatore: costruito (figura 3.15) per disperdere $50ml$ di glicerina in finissime particelle;
3. canale di passaggio per l'aria in direzione del filtro, in modo tale che il filtro aspiri la sola aria frontale ed agevoli la calibrazione della velocità di aspirazione; il canale è rivestito da fogli di plastica removibili;
4. filtro composto da 4 moduli sganciabili dalla struttura in modo tale da ridurre il peso e per poterli pesare singolarmente;
5. tubo a valle del filtro con all'interno posizionati dei raddrizzatori di filetti fluidi a forma di nido d'ape;
6. soffiante posizionata a valle del filtro e collegata al sistema in modo tale che aspiri l'aria (collegata ad un generatore di corrente continua da $36kW$ a sua volta azionato da un motore asincrono trifase da $44kW$);
7. misuratore di pressione idrostatica in uscita della soffiante.

La soffiante doveva produrre a monte del filtro una velocità dell'aria pari ad $1m/s$ per poter ottenere un confronto con le simulazioni numeriche; prima di ogni sessione di prove, tale velocità è stata misurata e calibrata attraverso l'uso di un anemometro a filo caldo.

L'anemometro è stato in precedenza calibrato andando a misurare la tensione generata da un flusso d'aria in movimento ad $1m/s$ misurato attraverso l'uso di un micromanometro di precisione (modello "Minimetor" della "Regulator"); la tensione media calibrata per ottenere una velocità di $1m/s$, è risultata essere pari a $2.88V$.

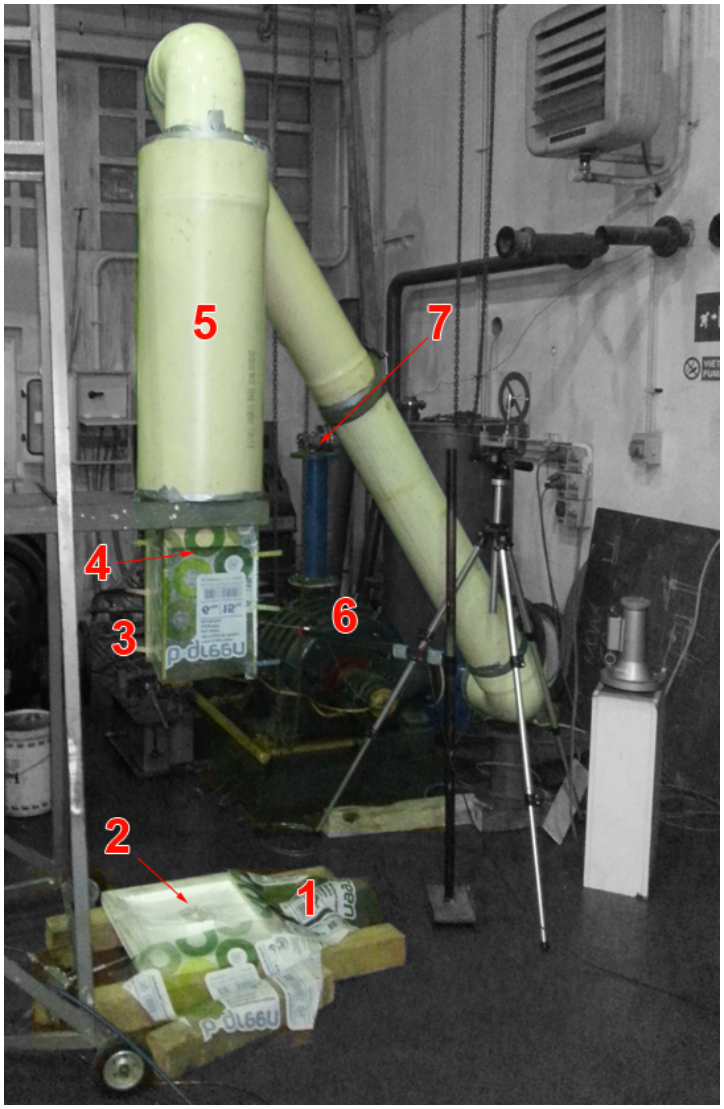
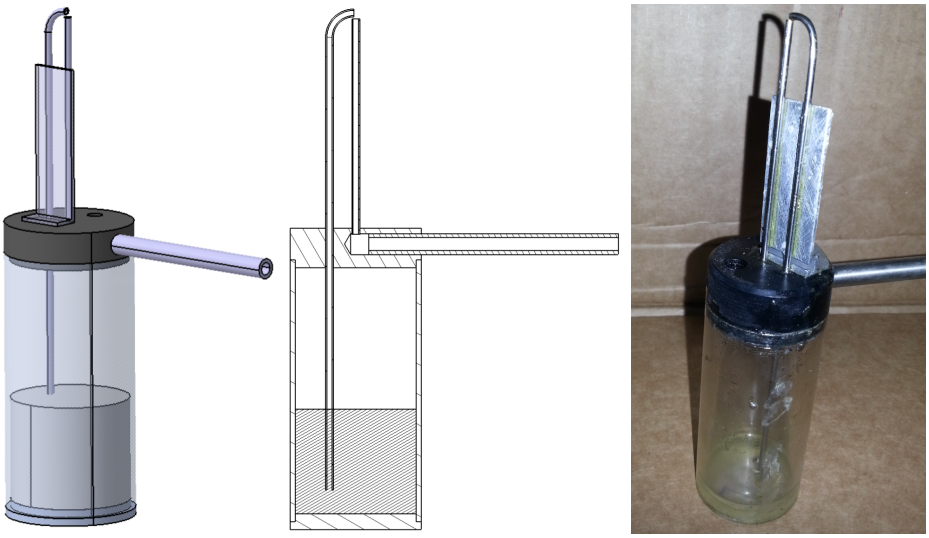


Figura 3.14: La struttura di prova

La corrente che alimentava la soffiante (elemento (6) in figura 3.14) è stata quindi regolata in modo tale da rilevare tale tensione, che ha corrisposto ad una rotazione media della soffiante di $1841rpm$ ed una pressione idrostatica media in uscita pari a $12.95mmCA$ ($127Pa$).

