





**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**INDOOR AIR QUALITY: STUDIO DI METODI E CAMERE DI PROVA  
PER LA VERIFICA DELLE EFFICIENZE DI FILTRAZIONE**

**INDOOR AIR QUALITY: STUDY OF METHODS AND TEST CHAMBERS  
FOR FILTRATION EFFICIENCY ASSESSMENT**

Relatrice:

Prof.ssa Maria Letizia Ruello

Correlatrice:

Natalia Czerwinska

Tesi di Laurea di:

Ilaria Squarcia

A.A. 2022/2023

# SOMMARIO

<b>RIASSUNTO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
1.1. DEFINIZIONE DI <i>INDOOR AIR QUALITY</i> .....	2
1.2. INQUINANTI.....	2
1.3. PROTEZIONE INDIVIDUALE E COLLETTIVA .....	3
1.4. FILTRI .....	3
1.4.1. <i>Semimaschere facciali</i> .....	4
1.4.2. <i>Elettrofilatura</i> .....	5
1.4.3. <i>Storia dell'elettrofilatura</i> .....	5
1.4.4. <i>PLA</i> .....	6
1.4.5. <i>Elettrofiltro</i> .....	6
1.5. OZONO.....	7
1.6. TIPI DI REATTORI PER LE PROVE.....	8
<b>2. PARTE SPERIMENTALE 1.....</b>	<b>9</b>
2.1. DESCRIZIONE DELLE MASCHERINE SPERIMENTALI IN PLA .....	9
2.2. STRUMENTAZIONE .....	10
2.3. CAMERA DI PROVA .....	11
2.4. PROVE DI FILTRAZIONE .....	12
2.5. SVOLGIMENTO DELLA PROVA .....	13
2.6. RISULTATI .....	14
2.6.1. <i>Grafici</i> .....	16
2.6.2. <i>Penetrazione e efficienza</i> .....	18
2.6.3. <i>Variazione dell'efficienza di filtrazione in funzione della velocità</i> .....	20
2.6.4. <i>Risultati finali</i> .....	22
<b>3. PARTE SPERIMENTALE 2.....</b>	<b>23</b>
3.1. DESCRIZIONE DEL FILTRO .....	23
3.1.1. <i>Principio di funzionamento</i> .....	24
3.1.2. <i>Alimentazione del filtro</i> .....	25
3.2. STRUMENTAZIONE .....	25
3.3. GENERAZIONE DELL'OZONO .....	26
3.4. NECESSITÀ DI COSTRUIRE UNA CAMERA DI PROVA .....	26
3.5. PROVE BATCH SENZA VENTILAZIONE .....	27
3.5.1. <i>Svolgimento della prova</i> .....	27
3.5.2. <i>Risultati</i> .....	28
3.6. PROVE BATCH.....	29
3.6.1. <i>Svolgimento della prova e risultati</i> .....	29
3.7. PROVE BATCH CON VENTILAZIONE DOPO LA SIGILLATURA DELLA CAMERA .....	32

3.7.1. <i>Svolgimento della prova e risultati</i> .....	32
3.7.2. <i>Prova batch con gas inerte e risultati</i> .....	34
3.8. REALIZZAZIONE DI UNA NUOVA CAMERA DI PROVA .....	34
<b>4. CONCLUSIONI</b> .....	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</b> .....	<b>37</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	<b>38</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>38</b>

## RIASSUNTO

Lo scopo del presente elaborato è di analizzare diversi dispositivi e metodi per la protezione contro gli inquinanti presenti negli ambienti interni, prendendo in considerazione sia dispositivi di protezione individuale che collettiva.

Nella prima parte del lavoro si va quindi a valutare l'efficacia di mascherine sperimentali elettrofilate per la protezione individuale e nella seconda parte di sistemi di purificazione collettiva dell'aria quale l'elettrificazione.

In particolare, nella prima parte si va a indagare la filtrazione di particelle utilizzando dei filtri sperimentali di fibre elettrofilate in Acido Polilattico (PLA) mettendoli a confronto con mascherina chirurgica e FFP2.

Vengono introdotti i materiali dei dispositivi di protezione e le camere di prova.

Si va a valutare l'efficacia di nuovi materiali di filtrazione il cui utilizzo diminuirebbe l'impatto ambientale delle mascherine in quanto sostituirebbe quelle prodotte con materiali plastici a base di petrolio con altre composte da materiali biodegradabili ottenuti da fonti rinnovabili e con una filiera di produzione più economica.

Le prestazioni vengono valutate mediante l'utilizzo di un aerosol di NaCl a varie velocità.

Nella seconda parte si vanno a valutare gli effetti collaterali dei sistemi di purificazione collettiva, con l'obiettivo principale di realizzare la camera di prova e trovare la metodologia ideale per valutare la generazione di ozono durante il funzionamento degli elettrofiltri.

Nella parte conclusiva della tesi sono riassunti i risultati dei test fatti in laboratorio.

# 1. INTRODUZIONE

## 1.1. Definizione di *indoor air quality*

Negli ultimi anni c'è stato un forte interessamento verso la qualità dell'aria in ambienti confinati, in quanto la maggior parte della popolazione si trova spesso in ambienti chiusi per molte ore al giorno. Inoltre, i nuovi edifici sono più ecosostenibili ma sono anche più isolati dall'ambiente esterno e questo porta alla formazione di un inquinamento indoor.

L'inquinamento dell'aria (*air pollution*) si definisce come:

“ogni modificazione dell'aria atmosferica, dovuta all'introduzione nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da ledere o da costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente, oppure tale da ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente”. [d. lgs 152 del 2006 art. 268]

La presenza in aria di particelle rappresenta dunque un motivo di inquinamento, la cui entità dipende da diverse caratteristiche fisiche e chimiche.

## 1.2. Inquinanti

L'aria è il mezzo di trasporto principale per i contaminanti particolati. La qualità dell'aria indoor è influenzata in parte da agenti presenti nell'aria esterna ma soprattutto da inquinanti presenti solo in ambienti confinati.

Gli aerosol chimici e biologici (particolati) hanno dimensioni generalmente comprese tra 1-10  $\mu\text{m}$ .

Gli inquinanti particellari sono ad esempio: polvere, polline, muffa, e composti organici.

In questo elaborato si andranno a considerare nella prima parte i PM, nella seconda parte l'ozono.

Il materiale particolato aerodisperso, o PM (*Particulate Matter*), è un insieme di particelle che rimangono nell'aria e possono essere grandi e visibili, come ad esempio il fumo, o invisibili ad occhio nudo, come i virus.

Il particolato viene classificato in base alla dimensione delle particelle che possono essere grossolane, come il PM<sub>10</sub> o fine come il PM<sub>2,5</sub>. In particolare, si definisce il:

- PM<sub>10</sub> come particelle con un diametro aerodinamico inferiore a 10  $\mu\text{m}$
- PM<sub>2,5</sub> come particelle con un diametro aerodinamico inferiore a 2,5  $\mu\text{m}$

Inoltre, più le particelle sono piccole e più riescono a penetrare in profondità nell'apparato respiratorio provocando danni maggiori all'organismo.

### 1.3. Protezione individuale e collettiva

Per contrastare l'inquinamento indoor da particelle vengono utilizzati diversi sistemi di protezione.

Abbiamo dei dispositivi di protezione individuale (DPI), tra i quali ritroviamo le semimaschere facciali, che fungono da barriera per vari inquinanti presenti nell'aria.

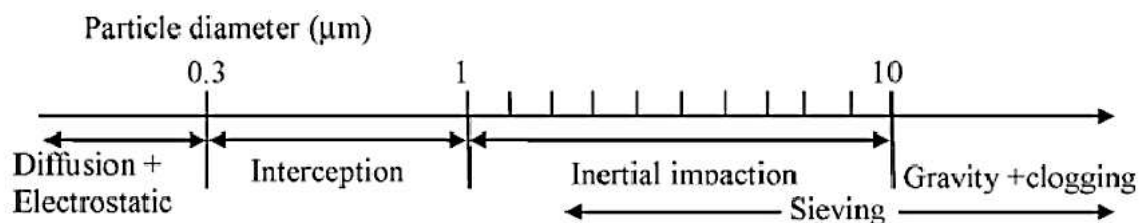
Esistono anche dei sistemi di protezione collettiva (DPC) come i purificatori d'aria che, con l'utilizzo di vari sistemi di filtrazione, hanno lo scopo di trattenere alcune sostanze dannose per la salute.

### 1.4. Filtri

I filtri dell'aria sono stati tradizionalmente valutati in base alla loro capacità di rimuovere il particolato dal flusso d'aria.

I filtri antiparticolato separano le particelle dal flusso d'aria in virtù della dimensione, della forma e della carica delle particelle in relazione alle proprietà di superficie, dimensione e carica del filtro fibroso.

I vari mezzi di filtrazione si basano su differenti meccanismi di interazione fisica per la separazione e la raccolta delle particelle e presentano quindi diverse efficienze di filtrazione.



*Fig 1. Dimensione delle particelle nei vari meccanismi di interazione*

Per i filtri a base di fibre, la rimozione delle particelle è determinata da diversi meccanismi.

- Le particelle grandi che superano la dimensione dei pori del filtro sono bloccate sulla superficie del filtro a causa dell'effetto setaccio.
- Le particelle più piccole dei pori della superficie, nella gamma dei micrometri, hanno un percorso di volo influenzato dal flusso d'aria. Queste seguono il flusso da vicino a causa dell'inerzia, e vengono raccolte con un meccanismo di impatto inerziale.

- Le particelle nella gamma sub-micrometrica, il cui percorso di volo segue il flusso d'aria, sono raccolte attraverso il meccanismo di intercettazione.
- Le particelle molto fini nella gamma dei nanometri possono anche essere catturate attraverso un meccanismo di diffusione per effetto del moto browniano.
- le particelle cariche possono essere catturate per attrazione elettrostatica.

Un modo per migliorare la "qualità" di un filtro dell'aria è quello di rendere più efficiente la sua filtrazione.

Ad esempio, vi è un aumento di efficienza nel momento in cui più filtri sono impacchettati all'interno del mezzo di filtrazione.

#### ***1.4.1. Semimaschere facciali***

Una semimaschera è un dispositivo di protezione individuale formato interamente o parzialmente da materiale filtrante; l'aria entra nella semimaschera attraverso quest'ultimo e quando viene espirata passa direttamente all'ambiente esterno. La loro capacità di filtrazione varia a seconda del mezzo filtrante.

Le semimaschere sono classificate in base alla loro efficienza filtrante ed esistono tre classi di dispositivi: FFP1, FFP2 e FFP3.

Le semimaschere che soddisfano i requisiti della norma europea devono essere designate nel modo seguente: semimaschera filtrante antipolvere EN 149, anno di pubblicazione, classificazione, opzione. Quest'ultime sono formate da tessuto non tessuto: una struttura composta da fibre legate meccanicamente, termicamente o chimicamente.

Il tessuto filtrante delle semimaschere viene prodotto col processo di *meltblown*, o processo di deposizione di polimeri, in cui flussi di polimero fuso vengono sottoposti ad aria calda ad alte velocità per produrre una rete costituita da microfibre.

Il polimero più comunemente usato è il propilene, in quanto è poco costoso e versatile per produrre varie tipologie di prodotti. Inoltre, ha una bassa viscosità che gli permette di formare filamenti di diametro fino a 1µm.

Il materiale filtrante può essere prodotto anche con altre tecniche. Una delle più innovative e promettenti è quella dell'elettrofilatura.



### ***1.4.2. Elettrofilatura***

L'elettrofilatura o *electrospinning* è un processo produttivo che consente di ottenere filamenti continui di materiale sintetico di diametro che va da 100 a 1000  $\mu\text{m}$  in una struttura ad intreccio casuale.

L'attrattiva dell'elettrofilatura deriva dalla sua configurazione relativamente semplice.

Una tipica configurazione consiste in un ugello collegato a un'alimentazione ad alta tensione, da cui viene estrusa la soluzione polimerica, e un elettrodo collettore messo a terra a una distanza sufficiente dall'ugello.

I mezzi di filtrazione nanofibrosi presentano:

- un basso peso
- piccole dimensioni dei pori
- alta permeabilità

Grazie all'alta area superficiale specifica e all'elevata coesione superficiale hanno una buona efficacia nella rimozione di particelle di dimensioni comprese tra 1 e 5  $\mu\text{m}$ .

La maggior parte delle nanofibre polimeriche sono chimicamente inerti e non svolgono alcuna funzione oltre alla filtrazione.

Le nanofibre devono essere usate come strato di rivestimento attivo su supporti con efficienza di filtrazione trascurabile, perché potrebbero danneggiarsi facilmente durante l'utilizzo.