Il nubulizzatore realizzato (figura 3.15) è costituito da un contenitore dal volume



(a) CAD (b) Sezione (c) Foto reale

Figura 3.15: Il nubulizzatore disegnato e costruito

interno di $60ml$ al quale è anche collegato un tubo di alimentazione per l'aria compressa; da tale dispositivo escono verso la sommità 2 tubi da $2mm$ di diametro interno posizionati in modo tale che il tubo attraverso il quale passa l'aria in pressione crei una depressione nell'altro tubo ed aspiri il liquido sottostante verso l'esterno andandolo a nebulizzare verso l'alto in direzione del filtro.

L'aria è stata erogata dal compressore ad un pressione di $18mmHg$ (misurata con un manometro a U al mercurio) e pari a $2400Pa$, pressione alla quale il getto di glicerina nebulizzata raggiunge un'altezza inferiore alla distanza dal filtro ma sufficiente da essere aspirato dal sistema di filtraggio stesso.

Al fine di ottenere l'efficienza di separazione globale di questo filtro, si sono effettuate 7 sessioni di prove distinte, i cui risultati sono riassunti nel grafico in figura 3.16 e riportati in tabella 3.1. Per tutte le prove eseguite, si è attuata la seguente procedura :

- pesata iniziale di ciascun componente, dai singoli moduli dei filtri alle coperture della zona di aspirazione e le protezioni per la ricaduta della particelle pesanti; tali misure sono corrisposto alla tara delle pesate finali;

- calibrazione della velocità dell'aria ($1m/s$) aspirata dalla soffiante attraverso l'uso dell'anemometro a filo caldo come descritto in precedenza;

- nebulizzazione di una quantità pari a $50ml$ di glicerina nel sistema alla pressione di $18mmHg$ ($2.4kPa$);
- smontaggio e pesata di ciascun componente;
- lavaggio dei componenti per le prove successive.

Alla fine di ciascuna sessione di prove si è effettuato la pesata di ogni singolo componente, ricoperto di glicerina, in modo tale da ottenere il peso di quest'ultima per differenza con il peso, la tara, pesata inizialmente. I diversi pesi ottenuti sono stati raggruppati nel modo seguente :

1. *ricaduto indietro*: corrisponde alle particelle più pesanti che non hanno raggiunto il filtro e che sono ricadute verso il nebulizzatore, sul "piatto" di raccolta, oppure si sono depositate sulle pareti laterali del che si trovano subito a monte del filtro;
2. *trattenuto dal filtro*: corrisponde alle particelle intrappolate all'interno del filtro stesso;
3. *trattenuto a valle*: è una quantità minima di particelle che non sono state catturate dal filtro ma che sono ricadute subito a valle dello stesso;
4. *espulso*: è la quantità che non si è misurato direttamente in quanto aspirata ed espulsa dalla soffiante, ma che si è ottenuta per sottrazione delle prime 3 quantità dal totale iniettato.

	ricaduto indietro [%]	**trattenuto dal filtro** [%]	**trattenuto a valle** [%]	**espulso** [%]
1	48.5	20.6	0.6	30.3
2	53.1	17.7	0.7	28.5
3	56.3	18.6	0.6	24.5
4	49.9	24.6	1.5	24.0
5	46.9	25.1	1.7	26.3
6	47.8	21.4	1.4	29.4
7	49.7	21.0	0.7	28.6
media	50.3	21.3	1.0	**27.4**

Tabella 3.1: Quantità percentuali di glicerina pesata su ciascun elemento del sistema di filtraggio in riferimento alla quantità iniettata.

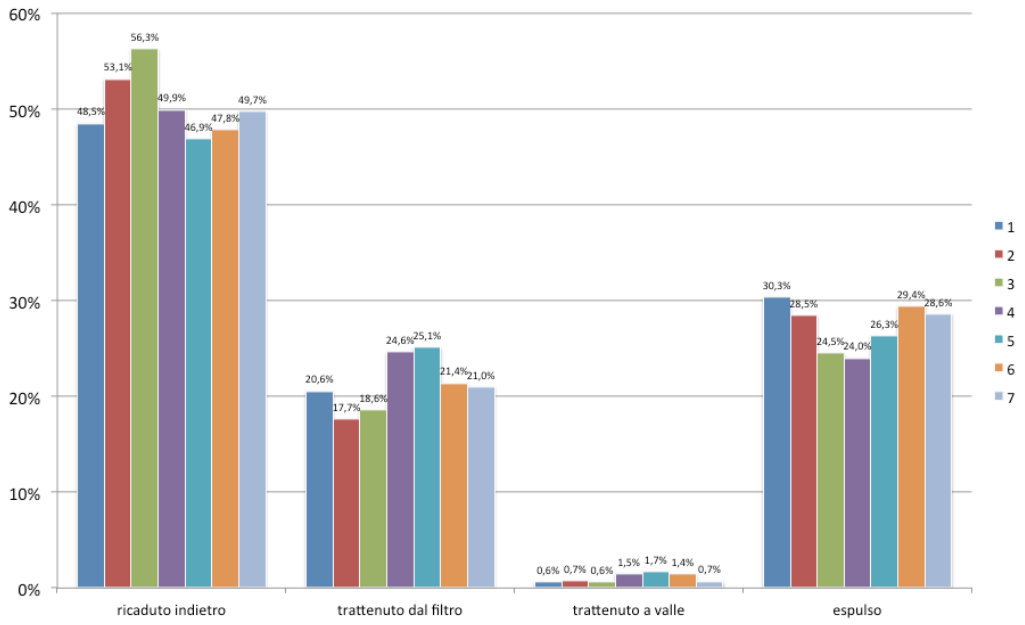


Figura 3.16: Quantità percentuali di glicerina pesata su ciascun elemento del sistema di filtraggio

Come si evince dalla tabella 3.1, quasi la metà (50.3%) delle particelle che sono state iniettate e nebulizzate nel sistema non sono riuscite ad innalzarsi abbastanza per raggiungere la zona di aspirazione per superare o essere catturate dal filtro. Tale fatto è riconducibile al fatto che il nebulizzatore crea anche particelle di grosse dimensioni, troppo pesanti per essere trasportate dall'aria alla portata imposta alla soffiante.

Per calcolare l'efficienza di separazione, se si considera l'intera quantità iniettata ($50g$), allora si ottiene un valore elevato di 72.6% :

$$E = \frac{Q_{non_espulsa}}{Q_{iniettata}} = \frac{Q_{iniettata} - Q_{espulsa}}{Q_{iniettata}} = \frac{1 - 0.274}{1} = 72.6\% \tag{3.2}$$

mentre se si considera solo la quantità catturata in rapporto con la quantità che il filtro non ha trattenuto, allora si ottiene un valore inferiore :

$$E = \frac{Q_{trattenuta}}{Q_{trattenuta} + Q_{espulsa}} = \frac{(0.213 + 0.01)}{(0.213 + 0.01) + 0.274} = 44.9\% \tag{3.3}$$

dove per la $Q_{trattenuta}$ si è sommato sia la quantità catturata all'interno del filtro (21.3%) che quella ricaduta subito a valle dello stesso (1.0%), in base ai valori riportati in tabella 3.1.

In tabella 3.2 vengono riportati i dati misurati sul motore e sulla soffiante che hanno garantito la portata d'aria calibrata in aspirazione a monte del filtro:

- giri al minuto, attraverso un misuratore di giri manuale a contatto, rilevati sul motore collegato alla soffiante attraverso un moltiplicatore di giri con rapporto di trasmissione 1/1.9;
- pressione rilevata in $mmCA$, e convertita in Pascal (Pa), misurata in corrispondenza dell'uscita della soffiante stessa, attraverso un micromanometro di precisione.

	Motore	**Soffiante**	**Pressione**	
	$[rpm]$	$[rpm]$	$[mmCA]$	$[Pa]$
1	1820	3458	11.23	110.1
2	1690	3211	11.37	111.5
3	1850	3515	12.73	124.8
4	1880	3572	14.40	141.2
5	1885	3582	14.22	139.5
6	1920	3648	13.90	136.3
7	1840	3496	12.81	125.6
media	1841	3497	12.95	127.0

Tabella 3.2: Giri al minuto del motore e della soffiante, e pressione misurata all'uscita della soffiante.

4

Brevetto

Dalle prove effettuate è risultato che il nuovo filtro realizzato è più efficiente nell'intrappolare le particelle al suo interno anche con diametri inferiori a 10 micron. Visto il potenziale innovativo di questo nuovo dispositivo, è stata effettuata un ricerca per valutare se un dispositivo di tale tipologia e funzione esista e se fosse possibile registrarne un brevetto.

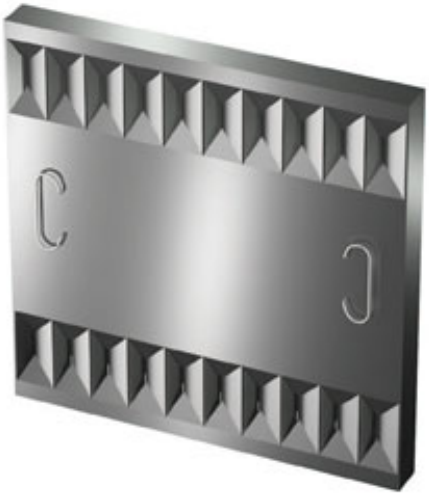
La ricerca brevettuale ha messo in evidenza solo due dispositivi con delle caratteristiche simili al filtro realizzato:

- il filtro *Grease-X-Tractor*[18] (figura 4.1) della ditta americana "Greenheck Fan Corporation"[17]: esso è simile al filtro
- il filtro *JCE*[20] (figura 4.2) della ditta finlandese "Jeven Oy"[19].

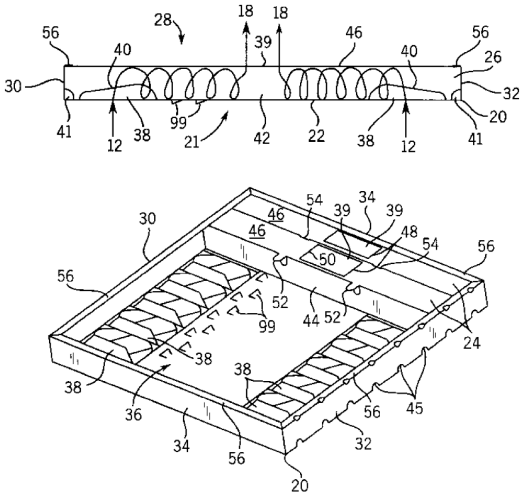
4.1 Descrizione dettagliata

Con riferimento a figura 4.3, la presente invenzione comprende un pannello di supporto 11 a cui sono collegati uno o più moduli di filtrazione 2. Ciascun modulo di filtrazione 2 comprende un primo condotto 21, preferibilmente, a forma di tronco-cilindro, del quale un primo estremo 21a è collegata a detto pannello di supporto 11 in corrispondenza di un'apertura 12 nel pannello di supporto 11, nella quale preferibilmente si inserisce. Tale apertura 12 può presentare un diametro anche pari al diametro interno dell'estremo 21a del condotto 21. In tal caso il condotto può essere saldato al pannello di supporto 11. Un elemento palettato 3 avente una forma tronco-cilindrica è innestato assialmente perimetralmente sul primo condotto 21, in modo che detto elemento palettato 3 e detto primo condotto 21 condividano un medesimo asse di simmetria X.

Una vista in pianta, vedi figura 4.9, di detto elemento palettato 3 evidenzia che esso comprende un elemento di supporto a forma di corona circolare 31 avente un asse di



(a)



(b)

Figura 4.1: il filtro *Grease-X-Tractor* della ditta "Greenheck Fan Corporation" in (a) foto e in (b) un immagine presente nel brevetto.