### ***1.4.3. Storia dell'elettrofilatura***

Le nanofibre elettrofilate hanno una lunga storia nella filtrazione, essendo state prodotte per applicazioni sia nell'industria dei consumatori che in quella della difesa da più di vent'anni.

Per la prima volta furono create nel 1936 in Russia, ed erano conosciute con il nome di filtro di Petryanov.

A causa della guerra fredda, questi prodotti e metodi di produzione non hanno guadagnato importanza commerciale nel mondo occidentale, fino a quando negli anni '80 sono diventati noti negli Stati Uniti grazie alla Donaldson e negli anni '90 in Europa grazie alla Freudenberg.

Molte imprese stanno attualmente producendo prodotti elettrofilati per varie applicazioni, compresa la filtrazione.

#### ***1.4.4. PLA***

La maggior parte delle maschere monouso sono fatte di polimeri come polipropilene, poliuretano, policarbonato, poliacrilonitrile, polietilene, polistirene o poliestere, mentre le maschere con classi di filtrazione FFP2 e FFP3 sono generalmente fatte di tessuto non tessuto di polipropilene.

La necessità di sostituire i materiali non biodegradabili con polimeri ecologici ha portato a diversi studi volti all'individuazione e alla sperimentazione di questi ultimi.

Uno dei polimeri sintetici biodegradabili è il poli-acido lattico (PLA,  $[\text{CH}(\text{CH}_3)\text{COO}]_n$ ), un polimero che può essere prodotto da risorse rinnovabili attraverso processi di fermentazione e polimerizzazione. I filtri testati in questo elaborato sono stati realizzati in PLA tramite una tecnica mista di stampa 3D ed elettrofilatura, utilizzando semplicemente un filamento di PLA commerciale e acetone come solvente. Al termine del processo di elettrofilatura, sono stati confrontati due diversi set di filtri: uno ottenuto con un solo strato di fibra elettrofilata e l'altro sovrapponendo due singoli strati (definiti Filtro Singolo e Filtro Doppio).

#### ***1.4.5. Elettrofiltro***

L'elettrofiltrazione è una tecnica di protezione collettiva altamente innovativa e all'avanguardia, in grado di captare le particelle presenti in un flusso d'aria.

Il principio di funzionamento si basa sull'applicazione di un'elevata differenza di potenziale tra gli elettrodi di emissione e quelli di raccolta, che crea un forte campo elettrico avente la massima intensità in prossimità degli elettrodi di emissione. Attorno alla superficie dell'elettrodo di emissione l'aria è così ionizzata.

Questo effetto viene chiamato "effetto corona" perché gli ioni tendono a spostarsi dalla zona di corona circostante l'elettrodo di emissione verso gli elettrodi di raccolta.

Durante questo spostamento gli ioni prodotti entrano in collisione con le particelle di contaminante in sospensione nell'aria cedendo loro una carica elettrica positiva; in questo modo ogni particella può essere caricata dall'azione di più ioni fino a raggiungere elevati livelli di carica.

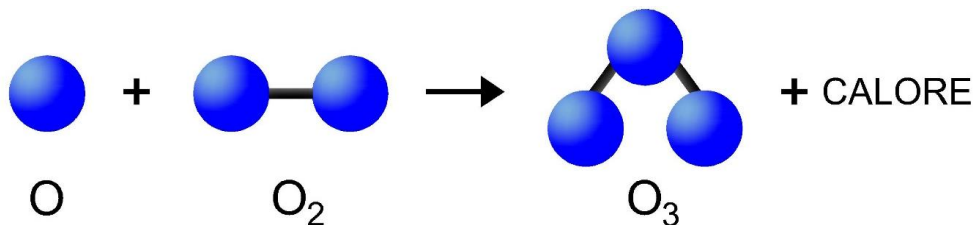
Le particelle positive così caricate sono quindi attratte verso gli elettrodi di raccolta negativi dove sono trattenute.

Di conseguenza, l'elettrofiltrazione può ridurre i tempi di lavorazione a pochi minuti rispetto alla filtrazione convenzionale, che può richiedere anche diverse ore.

All'alta efficienza di filtrazione si unisce anche l'importante azione di disinfezione batterica dovuta alla sua azione ionizzante con conseguente produzione di ozono.

## 1.5. Ozono

L'ozono è un gas composto da molecole instabili di ossigeno che reagiscono ad una fonte di calore.



*Fig 2. Reazione di formazione dell'ozono*

L'ozono per formarsi ha bisogno di energia:

- Nella stratosfera l'ozono si forma per reazione delle molecole di ossigeno con le radiazioni solari
- nell'atmosfera urbana si forma da reazioni tra ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e composti organici volatili (COV) in presenza di luce solare
- in ambienti interni dispositivi come stampanti, fotocopiatrici e purificatori d'aria lo rilasciano poiché l'ossigeno andando a contatto con i loro processi elettrici si trasforma

In particolare, i purificatori d'aria lo producono intenzionalmente per avere un'azione di disinfezione batterica e di inattivazione virale; al contrario, per le stampanti la produzione di ozono è una generazione secondaria involontaria.

Generalmente l'ozono presente nell'aria esterna è la principale fonte di ozono dell'ambiente indoor.

È stato stimato che le concentrazioni di ozono indoor sono del 30% - 70% di quello esterno (Weschler, Shields, 1999) se non ci sono fonti interne.

## 1.6. Tipi di reattori per le prove

Esistono diverse tipologie di reattori utilizzabili per compiere una determinata reazione chimico-fisica.

- Reattori discontinui: il reattore in questo caso è un sistema chiuso in cui ci sono vari cicli composti da carico, reazione e scarico. Ad esempio il reattore Batch.
- Reattori continui: Funzionano senza fermarsi mai e hanno la caratteristica che la velocità di flusso lungo la direzione longitudinale è costante. Sulle varie sezioni di flusso le caratteristiche sono costanti, non avviene mescolamento fra sezioni adiacenti ma solo all'interno di ogni sezione. Ad esempio il reattore Plug Flow.

## 2. PARTE SPERIMENTALE 1

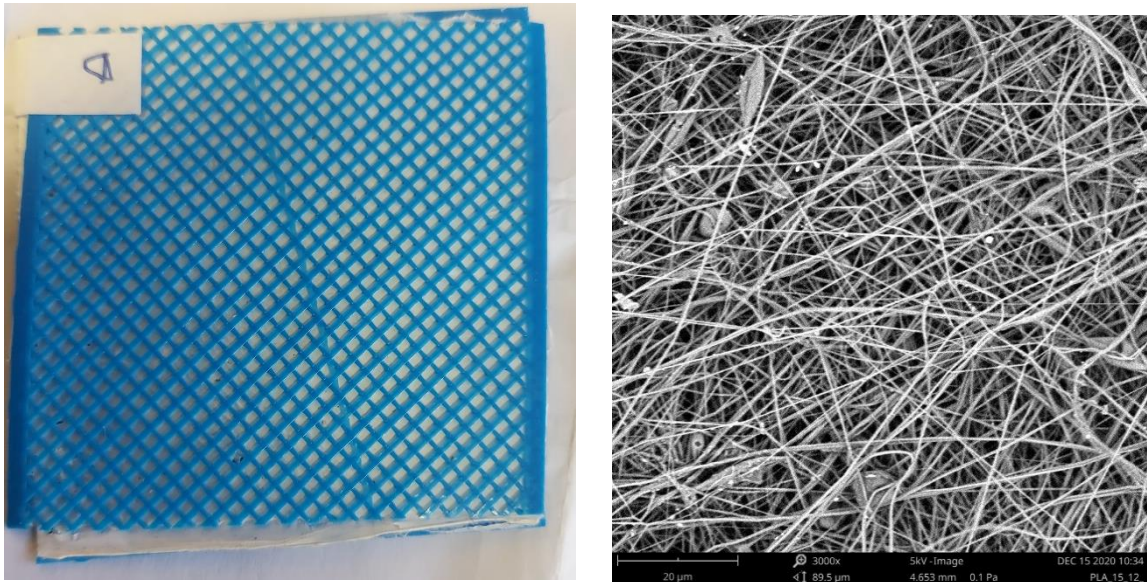
### 2.1. Descrizione delle mascherine sperimentali in PLA

Il filtro studiato nella ricerca svolta è quello prodotto in PLA (acido polilattico o polilattato), un polimero bioplastico realizzato col processo di elettrofilatura.

Il filtro è formato da uno strato di fibra e un supporto creato con stampante 3D.

Sono state prese in esame tre configurazioni:

- Filtro Singolo: uno strato di filtro in PLA
- Filtro Doppio 1: due strati di filtro in PLA
- Filtro Doppio 2: due strati di filtro in PLA



*Fig 3. A sinistra filtro in PLA utilizzato nello studio. A destra, vista al microscopio elettronico a scansione (SEM) dello stesso.*

La relazione tra la tessitura dei tre filtri in esame può essere descritta dalla formula:

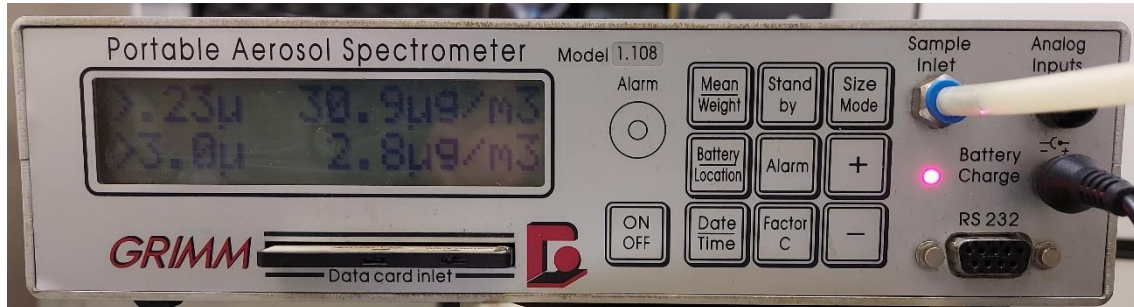
$$\text{Filtro Doppio 1} = 2 \times \text{Filtro Doppio 2} = 4 \times \text{Filtro Singolo}$$

I filtri commerciali usati come riferimento sono:

- FFP2 (mask hangzhou kings ram biomedical technology co. Ltd)
- Mascherina facciale tipo II, con tre strati TNT (lifeitalia)

## 2.2. Strumentazione

È stato usato un contatore di particelle ottico portatile basato sulla diffusione laser (model 1,108, OPC, GRIMM Aerosol Technik GmbH & co, Germania).



*Fig 4. Strumentazione per la concentrazione del particolato*

Questo strumento misura la concentrazione di particelle per centimetro cubo (massimo 0,1 mg per cm<sup>3</sup>), di dimensioni comprese tra 0,23µm e 20µm.

Le particelle vengono campionate nello strumento e attraversano perpendicolarmente un fascio laser. Un rivelatore posto fuori asse rispetto al laser e al fascio di particelle registra i segnali di intensità di diffusione delle singole particelle. Questi vengono poi elaborati per fornire la concentrazione e la distribuzione delle classi dimensionali.

Al termine della prova, si possono estrapolare dal Grimm dei valori che possono essere trasformati in grafici per analizzare l'andamento dei PM.

### 2.3. Camera di prova

Per le prove di efficienza dei PLA è stata utilizzata una camera sigillata sperimentale di misure 3m x 2m x 2,5m per avere un microclima controllato.



*Fig 5. Interno della camera*

Con all'interno:

- un umidificatore ad ultrasuoni (Medisana UHW, Neuss, Germania) per generare un aerosol monodisperso di una soluzione di NaCl al 2% in acqua.
- Tre ventilatori per assicurare un'omogenizzazione delle particelle di NaCl.
- A 1,05 m dal suolo era presente un foro di uscita dalla camera dal diametro di 5cm atto a valutare le condizioni interne.



*Fig 6. Uscita della camera di prova a forma di tubo cilindrico*

All'esterno è stato inserito un tubo cilindrico, della stessa dimensione del foro, all'interno del quale si trovavano in questo ordine:

- un filtro in silica gel che rimuove dell'umidità
- Uno scomparto per inserire il filtro da testare
- Una ventola regolabile per creare un flusso di uscita a varie velocità costanti
- Un contatore laser di PM (Grimm) che rileva la concentrazione delle particelle da 0,23µm fino a 20µm

## 2.4. Prove di filtrazione

Per le prove di efficienza sono state seguite le linee guida della normativa EN 149 del 2009:

“L'aerosol di NaCl deve essere generato da una soluzione al 2% di NaCl reagente in acqua distillata. L'atomizzatore deve essere sistemato in un condotto attraverso il quale è mantenuto un flusso d'aria costante. Può essere necessario deumidificare l'aria per ottenere l'essiccazione completa delle particelle di aerosol.”