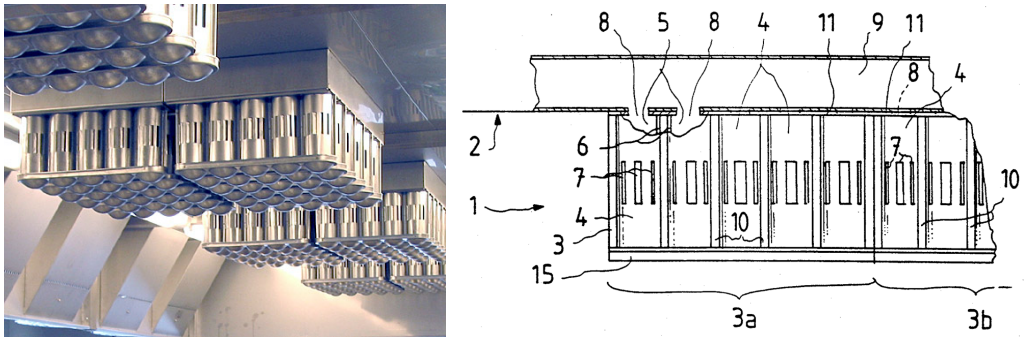
rotazione coincidente con detto asse di simmetria X e due o più palette 32 aventi sviluppo assiale, con asse di sviluppo parallelo con detto asse di simmetria X.

Le palette 32 possono essere piane o incurvate con un profilo disallineato rispetto ad una direzione radiale rispetto a detta corona circolare, in modo da imprimere un moto incurvato nel piano di giacenza di detta corona circolare 31 ad una particella che attraversi le palette. Secondo una forma di realizzazione preferita illustrata nelle figure, l' elemento palettato 3 comprende quattro palette 32 curve ed angolarmente equispaziate tra loro.

La corona circolare 31 definisce un diametro interno d ed un diametro esterno D. Il diametro interno d della corona circolare risulta uguale o maggiore del diametro esterno D1 di detto primo condotto 21, in modo che l'elemento palettato 3 possa essere innestato concentricamente allo stesso primo condotto 21, andando, con le palette 32, in battuta su detto pannello di supporto 11 a cui il primo condotto 21 è connesso.

L'altezza H dell'elemento palettato 3 è inferiore all'altezza H1 del primo condotto 21, dunque una porzione del primo condotto 21 aggetta, a parti assiemate, rispetto alla corona circolare 31 definente l'elemento palettato 3.

Un bicchiere 4 è giustapposto, a cappuccio, su detta parte aggettante del primo condotto 21, in modo che il bordo dell'apertura del bicchiere è a contatto con detta corona



(a) (b)

Figura 4.2: Il filtro *JCE* della ditta "Jeven Oy" in (a) foto e in (b) un immagine presente nel brevetto.

circolare 31. Le dimensioni del bicchiere sono tali per cui il suo diametro interno d1 è maggiore del diametro esterno D1 di detto condotto 21. Secondo una variante preferita della presente invenzione risulta che il diametro interno d1 del bicchiere è compreso dimensionalmente tra il diametro interno d ed esterno D di detta corona circolare 31 (d¡d1¡D).

Il bicchiere 4 comprende definisce un secondo condotto 4B, di forma preferibilmente cilindrica e sostanzialmente coassiale al primo condotto 21. Il primo condotto 21 e il secondo condotto 4B definiscono un condotto anulare 42 in comunicazione con l'uscita del percorso centripeto definito dall'elemento palettato 3. Il bicchiere 4 comprende altresì un fondo 41 il quale risulta concavo visto dall'apertura del bicchiere stesso. In particolare, il fondo 41 del bicchiere 4 può avere vantaggiosamente forma di un tronco di cono. Il fondo 41 del bicchiere 4 costituisce un mezzo di collegamento fra il volume definito dal condotto anulare 42 e il volume interno al primo condotto 21.

Con riferimento alla figura 4.9, dette palette 32 hanno preferibilmente forma curva come nelle giranti di pompe centrifughe, in modo da concorrere maggiormente ad imporre al fluido che le attraversa un moto ciclonico. Infatti, quando il modulo di filtrazione è assemblato e montato in un impianto di ventilazione, l'aria viene aspirata e costretta ad entrare nel modulo di filtrazione 2 attraverso le palette 32 dell'elemento palettato 3 che imprimono un moto curvo quindi bidimensionale al fluido secondo un piano parallelo a detta corona circolare 31, inoltre la camera cilindrica anulare 42, definita tra detta parte aggettante del condotto 21 e dal secondo condotto 4B del bicchiere 4, impone una componente di spostamento del fluido parallela all'asse X del condotto 21, che è perpendicolare al piano della corona circolare 31, imponendo dunque un moto turbolento,

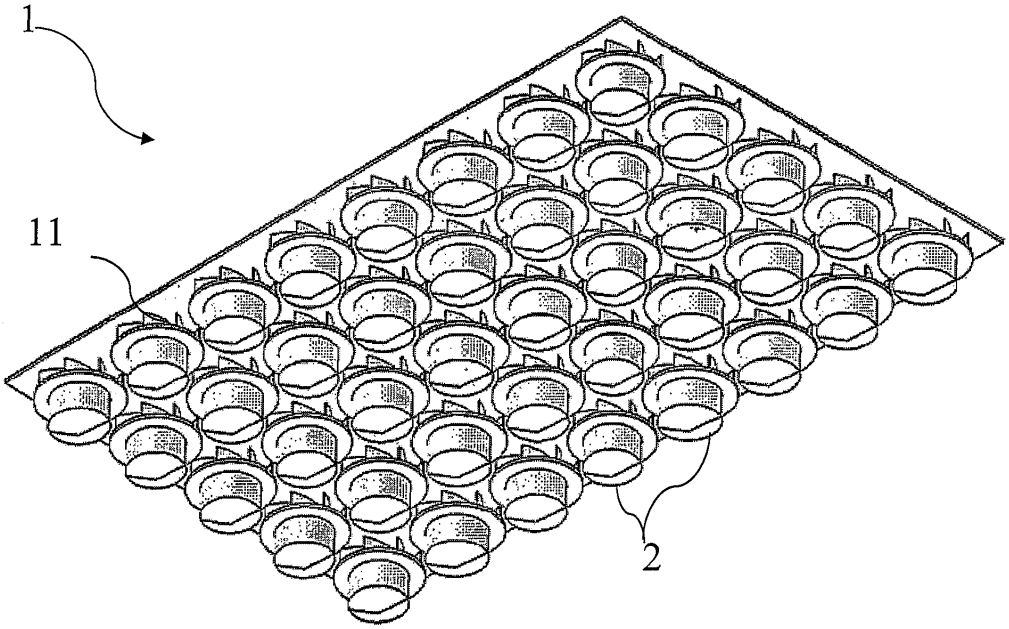


Figura 4.3: Vista prospettica del nuovo filtro di separazione (matrice di 5 x 8 moduli).

vorticoso e tridimensionale al fluido all'interno del modulo di filtrazione 2.