Sono state eseguite tre differenti prove per ogni filtro, in base alla portata del flusso d'aria regolata dalla ventola posta dopo il filtro.

$$Q = \left(\frac{1}{4} * \pi * d^2\right) * v = A * v = [m^3 \backslash s] \rightarrow [L \backslash min]$$

Dove:

A è l'area del tubo in uscita dalla camera di prova

v è la velocità della ventola misurata in m/s

Per ciascun filtro vengono eseguite le prove a 3 diverse velocità ( $v = 1.07$  m/s,  $v = 0.50$  m/s,  $v = 0.30$  m/s).

Si procede dunque con l'analisi del flusso per ogni prova.

Per ogni velocità testata, sono stati effettuati dei *Blank test* di controllo in assenza del filtro.



	<b>Velocità [m/s]</b>	<b>Voltaggio ventola [V]</b>	<b>Portata [L/min]</b>
<b>Velocità massima</b>	1,07	12	126,1
<b>Velocità media</b>	0,5	7,5	58,9
<b>Velocità minima</b>	0,3	6	35,3

*Tab 1. velocità, voltaggio e portata delle ventole nelle tre prove effettuate*

## **2.5. Svolgimento della prova**

Prima di iniziare la prova è stato inserito un nuovo filtro in silica gel all'interno del tubo di uscita ed è stata controllata la chiusura ermetica della camera.

Una volta acceso il Grimm per rilevare la concentrazione ambientale iniziale, sono stati mantenuti attivi l'umidificatore e le ventole fino al raggiungimento della concentrazione di  $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Una volta raggiunta questa concentrazione, è stato inserito il filtro all'interno dell'alloggiamento.

Dopo 20 minuti, il filtro è stato rimosso ed è stata misurata la concentrazione ambientale per 10 minuti successivi.

Infine, la camera di prova è stata aperta per ripristinare le condizioni iniziali.

Dal rilevatore di particelle sono stati scaricati i dati registrati, grazie ai quali è stato possibile valutare l'andamento delle prove, generando dei grafici dai dati del Grimm.

## 2.6. Risultati

Dai risultati delle prove effettuate è possibile ricavare dei grafici per confrontare l'efficacia dei vari filtri.

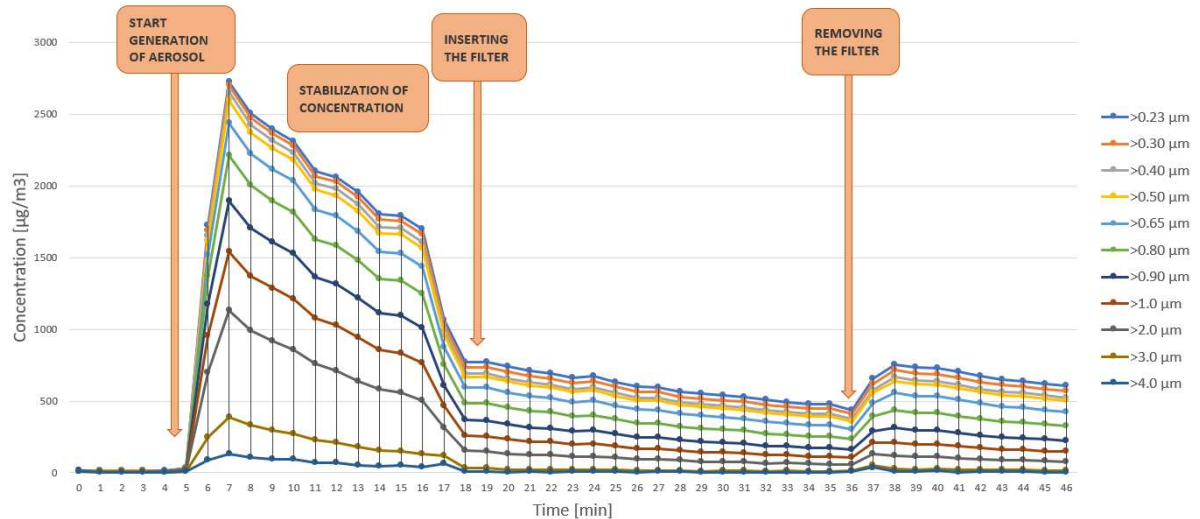


Fig 7. Esempio di grafico delle prove di efficienza di filtrazione

All'interno del grafico si trovano cinque diverse zone in questo ordine:

- Situazione ambientale, nei primi minuti la concentrazione di NaCl è pari a 0
- Accensione dell'umidificatore con successivo aumento della concentrazione fino a un picco
- Stabilizzazione della concentrazione fino al valore tipico di  $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Inserimento del filtro e rapido abbassamento della concentrazione in base all'efficienza del filtro inserito
- Rimozione del filtro dopo 20 minuti di attività e successiva rilevazione della concentrazione istantanea dell'aerosol di NaCl

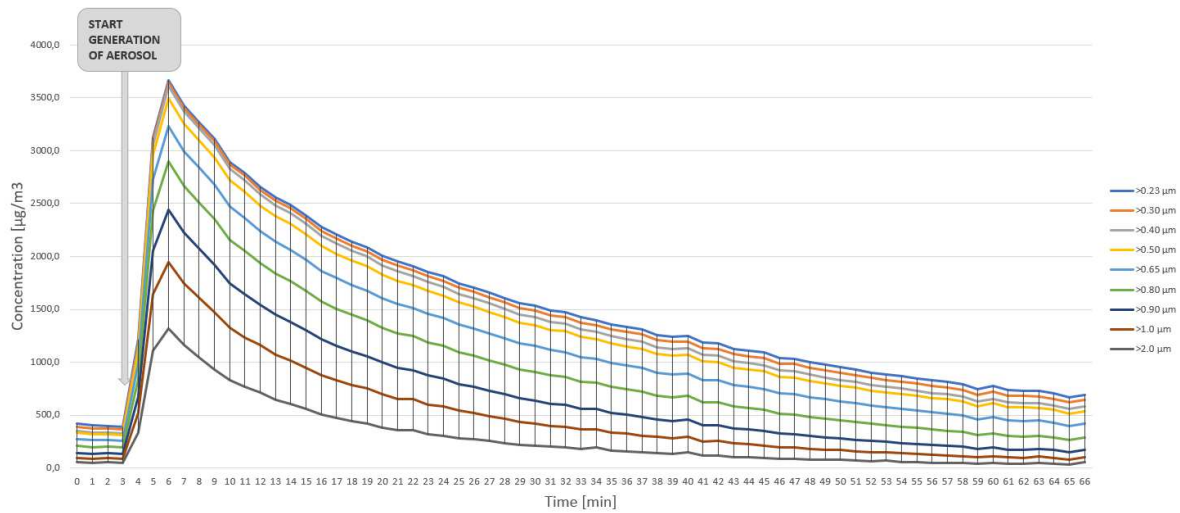


Fig 8. Grafico del blank test delle prove di efficienza di filtrazione

Nelle prove *Blank* si trovano solo tre zone:

- Situazione ambientale, nei primi minuti la concentrazione di NaCl è pari a 0
- Iniziale generazione dell'aerosol, in cui viene acceso l'umidificatore e la concentrazione sale fino a un picco
- Decorso della prova, per poter vedere il decadimento naturale dell'aerosol all'interno della camera di prova

### 2.6.1. Grafici

Si vanno ad elencare tutti i grafici fatti a velocità media per ogni filtro.

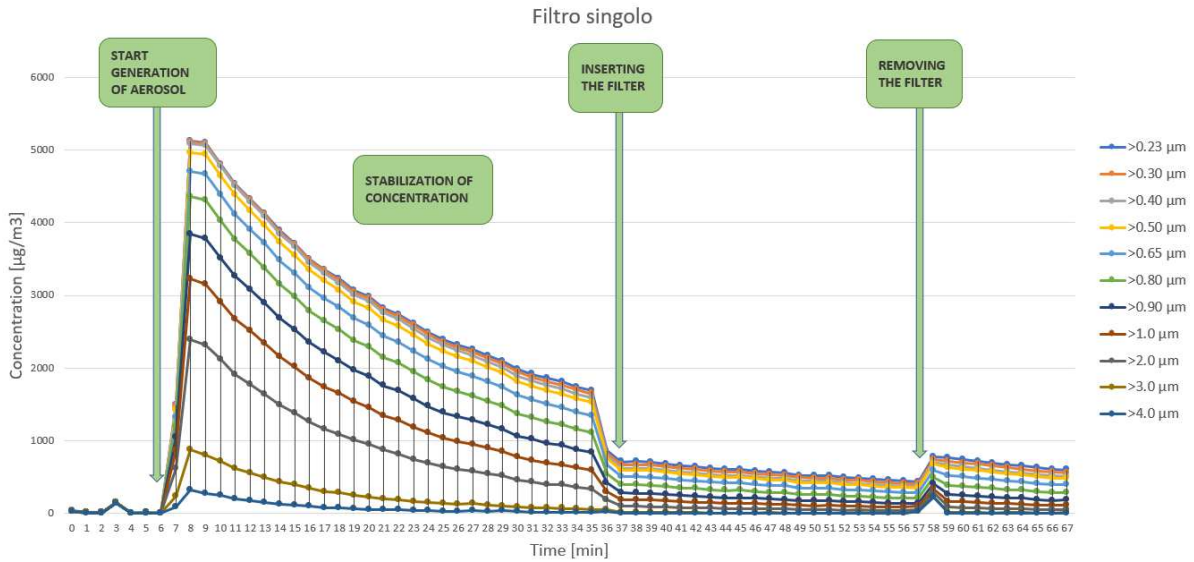


Fig 9. Grafico rappresentativo della prova di efficienza del filtro sperimentale: Filtro Singolo

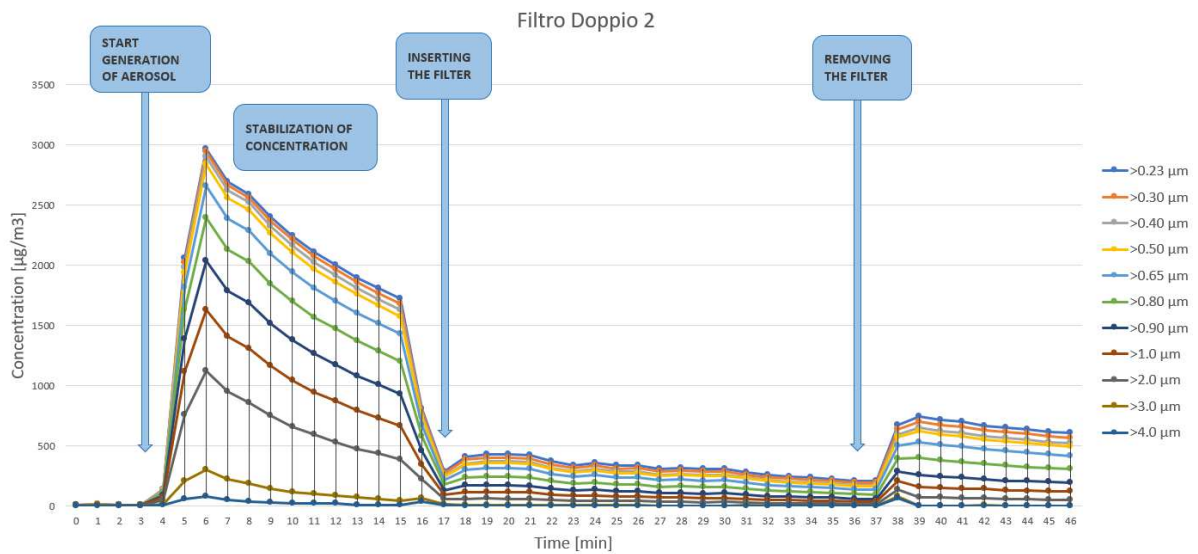


Fig 10. Grafico rappresentativo della prova di efficienza del filtro sperimentale: Filtro Doppio 2