Per quanto descritto precedentemente, detto elemento palettato 3 definisce un percorso centripeto secondo il verso di percorrenza di un fluido (ad esempio aria) rappresentato nella sezione in figura 4.5 attraverso delle frecce. Il percorso centripeto comprende un ingresso in corrispondenza del quale il fluido entra nell'elemento palettato 3 e un'uscita attraverso la quale lo steso fluido lascia l'elemento palettato 3 per entrare nel condotto anulare 42. Il moto vorticoso impresso al fluido aumenta la probabilità che il particolato impatti con le pareti del filtro rimanendovi imprigionato.

Il fluido, raggiunto il fondo del bicchiere 4, viene aspirato all'interno del condotto 21, subendo un ulteriore variazione di direzione, che contribuisce a rendere vorticoso il moto del fluido. Infine, il fluido attraversa detta apertura 12 praticata nel pannello di supporto 11.

Dunque, il modulo di filtrazione 2 impone un movimento ciclonico ad un fluido che lo attraversi comprendendo detto elemento palettato 3 definente un percorso centripeto accoppiato assialmente a detta camera cilindrica anulare 42: il primo imponendo un movimento bidimensionale, il secondo un movimento perpendicolare ad un piano contenente detto movimento bidimensionale, vedi figura 4.5. Il particolato, dunque, viene

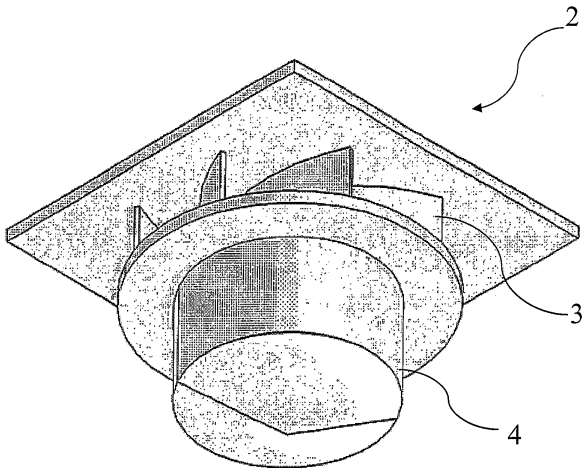


Figura 4.4: Vista prospettica di un singolo modulo componente il filtro.

dapprima proiettato verso le pareti interne del bicchiere 4 e poi contro la parete interna del condotto 21.

Con riferimento alla figura 4.9 una pluralità di elementi palettati 3 possono essere collegati tra loro mediante elementi collegamento 33, in modo che detta pluralità di elementi palettati 3 definisca un secondo componente asportabile 30 dal filtro per la pulizia del filtro 1.

Secondo la figura 4.10, una corrispondente pluralità di bicchieri 4, con riferimento alla figura 4.9, possono essere collegati tra loro mediante elementi di collegamento 44, in modo che detta pluralità di bicchieri 4 definisca un terzo componente 40 asportabile dal filtro per la pulizia del filtro.

L'assieme del pannello di supporto 11 e dei relativi condotti 21 ad esso collegati definisce un primo componente asportabile 10, per cui quando detto primo componente 10, detto secondo 30 e detto terzo componente asportabile 40 sono assiemati con riferimento all'esploso in figura 4.8, definiscono un filtro 1 secondo la presente invenzione. Ne consegue che una eventuale pulizia del filtro può essere facilmente condotta asportando il terzo componente 40 comprendente i bicchieri 4 e poi il secondo componente 30 comprendente i moduli palettati 3.

Con riferimento alla figura 4.6 si vede un filtro 1 secondo la presente invenzione visto lateralmente. La figura 4.7, invece, mostra una configurazione di una coppia di filtri secondo il presente trovato disposti in cascata e opportunamente sfalsati tra loro rispetto ai relativi moduli di filtrazione 2 in modo da massimizzare l'effetto filtrante. Vantaggiosamente, imponendo ai fumi percorsi vorticosi e tridimensionali si riesce a catturare

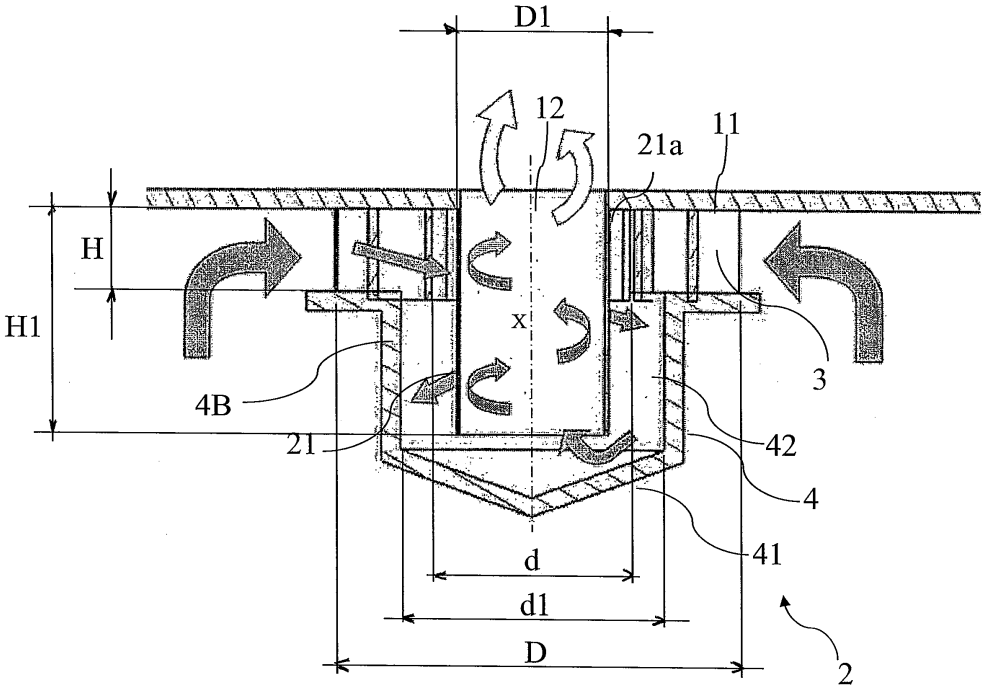


Figura 4.5: Vista in sezione assiale di un modulo con frecce indicanti la direzione del fluido.