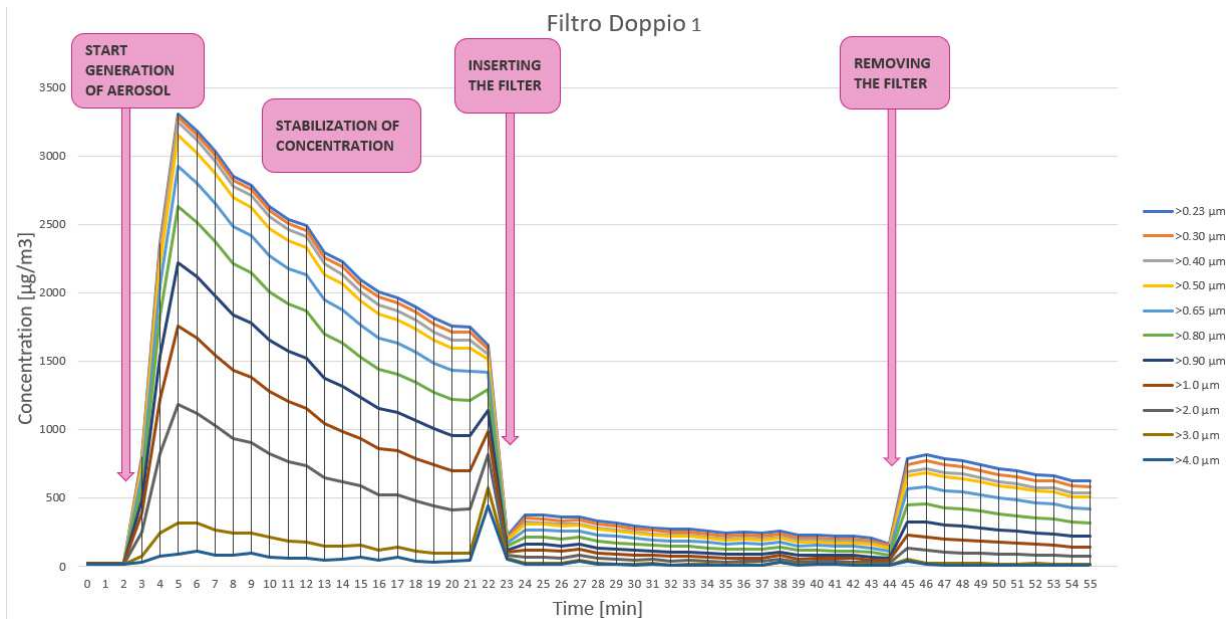


Fig 11. Grafico rappresentativo della prova di efficienza del filtro sperimentale: Filtro Doppio 1

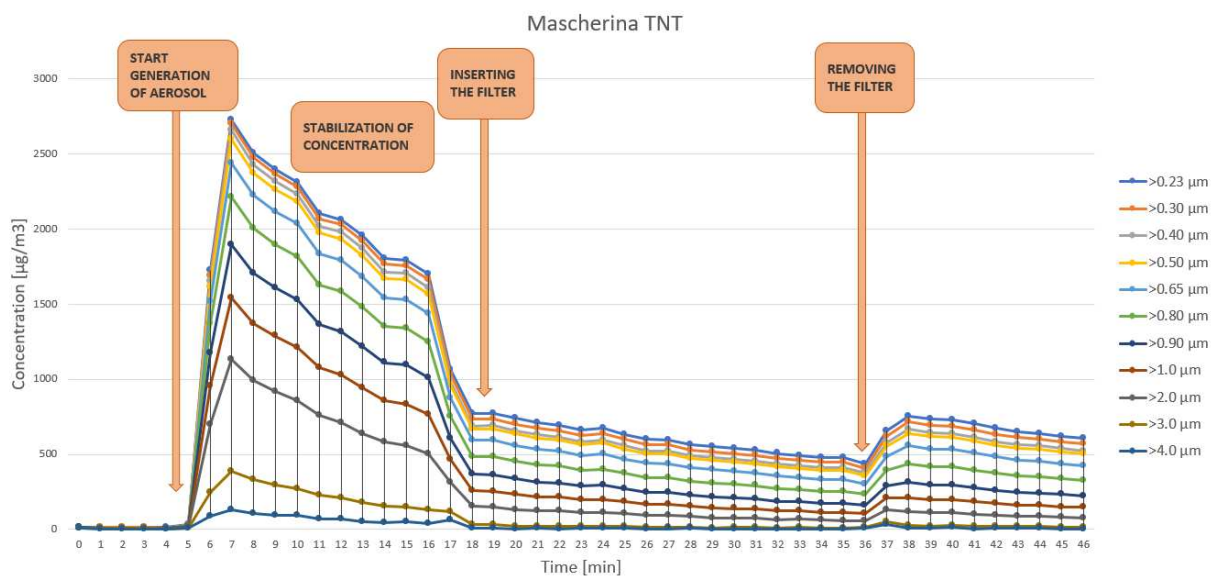


Fig 12. Grafico rappresentativo della prova di efficienza del filtro commerciale: mascherina TNT

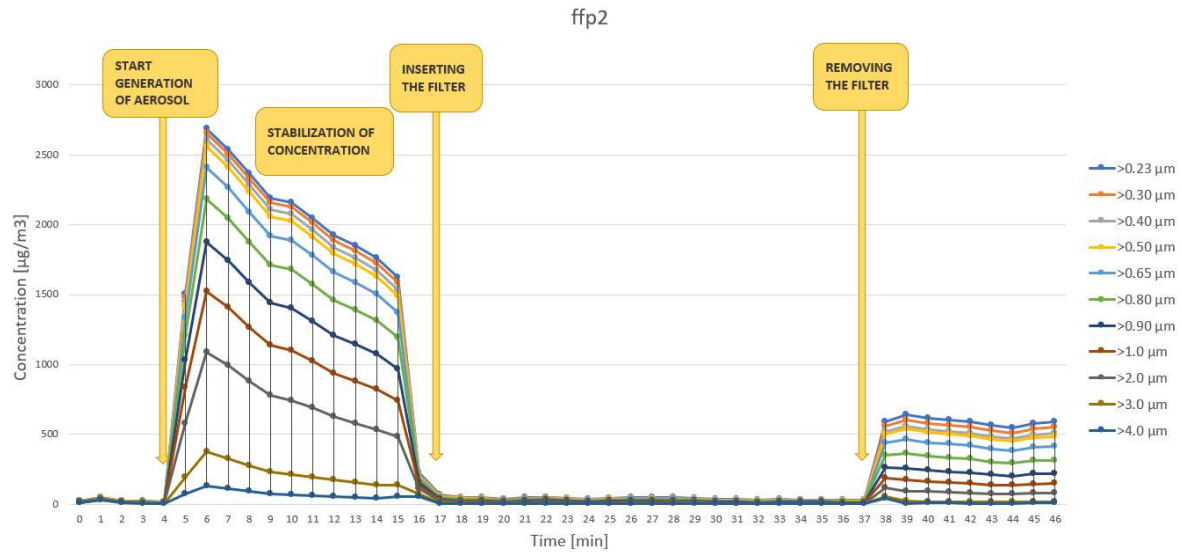


Fig 13. Grafico rappresentativo della prova di efficienza del filtro commerciale: mascherina FFP2

Per ogni filtro si può notare dal grafico che anche se c'è sempre un picco di concentrazione quando è stato inserito il filtro, ognuno di essi si comporta in modo diverso.

C'è una somiglianza tra le prove con i filtri sperimentali (fig. 9, fig. 10, fig. 11), che sono molto efficienti ma non performanti quanto il filtro commerciale FFP2 (fig. 13).

Per poter fare dei paragoni tra i filtri sperimentali e quelli commerciali è necessario misurare la penetrazione e di conseguenza l'efficienza per ognuno di loro.

### 2.6.2. Penetrazione e efficienza

Per valutare l'efficienza dei filtri testati è stata misurata la penetrazione di ogni filtro utilizzando la formula:

$$\text{Penetration (\%)} = \frac{\text{concentrazione prima dell'inserimento del filtro}}{\text{concentrazione dopo l'inserimento del filtro}} * 100\%$$

vel med	>0.23 µm	>0.30 µm	>0.40 µm	>0.50 µm	>0.65 µm	>0.80 µm	>0.90 µm	>1.0 µm	>2.0 µm	>3.0 µm
<b>PENETRATION % FILTRO SINGOLO</b>	28,5	27,7	26,8	26,8	26,1	24,9	23,8	22,9	21,5	25,0
<b>PENETRATION % FILTRO DOPPIO 2</b>	5,2	5,0	4,8	4,8	4,8	4,9	5,2	6,0	7,9	21,1
<b>PENETRATION % FILTRO DOPPIO 1</b>	13,5	12,8	12,1	12,1	11,7	11,1	10,7	10,7	11,1	21,9
<b>PENETRATION % TNT</b>	37,6	36,6	35,4	35,4	34,3	32,4	30,2	27,9	24,6	16,3
<b>PENETRATION % FFP2</b>	3,8	3,7	3,7	3,8	3,9	4,2	4,7	5,7	8,0	31,7

Tab 2. Penetrazione in percentuale per ogni filtro e ogni dimensione delle particelle

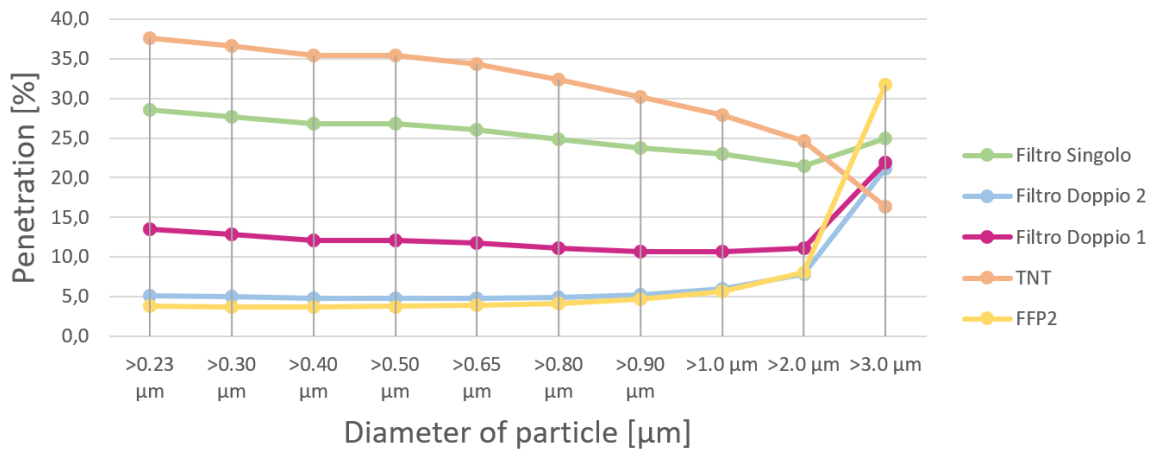


Fig 14. Grafico della penetrazione per ogni filtro e ogni dimensione delle particelle

L'efficienza è stata valutata come:

$$Efficiency(\%) = 100\% - Penetration$$

vel med	>0.23 µm	>0.30 µm	>0.40 µm	>0.50 µm	>0.65 µm	>0.80 µm	>0.90 µm	>1.0 µm	>2.0 µm	>3.0 µm
<b>EFFICIENCY % FILTRO SINGOLO</b>	71,5	72,3	73,2	73,2	73,9	75,1	76,2	77,1	78,5	75,0
<b>EFFICIENCY % FILTRO DOPPIO 2</b>	94,8	95,0	95,2	95,2	95,2	95,1	94,8	94,0	92,1	78,9
<b>EFFICIENCY % FILTRO DOPPIO 1</b>	86,5	87,2	87,9	87,9	88,3	88,9	89,3	89,3	88,9	78,1
<b>EFFICIENCY % TNT</b>	62,4	63,4	64,6	64,6	65,7	67,6	69,8	72,1	75,4	83,7
<b>EFFICIENCY % FFP2</b>	96,2	96,3	96,3	96,2	96,1	95,8	95,3	94,3	92,0	68,3

Tab 3. Efficienza in percentuale per ogni filtro e ogni dimensione delle particelle

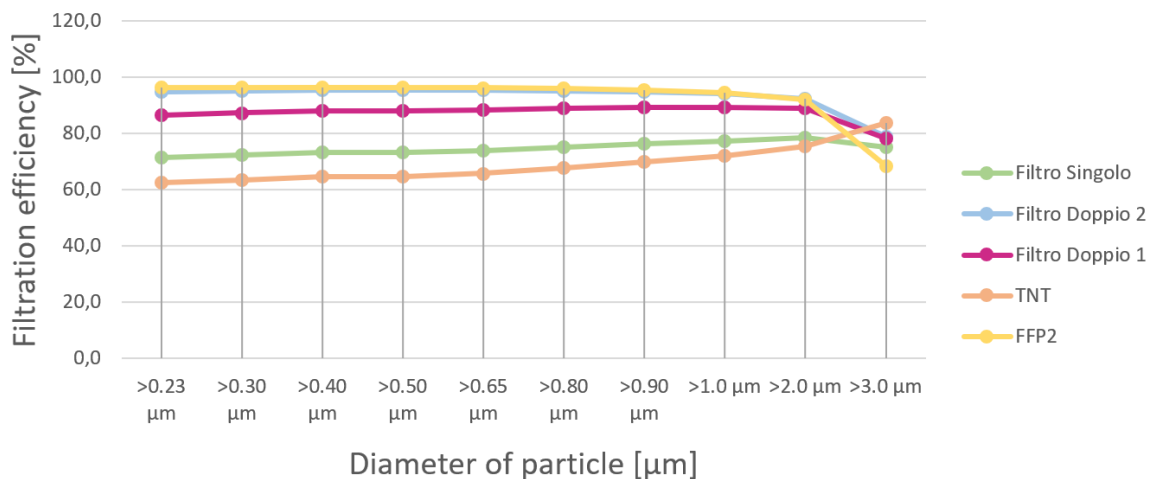


Fig 15. Grafico dell'efficienza per ogni filtro e ogni dimensione delle particelle

### 2.6.3. Variazione dell'efficienza di filtrazione in funzione della velocità

Sono stati messi a confronto anche i comportamenti di ogni filtro con le tre velocità di prova.