particolato di dimensioni uguali o inferiori a 10 ?m di diametro.

Secondo un altro aspetto dell'invenzione, il percorso che un fluido è costretto a percorrere risulta essere lungo se paragonato alla semplicità di realizzazione di ciascun modulo filtrante 3. Infatti, ciascuna parte risulta composta da semplici estrusioni prive di sottosquadri, in modo da risultare di semplice costruzione, con possibilità di essere stampato anche in plastica, garantendo competitività anche per quanto riguarda i costi, oltre all'efficienza di separazione del particolato.

L'invenzione prevede inoltre la possibilità di inserire dei catalizzatori chimicamente attivi a rivestimento di alcune superfici interne, che abbiano la doppia funzione di catturare le particelle trasportate dallaria e di abbattere gli odori. Dal punto di vista costruttivo le parti che compongono ciascun modulo filtrante 2 possono essere realizzate in materiale plastico, in materiale metallico, in materiale ceramico, in materiale poroso e/o in combinazioni di tali materiali.

Le soluzioni tecniche adottate per il filtro di separazione secondo l'invenzione consentono di assolvere completamente il compito e gli scopi prefissati. In particolare il filtro

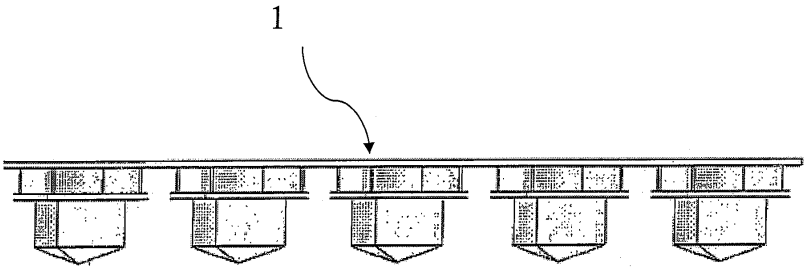


Figura 4.6: Vista laterale del filtro di separazione.

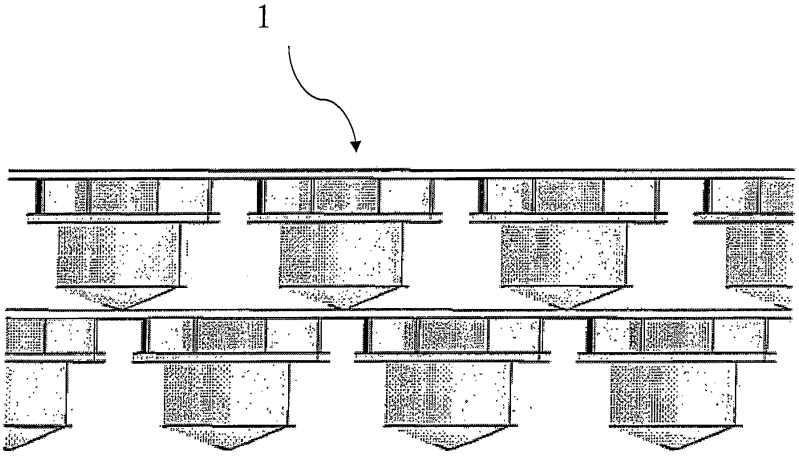


Figura 4.7: Vista laterale di due filtri di separazione disposti in cascata

secondo l'invenzione è di semplice costruzione e assemblaggio soprattutto in relazione alla lunghezza dei percorsi realizzati. Inoltre l'efficienza della filtrazione è superiore a quella dei filtri tradizionali per effetto del percorso tridimensionale e del moto turbolento a cui è sottoposto il fluido da filtrare.

Il filtro di separazione così concepito è suscettibile di numerose modifiche e varianti, tutte rientranti nell'ambito del concetto inventivo; inoltre tutti i dettagli potranno essere sostituiti da altri tecnicamente equivalenti.

In pratica, i materiali impiegati nonch le dimensioni e le forme contingenti, potranno essere qualsiasi secondo le esigenze e lo stato della tecnica.

4.2 Rivendicazioni

le rivendicazioni sono il cuore di un brevetto, ossia ne definiscono la novità, lefficacia, lambito di tutela, la forza, insomma ne consentono lesistenza. rivendicazioni rappresentano linsieme degli elementi di novità che si intendono proteggere tramite il brevetto. Le rivendicazioni determinano lambito della tutela di un brevetto. Le stesse rivestono un ruolo fondamentale in quanto una imprecisa formulazione può determinare linutilità di un brevetto, rendendolo facile da eludere. Nel contenzioso sui brevetti interpretare le rivendicazioni è, generalmente, il primo passo per valutarne la validità o lavvenuta violazione.

1. Filtro di separazione di un dispositivo di ventilazione comprendente almeno un modulo di filtrazione (2) comprendente un elemento palettato (3) avente forma tronco-cilindrica e definente un percorso centripeto avente una uscita in comunicazione con un condotto anulare (42) a sviluppo assiale definito da un primo condotto (21) interno e concentrico ad un secondo condotto (4).

2. Filtro secondo la rivendicazione 1, in cui detto modulo di filtrazione (2) comprende mezzi (41) di collegamento di detto condotto anulare (42) con un volume interno definito da detto primo condotto (21).

3. Filtro secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui detto elemento palettato comprende una corona circolare (31) a cui sono collegate due o più palette (32) aventi sviluppo perpendicolare ad un piano di giacitura della corona circolare (31).

4. Filtro secondo la rivendicazione 3, in cui detto primo condotto (21) è parzialmente inserito in detto elemento palettato (3) ed in cui detto secondo condotto (4) è definito da un bicchiere comprendente un fondo (41) definente detti mezzi di collegamento (41), un bordo del bicchiere essendo a contatto con la corona circolare (31) definente l'elemento palettato (3), il bicchiere risultando sovrapposto a cappuccio rispetto ad una restante porzione del primo condotto (21) emergente rispetto a detto elemento palettato (3).

5. Filtro secondo la rivendicazione 3, in cui dette palette (32) sono piane o incurvate secondo una definizione di una girante di pompa centrifuga/centripeta.

6. Filtro secondo la rivendicazione 4, in cui detto fondo (41) del bicchiere (4) ha forma tronco-cilindrica e/o in cui detto bicchiere (4) è definito da un tronco-cilindro retto e/o in cui detto primo condotto (21) è definito da un tronco-cilindro.

7. Filtro secondo le rivendicazioni 4 o 6, ulteriormente comprendente un elemento di supporto (11) piano, comprendente almeno un modulo filtrante (2) ed un'apertura (12) in cui è inserito un estremo (21a) di detto primo condotto (21), in modo che le palette (32) di detto elemento palettato (3) risultano a contatto con detto elemento di supporto (11).

8. Filtro secondo le rivendicazioni da 3 a 7, comprendente una pluralità di moduli di filtrazione (2), in cui rispettive pluralità di elementi palettati (3) sono collegati tra loro mediante elementi di collegamento (33).

9. Filtro secondo le rivendicazioni da 3 a 7, comprendente una pluralità di moduli di filtrazione (2), in cui rispettive pluralità di bicchieri (4) sono collegati tra loro mediante elementi di collegamento (44).

10. Filtro secondo le rivendicazioni da 3 a 7, in cui detta corona circolare (31) definisce un diametro interno (d) ed un diametro esterno (D) ed in cui detto secondo condotto (4) ha diametro interno (d1) di misura compresa tra detti due diametri (d,D).

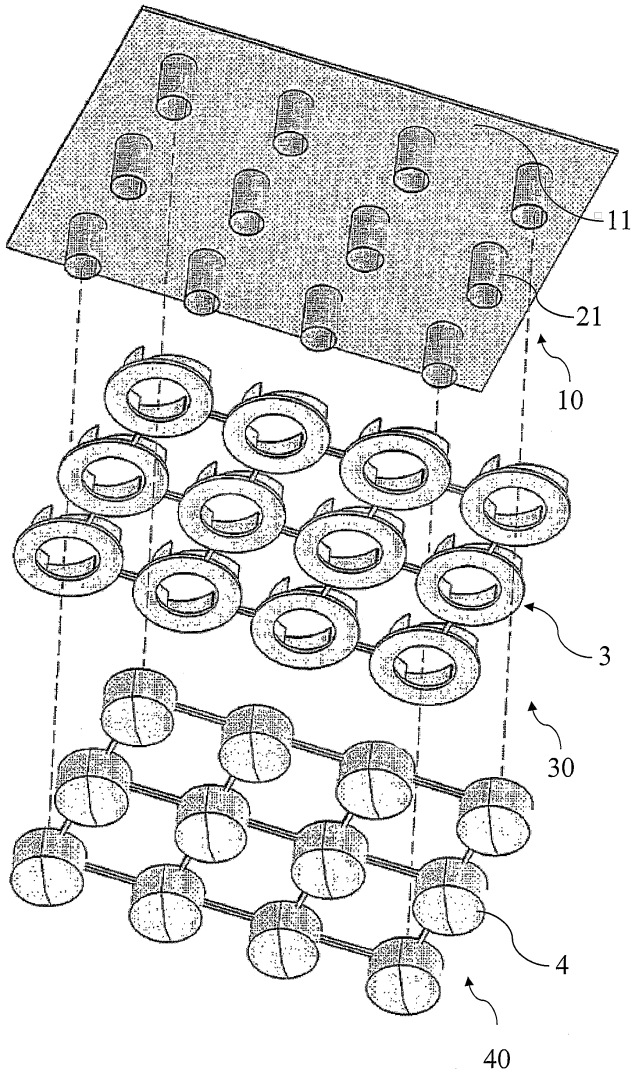


Figura 4.8: Una vista in esploso del filtro di separazione.

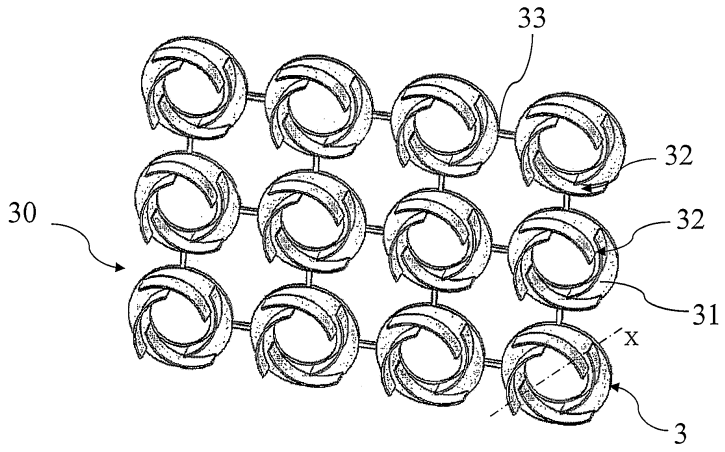


Figura 4.9: Vista inferiore di insiemi di parti definenti il filtro.