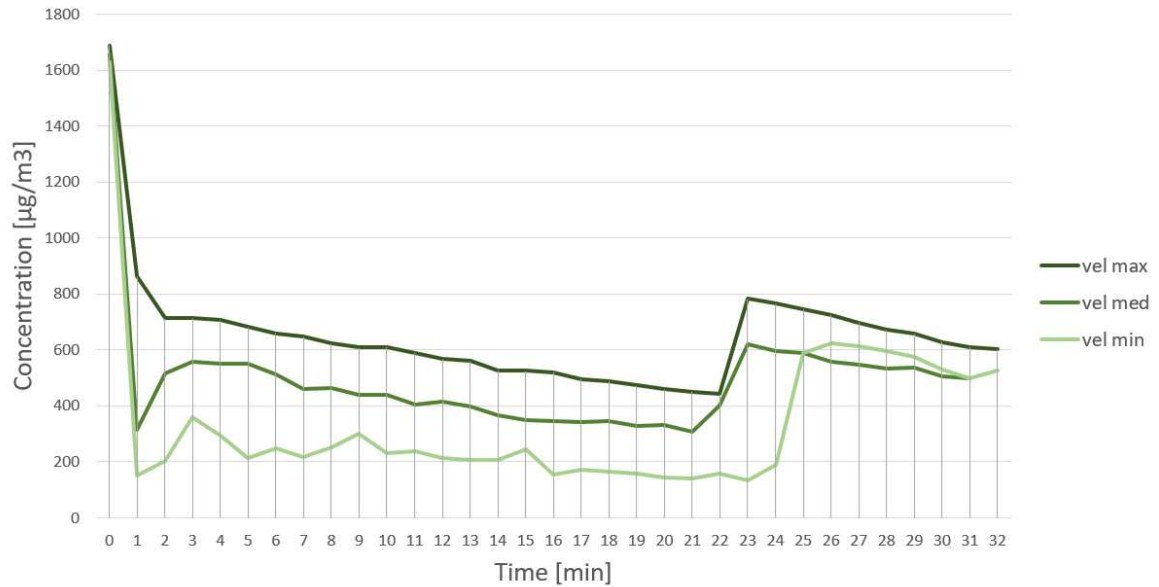


Fig 16. Grafico di confronto tra le velocità di prova con il filtro sperimentale: Filtro Singolo

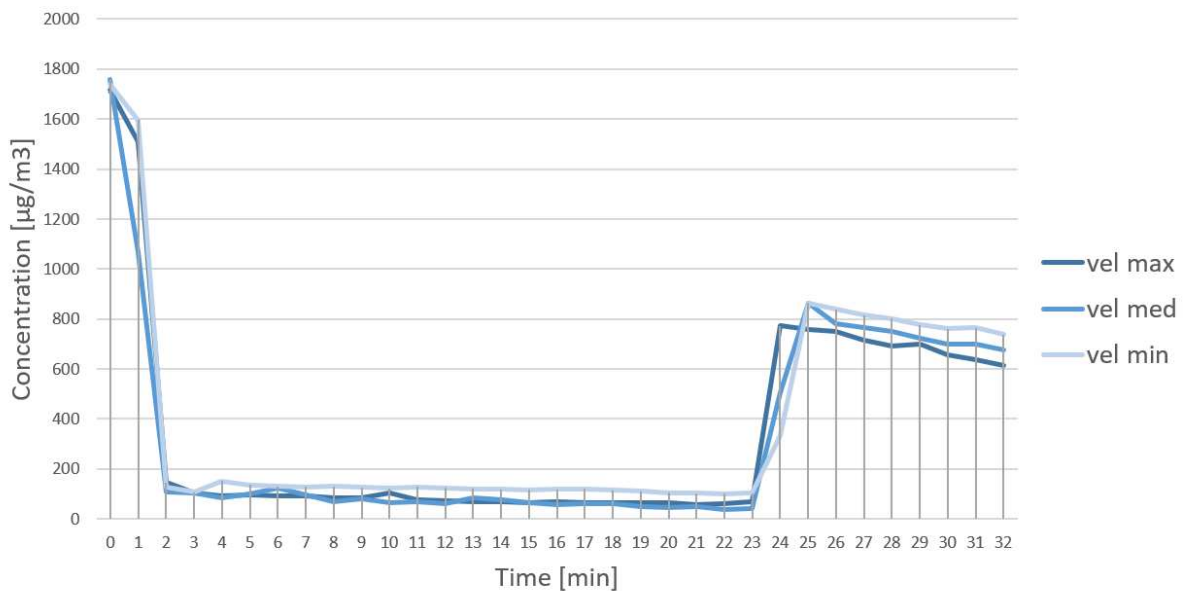


Fig 17. Grafico di confronto tra le varie velocità di prova con il filtro sperimentale: Filtro Doppio 2



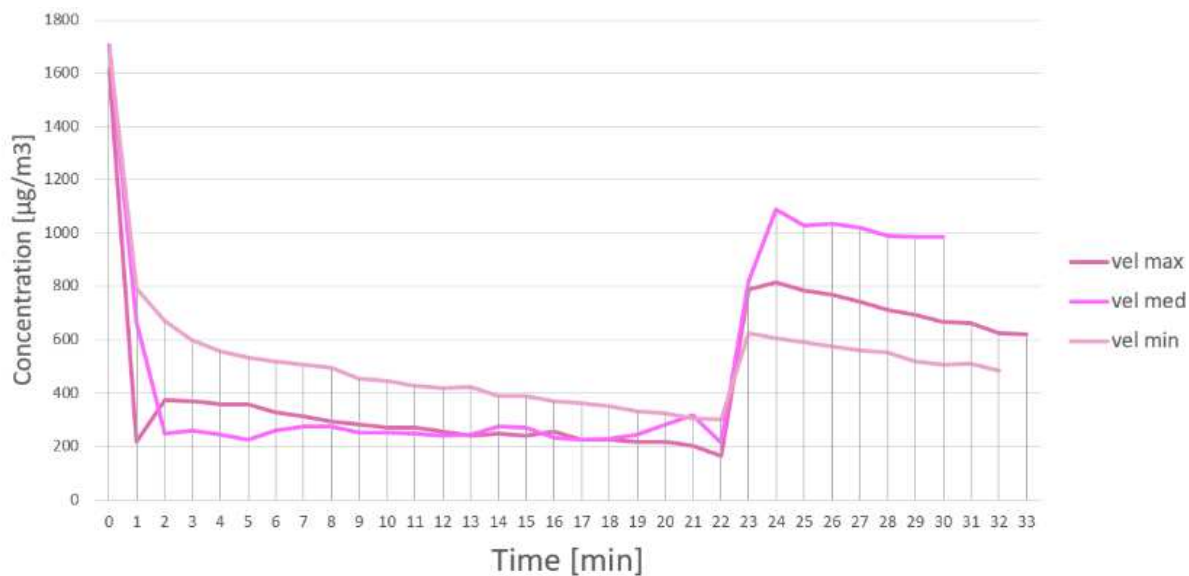


Fig 18. Grafico di confronto tra le varie velocità di prova con il filtro sperimentale: Filtro Doppio 1

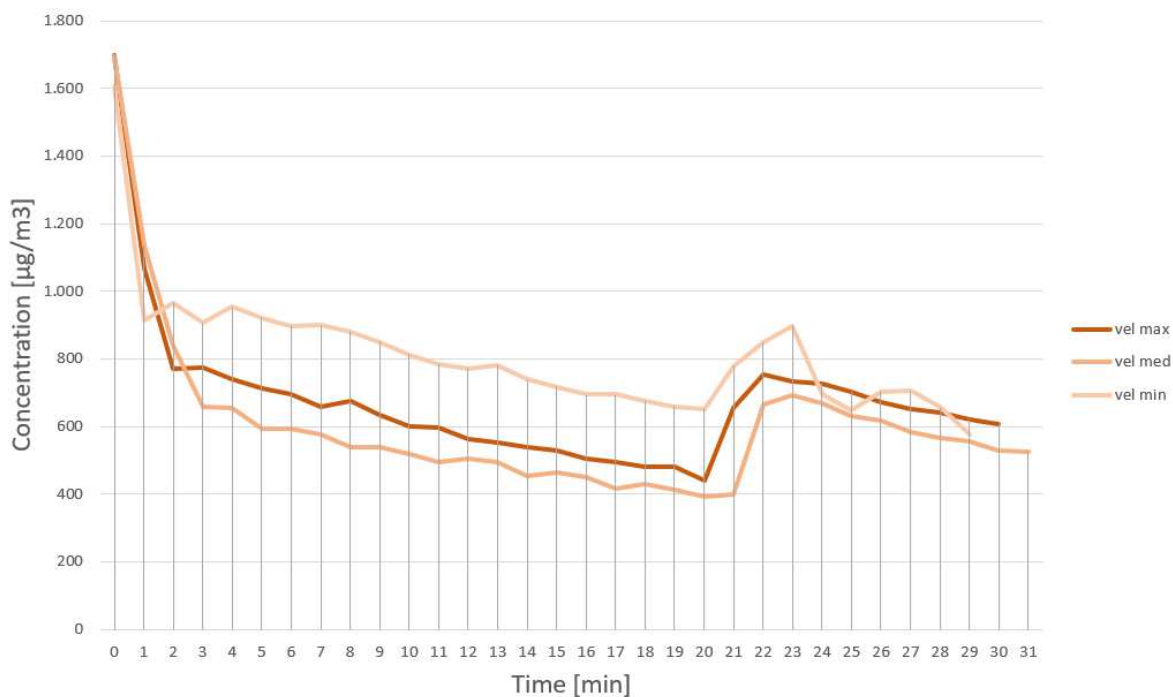


Fig 19. Grafico di confronto tra le varie velocità di prova con il filtro commerciale: mascherina TNT

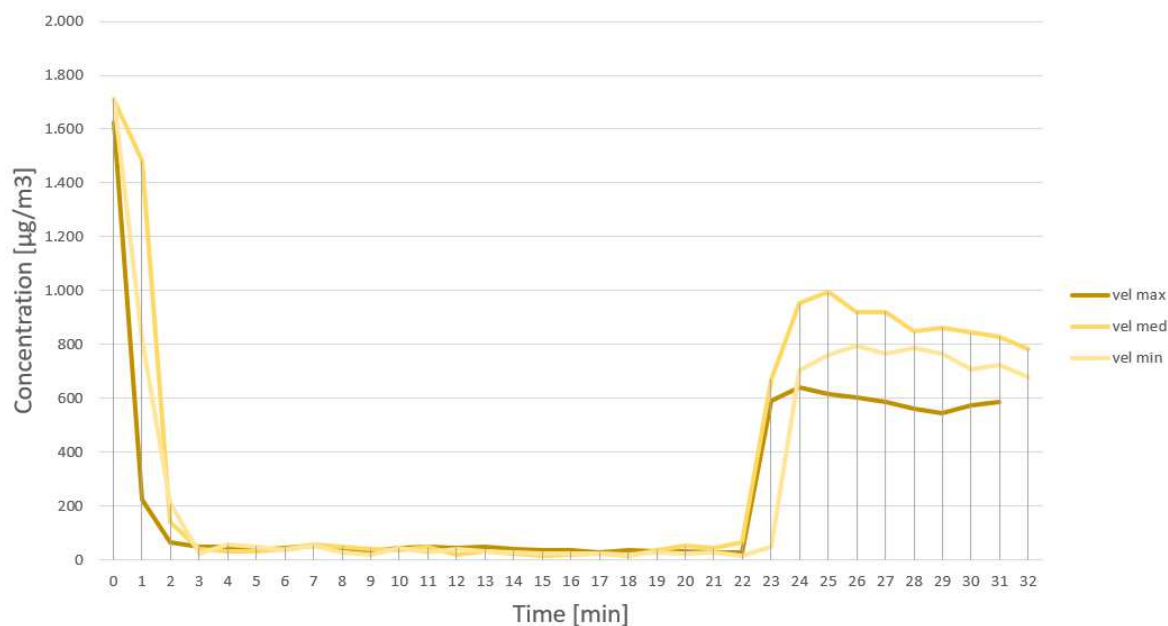


Fig 20. Grafico di confronto tra le varie velocità di prova con il filtro commerciale: mascherina FFP2

#### 2.6.4. Risultati finali

Dai grafici precedenti si può notare che il Filtro Doppio 2 ha la stessa efficienza della mascherina commerciale FFP2; anche il Filtro Doppio 1 ha delle ottime capacità di filtrazione anche se inferiori al Filtro Doppio 2.

Il Filtro Singolo ha una buona efficienza e si può paragonare alla mascherina commerciale in TNT.

I filtri sono stati testati anche a differenti velocità per poter valutare il loro rendimento in base all'utilizzo che ne viene fatto.

Si può notare che il filtro doppio 2 e il filtro doppio 1 non risentono della velocità in quanto la loro efficienza non varia; la stessa cosa si può notare anche nella mascherina commerciale FFP2.

Il filtro singolo, invece, risente della velocità di filtrazione, infatti ha un'efficienza maggiore a basse velocità; anche la mascherina commerciale TNT risente della velocità e funziona meglio alla velocità di prova minima.

## 3. PARTE SPERIMENTALE 2

### 3.1. Descrizione del filtro

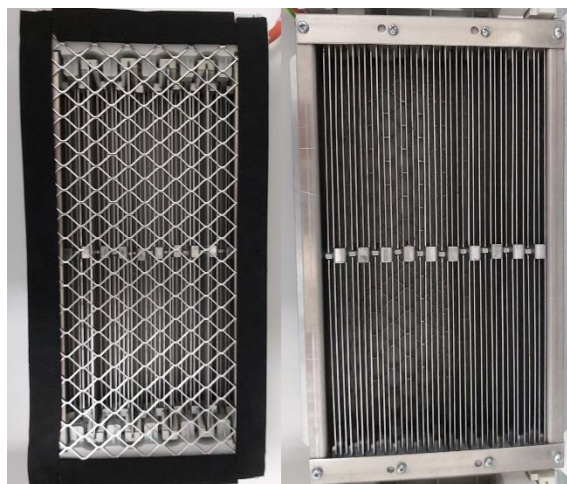
Il filtro preso in esame è stato brevettato dall'azienda "Sabiana" che lo ha denominato:

elettrofiltro Crystall SABIANA a moduli componibili "tipo FEMEC"

Questo nuovo filtro presenta tutte le caratteristiche positive della classica filtrazione elettrostatica, trasformando alcuni aspetti negativi in vantaggi operativi.

Il filtro è formato da due sezioni separate e diverse nella tecnologia costruttiva, che hanno quindi due funzioni diverse.

La prima sezione è denominata "sezione a elementi attivi", mentre la seconda "sezione a elementi passivi".



*Fig 21. Elettrofiltro sabiana: a sinistra la prima sezione, a destra la seconda sezione*

- La prima sezione non è costituita da materiali speciali e costosi e presenta filamenti di tungsteno dove si trovano gli elettrodi di emissione; i componenti attivi sono solidali alla struttura portante dove è inserito il filtro. Tutto ciò garantisce quindi affidabilità e sicurezza.
- La seconda sezione è composta da profili laminati in alluminio contrapposti e distanziati, che generano un campo elettrico senza l'applicazione di alimentazione. Si garantisce così maggiore facilità di manutenzione e pulizia.

Tale tecnologia ha permesso di rendere ogni zona del collettore indipendente, evitando così che un corto circuito accidentale di una sezione possa inficiare il funzionamento dell'intero filtro.

Inoltre, l'azienda produttrice ha prodotto due filtri, uno dei due ha ricevuto un trattamento superficiale ad immersione con una vernice sperimentale che andava a neutralizzare l'ozono.

Si è cercato di trovare una prova ripetibile per entrambi i filtri.

### 3.1.1. Principio di funzionamento

L'elemento filtrante è un elemento essenziale per qualsiasi sistema di ventilazione in quanto fondamentale per la rimozione dei contaminanti aerodispersi, sia chimici che biologici.

Il filtro in esame è stato dimensionato come i filtri meccanici per poter essere inserito in una canalizzazione.

Il principio di funzionamento si basa sull'attraversamento dell'aria tramite i seguenti passaggi:

- L'aria da filtrare passa attraverso un prefiltro meccanico per rendere il flusso d'aria laminare
- Nella prima sezione un campo ionizzante generato da elettrodi polarizza positivamente le particelle
- Nella seconda parte le lamine in alluminio fungono da superfici di raccolta
- All'uscita del filtro si trova aria pulita

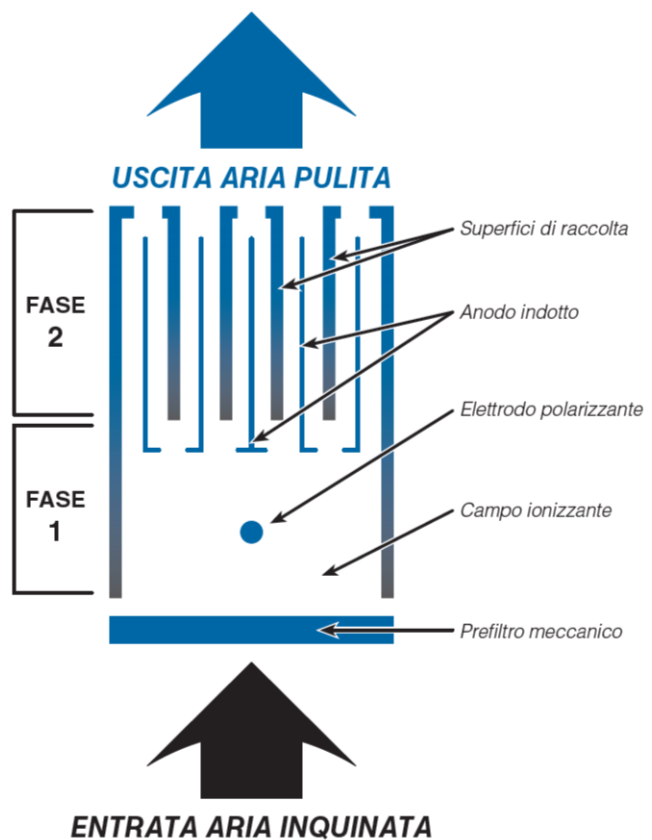


Fig 22. Schema di funzionamento dell'elettrofiltro

### 3.1.2. Alimentazione del filtro

L'apparecchiatura di alimentazione dei filtri è contenuta in un'apposita cassetta in ABS che contiene:

- la scheda elettronica di potenza
- una morsettiera di alimentazione principale 230V + terra
- una morsettiera di servizio per il rimando a distanza dello stato di funzionamento dei filtri
- un interruttore bipolare di accensione e spegnimento
- il collegamento di alta tensione
- un morsetto per il collegamento dell'apparecchiatura alla massa dei filtri



*Fig 23. Collegamento elettrico dell'elettrofiltro*

Il collegamento tra l'apparecchiatura e il filtro è stato effettuato con un cavo speciale adatto per impiego ad alta tensione.

### 3.2. Strumentazione

È stato utilizzato un analizzatore fotometrico a flusso singolo in grado di monitorare la concentrazione di ozono (Ozone monitor, model 450, Advanced Pollution Instrumentation).



*Fig 24. Ozone Monitor per la rilevazione dell'ozono*

La misurazione della concentrazione di ozono è basata sull'assorbimento della radiazione luminosa, avente lunghezza d'onda pari a 254 nm, da parte della molecola di ozono. Il presente modello utilizza una lampada al mercurio tale che la maggior parte della luce emessa abbia lunghezza d'onda simile a quella d'assorbimento dell'ozono.

Nel corpo centrale dell'ozono monitor definita cella d'assorbimento si trova uno scrubber: un filtro che purifica il gas ambientale entrante dall'ozono.

La cella d'assorbimento viene alternatamente riempita di gas ambientale entrante e di gas ambientale uscente (senza ozono).

La concentrazione è ottenuta attraverso il confronto della diversa entità di assorbimento della radiazione ultravioletta fra il campione di gas ambientale e quello "pulito".

Durante il nostro test, il tubo entrante dell'Ozone Monitor è stato inserito dentro la camera di prova, mentre il tubo uscente è stato posizionato all'esterno dell'edificio per non compromettere la concentrazione ambientale di ozono.

### **3.3. Generazione dell'ozono**

Nella normale filtrazione meccanica, i contaminanti trattenuti si accumulano e formano delle vere e proprie colonie; l'operatore che effettua le operazioni di manutenzione deve utilizzare degli accorgimenti per la protezione individuale e dell'ambiente circostante.

Nel processo di filtrazione elettrostatica gli agenti patogeni vengono invece captati, inattivati e trattenuti dall'elettrofiltro.

Il potere germicida del filtro è dovuto all'azione ionizzante con conseguente generazione di ozono.

Poiché l'ozono viene rilasciato in parte all'uscita della canalizzazione in cui è presente il filtro, in questo studio è stata analizzata la concentrazione in uscita, in relazione alle concentrazioni potenzialmente nocive per la salute umana.

### **3.4. Necessità di costruire una camera di prova**

Approcciando per la prima volta a questo genere di prove e in assenza di linee guida e normative in materia, è stato necessario definire una metodologia sperimentale per poter analizzare l'ozono generato. Sono state definite le durate delle prove, le dimensioni, e la configurazione della camera di prova.

### 3.5. Prove batch senza ventilazione



Fig 25. Filtro in azione durante la prova

Nel primo test, la camera di prova era costituita da una cappa chimica in disuso sigillata ermeticamente. All'interno della camera era inserito il filtro da testare, il cavo di collegamento elettrico e il tubo per la rilevazione dell'ozono monitor.

Fuori dalla camera erano presenti:

- l'Ozone monitor per la rilevazione della concentrazione
- il generatore di tensione
- il computer per la rilevazione dei dati
- il tubo in uscita dall'ozono monitor posizionato fuori dalla stanza

#### 3.5.1. Svolgimento della prova

Uno dei due filtri da testare è stato inserito all'interno della camera di prova e la tenuta della camera è stata controllata.

Dopo aver acceso l'ozono monitor e il computer, ha avuto inizio della prova.

L'ozono monitor ha rilevato per cinque minuti la concentrazione di ozono ambientale e dopo questo tempo è stato acceso il generatore e quindi il filtro.

Una volta spento il generatore è stato possibile osservare un immediato decadimento dell'ozono che ritornava ossigeno molecolare ( $O_2$ ), la sua forma stabile.

In questo tipo di prova inizialmente la generazione dell'ozono aveva una durata di 30 minuti, poi è stata fatta anche una generazione di 90 minuti.

Le prove con una generazione di 90 minuti hanno avuto una durata complessiva di due ore e trenta minuti, perché si è voluto individuare il momento in cui l'ozono raggiunge una concentrazione stabile.

Inoltre se la prova funziona, dai grafici si dovrebbe vedere un'omogeneità tra le curve di ogni prova.

### 3.5.2. Risultati

Inizialmente sono state fatte con una generazione di 30 minuti:

- due prove con il filtro non trattato
- cinque con il filtro trattato

Con la generazione lunga di 90 minuti è stata fatta una prova per ogni filtro.

NUMERO DELLA PROVA	TIPO DI FILTRO	TEMPO DI GENERAZIONE (minuti)	CONCENTRAZIONE MASSIMA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1	Non trattato	30	1259,3
2	Non trattato	30	1148,7
3	Non trattato	90	1558,8
1	Trattato	30	622,9
2	Trattato	30	439,8
3	Trattato	30	1077,4
4	Trattato	30	1418,0
5	Trattato	30	876,0
6	Trattato	90	1286,2

Tab 4. Tabella riassuntiva delle concentrazioni massime di ozono generato dall'elettrofiltro per le prove Batch senza ventilazione

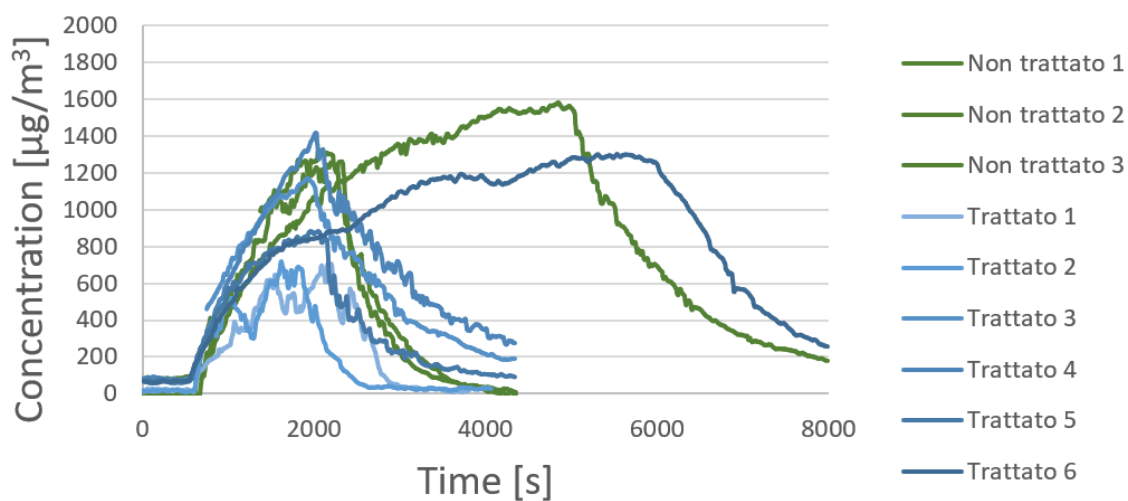


Fig 26. Grafico della generazione dell'ozono per le prove Batch senza ventilazione



Nella tab. 4 si può notare che la concentrazione dell'ozono aumenta in base al tempo di generazione. Inoltre, mettendo a paragone delle prove fatte allo stesso modo, la concentrazione massima è molto differente.