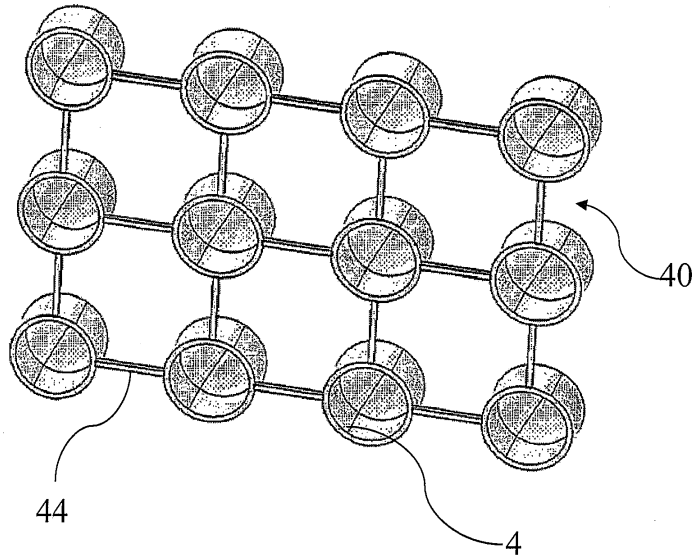


Figura 4.10: Vista inferiore di insiemi di parti definenti il filtro.

5

Conclusioni

In questa tesi è stato analizzato il funzionamento dei filtri impiegati nelle cappe aspiranti delle cucine industriali; inizialmente si è preso in esame una tipologia di filtro meccanico ampiamente diffuso sul mercato sia nazionale che internazionale, per via della sua semplice geometria e della praticità d'uso e manutenzione.

Sono state effettuate delle simulazioni numeriche, tramite il codice CFD Star-CCM+, che hanno portato alla luce la scarsa efficienza di questa tipologia di dispositivi nel filtrare particelle di dimensioni inferiori a 10-12 *micron* di diametro, dovuto principalmente al fatto che il fluido effettua un percorso bidimensionale all'interno del filtro con tempo di percorrenza limitato.

Per aumentare l'efficienza di separazione del filtro, è stato ideato un nuovo dispositivo che sia in grado di risolvere gli inconvenienti riscontrati, portando quindi il fluido ad effettuare un percorso maggiore con cambi continui di direzione in tutte e tre le dimensioni.

Il nuovo filtro è stato in seguito ottimizzato con il software modeFRONTIER impostando come obbiettivi la massimizzazione dell'efficienza di separazione e la minimizzazione delle perdite di carico che il filtro introduce nel sistema di aspirazione.

Per ottenere una convalida dei risultati ottenuti numericamente, sono state effettuate delle misurazioni sperimentali su entrambe le tipologie di filtro. La prima fase di prove era mirata ad ottenere il campo di moto generato dal filtro stesso attraverso l'uso della tecnica laser Doppler; l'analisi di questi risultati ha portato alla luce un'ottima correlazione con le simulazioni CFD ed una conferma dell'instabilità e non stazionarietà del flusso provocata dell'espansione improvvisa che subisce all'uscita del filtro.

Lo scopo successivo delle prove in laboratorio prevedeva l'ottenimento dell'efficienza di separazione del filtro in funzione della dimensione delle particelle attraverso l'uso di un granulometro laser; l'analisi di questi risultati ha portato alla luce la difficoltà di

produrre ed infine di rilevare le dimensioni esatte delle particelle che hanno la tendenza ad agglomerarsi tra di loro e sfalsare quindi la misura stessa.

Viste le problematiche nel rilevare un'efficienza accurata in funzione del diametro della particelle, per le ultimi test in laboratorio per validare la nuova tipologia di filtro, si è deciso di voler ottenere la sola efficienza globale dello stesso, andando a pesare le quantità di liquido nebulizzato nell'aria e depositato sui vari componenti che costituiscono il sistema di filtraggio realizzato.

Il nuovo filtro ha presentato notevoli vantaggi e visto il potenziale innovativo dello stesso, ne è stato registrato il brevetto.

Bibliografia

[1] *Filtro a labirinto "Dedalus"*, SSP Stainless Steel Performance s.p.a

[2] *Grease filter for kitchen ventilators* - DeWitt H. Doane, US Patent n° 3870494, 11/03/1975

[3] *Flow simulation in industrial cyclone separator* - C. Bhasker, Advances in Engineering Software 41 (2010) pag. 220-228

[4] *Numerical investigation of the flow in a kitchen hood system* - Juan Abanto, Marcelo Reggio, Building and Environment, Volume 41, Issue 3, March 2006, pag. 288-296

[5] Halton Ventilated Ceilings - www.halton.com

[6] CD-Adapco - www.cd-adapco.com

[7] *Grease Extraction System* - Greenheck Fan Corporation - Aprile 2006

[8] *Kitchen ventilation - Mechanical Grease* - A supplement to ASHRAE Journal - A. Livchak, D. Schrock, M. Lehtimaki, A. Taipale - Giugno 2003

[9] *Lagrangian and Eulerian models for simulating turbulent dispersion and agglomeration of droplets within a spray* - Third International Conference on CFD in Minerals and Process Industries - J.J. Nijdam, B. Guo, D.F. Fletcher, T.A.G. Langrish - Dicembre 2003

[10] *Test di efficienza su filtri cappe* - Stainless Steel Performance - 28.02.02.

[11] *Three-dimensional features of the turbulent flow through a planar sudden expansion* - Physics of Fluid 20 - L. Casarsa, P. Giannattasio - gennaio 2008

[12] *Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion* - F. Durst, A. Melling, and J. H. Whitelaw,, J. Fluid Mech. 64, 111 (1974)

[13] *Industrial gas cleaning - The principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions* - W. Strauss - Pergamon Press - 1966

[14] *High-efficiency air filtration* - P.A.F. White, S.E. Smith - Londin Butterwirths - 1964

[15] *Cyclones in industry* - K. Rietema, C.G. Verver - Elsevier Publishing Company - 1961

[16] ESTECO SpA - www.esteco.com

[17] Greenheck Fan Corporation - www.greenheck.com

[18] United States Utility Patent n° 6,251,153 B1 - Title: *Centrifugal air filter* - Assignee: Greenheck Fan Corporation - Date: 26/06/2001

[19] Jeven Oy - www.jeven.com

[20] United States Utility Patent n° 5,322,470 A - Title: *Ventilation apparatus* - Assignee: Jeven Oy - Date: 21/06/1994

[21] SOLIDO - www.solido3d.com