Visivamente in fig. 26 è ancora più chiaro che l'esito delle prove è risultato molto diverso.

### **3.6. Prove batch**

Vista l'irripetibilità delle prove precedenti, si è deciso di modificare la camera di prova.

È stato aggiunto un ventilatore per aiutare il filtro a trattare tutta l'aria presente nella camera.

#### ***3.6.1. Svolgimento della prova e risultati***

All'inizio si accende il ventilatore e successivamente la prova si svolge come la precedente.

La generazione dell'ozono è stata mantenuta a 90 minuti per poi essere diminuita a 35 minuti.

Sono state fatte con una generazione di 90 minuti:

- quattro prove con il filtro non trattato
- tre con il filtro trattato

Con la generazione di 35 minuti sono state fatte:

- quattro prove con il filtro non trattato
- cinque prove con il filtro trattato.

Con l'inserimento della ventilazione la concentrazione di ozono è aumentata notevolmente e si è notato dai grafici di ogni prova che la concentrazione dopo 35 minuti rimaneva stabile.

Avendo trovato il “plateau” della prova, si è deciso di bloccare la generazione nel momento in cui l'ozono si stabilizzava.

NUMERO DELLA PROVA	TIPO DI FILTRO	TEMPO DI GENERAZIONE (minuti)	CONCENTRAZIONE MASSIMA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
4	Non trattato	90	4455,6
5	Non trattato	90	3649,4
6	Non trattato	90	2552,7
7	Non trattato	90	2480,3
8	Non trattato	35	4744,0
9	Non trattato	35	4604,9
10	Non trattato	35	3833,5
11	Non trattato	35	3678,8
7	Trattato	90	3601,6
8	Trattato	90	3802,2
9	Trattato	90	3445,1
10	Trattato	35	4445,1
11	Trattato	35	3282,3
12	Trattato	35	3848,3
13	Trattato	35	3374,0
14	Trattato	35	3918,2

*Tab 5. Tabella riassuntiva delle concentrazioni massime di ozono generato dall'elettrofiltro per le prove Batch con ventilazione*

In tab. 5 si può notare che la concentrazione massima è molto diversa tra le varie prove e grazie alle fig. 27 e fig. 28 è evidente che non c'è una ripetibilità tra le prove.

Inoltre, mettendo a paragone le prove fatte nello stesso giorno si può notare in fig. 29 una similarità tra di esse e si può anche notare che la generazione di ozono del filtro trattato è minore di quella del filtro non trattato.

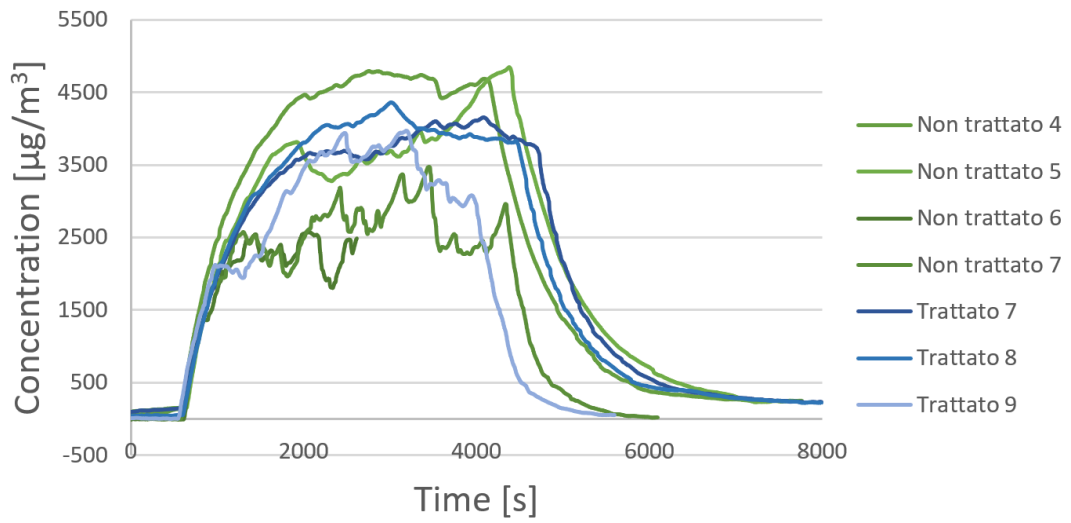


Fig 27. Grafico della generazione dell'ozono per le prove Batch con ventilazione e tempo di generazione di 90 minuti

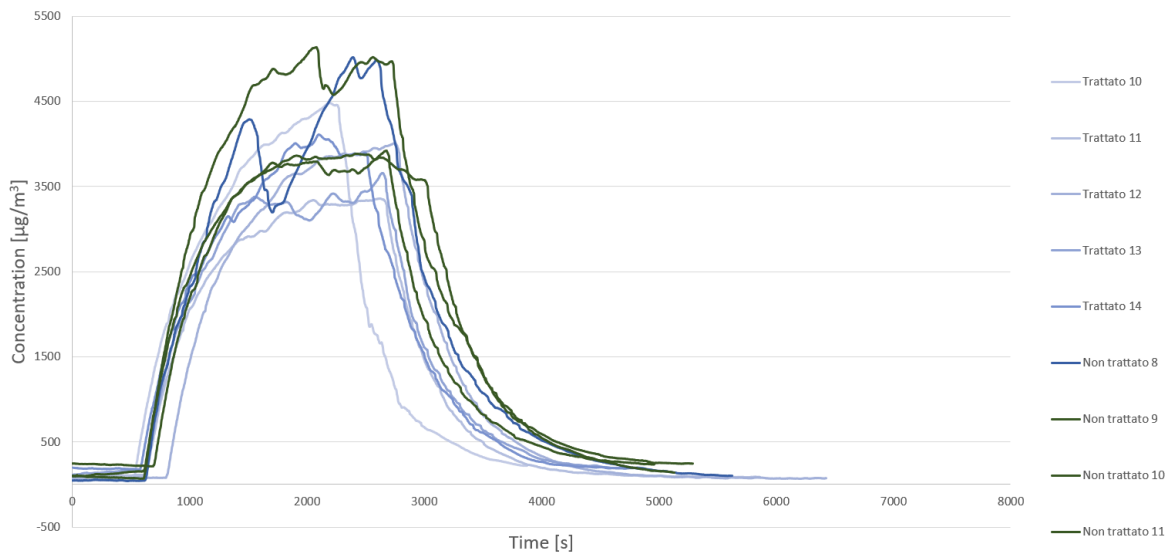


Fig 28. Grafico della generazione dell'ozono per le prove Batch con ventilazione e tempo di generazione di 35 minuti

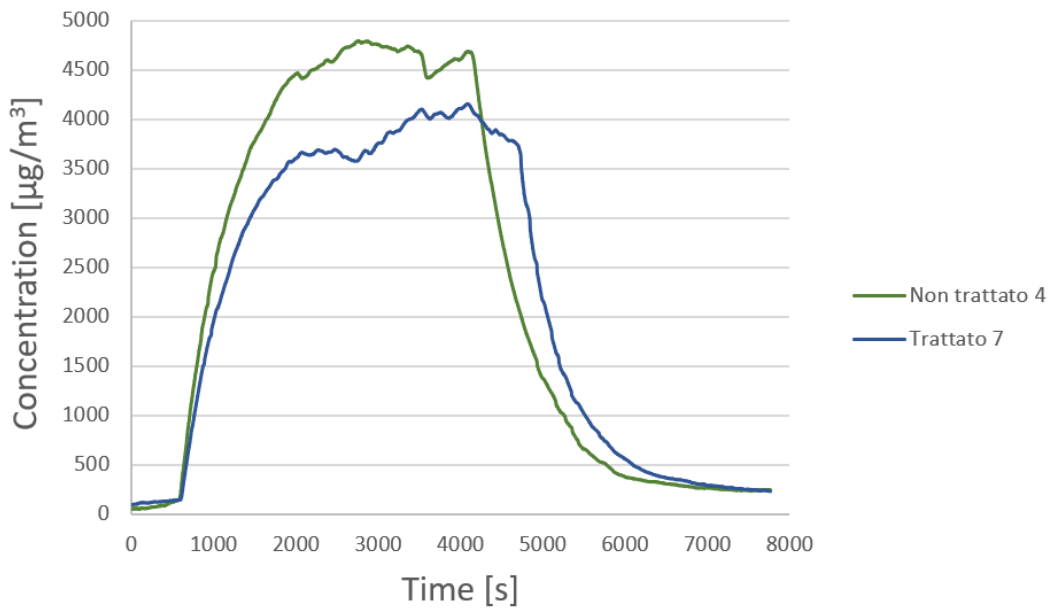


Fig 29. Grafico della generazione dell'ozono in un'unica giornata per le prove Batch con ventilazione e tempo di generazione di 35 minuti

### 3.7. Prove batch con ventilazione dopo la sigillatura della camera

Viste le prove precedenti, si è deciso di verificare se la differenza tra le prove fosse dovuta a un isolamento non perfetto della camera di prova.

Si è provveduto a una chiusura più attenta della camera per poi ripetere altre prove come le precedenti e verificare con un gas inerte la tenuta della camera.

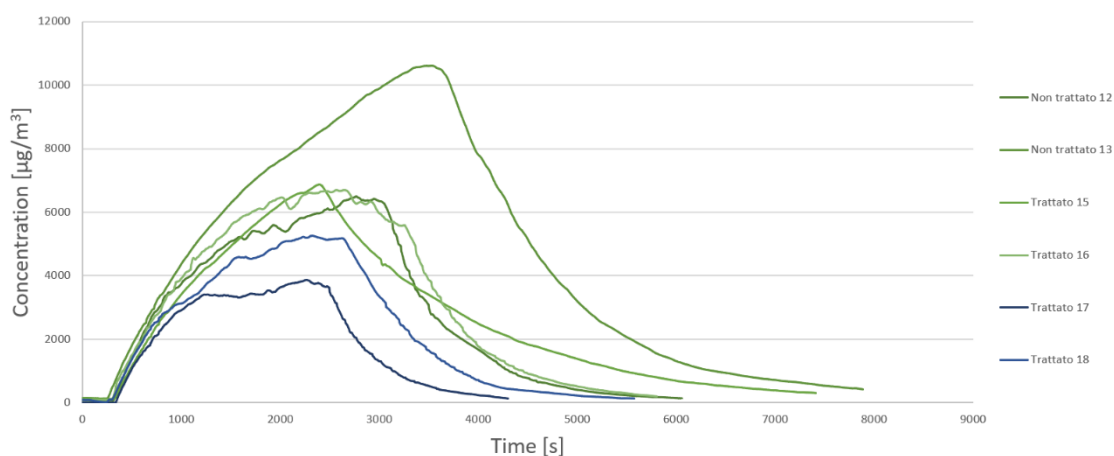
#### 3.7.1. Svolgimento della prova e risultati

Con lo stesso procedimento delle prove precedenti sono state eseguite:

- due prove con il filtro non trattato
- quattro prove con il filtro trattato

NUMERO DELLA PROVA	TIPO DI FILTRO	TEMPO DI GENERAZIONE (minuti)	CONCENTRAZIONE MASSIMA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
12	Non trattato	35	6464,5
13	Non trattato	35	10594,0
15	Trattato	35	6597,4
16	Trattato	35	6473,9
17	Trattato	35	3827,5
18	Trattato	35	5192,9

*Tab 6. Tabella riassuntiva delle concentrazioni massime di ozono generato dall'elettrofiltro per le prove Batch con ventilazione dopo la sigillatura*



*Fig 30. Grafico della generazione dell'ozono per le prove Batch con ventilazione e tempo di generazione di 35 minuti dopo aver sigillato la camera*

Con la miglior sigillatura della camera si vede in tab. 6 che la concentrazione è aumentata, ma mettendo a confronto le varie curve in un grafico come in fig. 30 si può notare che:

- l'andamento della concentrazione sembra più costante
- le prove tra loro sembrano più simili
- C'è una differenza di concentrazione tra il filtro trattato e quello non trattato

### ***3.7.2. Prova batch con gas inerte e risultati***

Per verificare le perdite della camera è stata fatta una prova con un gas: il bromotrifluorometano o halon-1301.

È stato scelto questo gas poiché non reagisce quasi con nessun materiale, tanto da poter essere definito inerte. Solitamente viene utilizzato come gas estinguente per gli estintori.

Viste le sue qualità, inserendolo all'interno della camera di prova, la sua concentrazione rimarrà stabile. Se la camera non fosse sigillata ermeticamente, il gas dovrebbe fuoriuscire da essa e la concentrazione del gas all'interno diminuirebbe.

Lo scopo del seguente test è quello di vedere, con strumentazione adeguata, se c'è una differenza di concentrazione del gas dopo averlo inserito nella camera di prova.

Per la strumentazione è stato scelto il rilevatore a fotoionizzazione PID (*Photo Ionisation Detector*) che è in grado di rilevare anche basse concentrazioni di composti organici volatili.

Con questa prova è stato evidente che la camera aveva delle perdite e che era necessario creare una nuova camera di prova.

## **3.8. Realizzazione di una nuova camera di prova**

Valutando la non ripetibilità delle prove e visto che le reali condizioni di attività del filtro sono all'interno di impianti di climatizzazione, si è deciso di trasformare la configurazione della prova da Batch a Plug Flow.

Non avendo a disposizione una canalizzazione, è stata costruito un piccolo condotto per meglio replicare le condizioni reali.

Come materiale di costruzione è stato scelto il legno che è stato poi rivestito con fogli di alluminio, in quanto l'alluminio ha una buona compatibilità con l'ozono.

Le dimensioni del box sono di 61 centimetri di altezza e 32,5 centimetri di larghezza per essere solidale alla grandezza dei filtri presi in esame.

La lunghezza, invece, è stata fissata a 102 centimetri per poter garantire una corretta rilevazione dell'ozono prodotto.

Nel lato opposto al filtro è presente una ventola radiale con portata regolabile rilasciata dalla ditta produttrice del filtro con una rete metallica di protezione realizzata su misura.



*Fig 31. Ventola radiale inserita a un lato del box*



*Fig 32. A sinistra vista frontale del filtro all'interno del box prima del rivestimento, a destra vista dall'alto del box dopo il rivestimento*

## 4. CONCLUSIONI

Lo scopo della prima parte di questo elaborato è stato quello di valutare l'efficienza di nuove mascherine biodegradabili realizzate con il processo di elettrofilatura paragonandole con quelle già disponibili in commercio.

Dalle prove si può notare che i filtri sperimentali realizzati sovrapponendo due strati di fibra elettrofilata in PLA (fig. 10 e fig. 11) hanno la stessa efficienza della mascherina commerciale FFP2; tra questi due filtri sperimentali il migliore per le prove di efficienza è quello denominato "Filtro Doppio 2".

Inoltre, ognuno di loro garantisce la stessa efficienza di filtrazione anche a velocità differenti.

L'altro filtro sperimentale realizzato con un singolo strato di fibra elettrofilata in PLA (fig. 9) ha una buona efficienza e si può paragonare alla mascherina commerciale in TNT.

Quest'ultimo filtro sperimentale, invece, risente della velocità di filtrazione; infatti, ha un'efficienza maggiore a basse velocità. Anche la mascherina commerciale TNT risente della velocità e funziona meglio alla velocità di prova minima.

In conclusione, dalle prove fatte, si può affermare che le mascherine prodotte per elettrofilatura da una fonte rinnovabile come l'acido polilattico (PLA) sono paragonabili per efficienza di filtrazione a quelle attualmente in commercio prodotte da una fonte fossile quale il petrolio.

Esse rappresentano per tanto una valida soluzione a minor impatto ambientale.

Per il futuro si potrebbero fare delle prove sulla caduta di pressione, sulla loro vestibilità e sulla tollerabilità della pelle a contatto.

Per quanto riguarda la seconda parte di questo elaborato si è cercato un modo per poter valutare la quantità di ozono generata dagli elettrofiltri.

Sono stati fatti vari test per ogni camera di prova che hanno portato a realizzare l'ultima camera definitiva.

In futuro, utilizzando la camera sperimentale descritta nel presente elaborato, potrà essere testata la concentrazione di ozono generata dall'elettrofiltro preso in esame.

Inoltre, essendo le prove effettuate ripetibili solo all'interno della stessa giornata, si potrebbe verificare se queste prove vengono influenzate da fattori ambientali esterni come umidità e concentrazione di ozono ambientale.



## BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- Barhate, R. S., & Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of membrane science*, 296(1-2), 1-8.
- Chattopadhyay, S., Hatton, T. A., & Rutledge, G. C. (2016). Aerosol filtration using electrospun cellulose acetate fibers. *Journal of materials science*, 51, 204-217.
- Dutton, K. C. (2009). Overview and analysis of the meltblown process and parameters. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 6(1).
- Gözke, G., & Posten, C. (2010). Electrofiltration of biopolymers. *Food Engineering Reviews*, 2, 131-146.
- Hung, C. H., & Leung, W. W. F. (2011). Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and purification technology*, 79(1), 34-42.
- Pierpaoli, M., Giosuè, C., Czerwińska, N., Ryciewicz, M., Wieloszyńska, A., Bogdanowicz, R., & Ruello, M. L. (2021). "Characterization and filtration efficiency of sustainable PLA fibers obtained via a hybrid 3D-printed/electrospinning technique." ("(PDF) Characterization and Filtration Efficiency of Sustainable PLA ...") *Materials*, 14(22), 6766.
- Qin, X., & Subianto, S. (2017). Electrospun nanofibers for filtration applications. In *Electrospun Nanofibers* (pp. 449-466). Woodhead Publishing.
- Salonen, H., Salthammer, T., & Morawska, L. (2018). Human exposure to ozone in school and office indoor environments. *Environment international*, 119, 503-514.
- UNI EN 14683:2019
- UNI EN 149:2009
- [450.pdf \(oxidationtech.com\): https://www.oxidationtech.com/downloads/manuals/API-450-Brochure.pdf](https://www.oxidationtech.com/downloads/manuals/API-450-Brochure.pdf) (Consultato il 21/11/23)
- <https://amof.ac.uk/instruments/grimm-optical-particle-counter-1-108> (Consultato il 21/11/23)
- <https://www.sabiana.it/it/indoor-air-quality> (Consultato il 21/11/23)
- [https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2\\_4.jsp?lingua=italiano&tema=Ambiente%20e%20salute&area=indor](https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_4.jsp?lingua=italiano&tema=Ambiente%20e%20salute&area=indor) (Consultato il 21/11/23)
- <https://www.schede-tecniche.it/schede-tecniche-UTA/SABIANA-scheda-tecnica-UTA-VULCAN-PRO-CRYSTAL.pdf> (Consultato il 21/11/23)
- <https://www.crowcon.com/it/pid-technology> (Consultato il 21/11/2023)

## INDICE DELLE TABELLE

TAB 1.VELOCITÀ, VOLTAGGIO E PORTATA DELLE VENTOLE NELLE TRE PROVE EFFETTUATE.....	13
TAB 2.PENETRAZIONE IN PERCENTUALE PER OGNI FILTRO E OGNI DIMENSIONE DELLE PARTICELLE .....	18
TAB 3.EFFICIENZA IN PERCENTUALE PER OGNI FILTRO E OGNI DIMENSIONE DELLE PARTICELLE .....	19
TAB 4.TABELLA RIASSUNTIVA DELLE CONCENTRAZIONI MASSIME DI OZONO GENERATO DALL'ELETTROFILTRO PER LE PROVE BATCH SENZA VENTILAZIONE .....	28
TAB 5.TABELLA RIASSUNTIVA DELLE CONCENTRAZIONI MASSIME DI OZONO GENERATO DALL'ELETTROFILTRO PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE .....	30
TAB 6.TABELLA RIASSUNTIVA DELLE CONCENTRAZIONI MASSIME DI OZONO GENERATO DALL'ELETTROFILTRO PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE DOPO LA SIGILLATURA .....	33

## INDICE DELLE FIGURE

FIG 1. DIMENSIONE DELLE PARTICELLE NEI VARI MECCANISMI DI INTERAZIONE .....	3
FIG 2. REAZIONE DI FORMAZIONE DELL'OZONO .....	7
FIG 3. A SINISTRA FILTRO IN PLA UTILIZZATO NELLO STUDIO. A DESTRA, VISTA AL MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (SEM) DELLO STESSO. ....	9
FIG 4. STRUMENTAZIONE PER LA CONCENTRAZIONE DEL PARTICOLATO .....	10
FIG 5. INTERNO DELLA CAMERA.....	11
FIG 6. USCITA DELLA CAMERA DI PROVA A FORMA DI TUBO CILINDRICO .....	11
FIG 7. ESEMPIO DI GRAFICO DELLE PROVE DI EFFICIENZA DI FILTRAZIONE .....	14
FIG 8. GRAFICO DEL BLANK TEST DELLE PROVE DI EFFICIENZA DI FILTRAZIONE.....	15
FIG 9. GRAFICO RAPPRESENTATIVO DELLA PROVA DI EFFICIENZA DEL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO SINGOLO	16
FIG 10.GRAFICO RAPPRESENTATIVO DELLA PROVA DI EFFICIENZA DEL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO DOPPIO 2 .....	16
FIG 11.GRAFICO RAPPRESENTATIVO DELLA PROVA DI EFFICIENZA DEL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO DOPPIO 1 .....	17
FIG 12.GRAFICO RAPPRESENTATIVO DELLA PROVA DI EFFICIENZA DEL FILTRO COMMERCIALE: MASCHERINA TNT .....	17
FIG 13.GRAFICO RAPPRESENTATIVO DELLA PROVA DI EFFICIENZA DEL FILTRO COMMERCIALE: MASCHERINA FFP2.....	18
FIG 14.GRAFICO DELLA PENETRAZIONE PER OGNI FILTRO E OGNI DIMENSIONE DELLE PARTICELLE .....	19
FIG 15.GRAFICO DELL'EFFICIENZA PER OGNI FILTRO E OGNI DIMENSIONE DELLE PARTICELLE .....	19
FIG 16.GRAFICO DI CONFRONTO TRA LE VELOCITÀ DI PROVA CON IL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO SINGOLO	20
FIG 17.GRAFICO DI CONFRONTO TRA LE VARIE VELOCITÀ DI PROVA CON IL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO DOPPIO 2 .....	20

FIG 18.GRAFICO DI CONFRONTO TRA LE VARIE VELOCITÀ DI PROVA CON IL FILTRO SPERIMENTALE: FILTRO DOPPIO 1 .....	21
FIG 19.GRAFICO DI CONFRONTO TRA LE VARIE VELOCITÀ DI PROVA CON IL FILTRO COMMERCIALE: MASCHERINA TNT .....	21
FIG 20.GRAFICO DI CONFRONTO TRA LE VARIE VELOCITÀ DI PROVA CON IL FILTRO COMMERCIALE: MASCHERINA FFP2.....	22
FIG 21.ELETTROFILTRO SABIANA: A SINISTRA LA PRIMA SEZIONE, A DESTRA LA SECONDA SEZIONE .....	23
FIG 22.SHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'ELETTROFILTRO .....	24
FIG 23.COLLEGAMENTO ELETTRICO DELL'ELETTROFILTRO.....	25
FIG 24.OZONO MONITOR PER LA RILEVAZIONE DELL'OZONO .....	25
FIG 25.FILTRO IN AZIONE DURANTE LA PROVA .....	27
FIG 26.GRAFICO DELLA GENERAZIONE DELL'OZONO PER LE PROVE BATCH SENZA VENTILAZIONE .....	28
FIG 27.GRAFICO DELLA GENERAZIONE DELL'OZONO PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE E TEMPO DI GENERAZIONE DI 90 MINUTI .....	31
FIG 28.GRAFICO DELLA GENERAZIONE DELL'OZONO PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE E TEMPO DI GENERAZIONE DI 35 MINUTI .....	31
FIG 29.GRAFICO DELLA GENERAZIONE DELL'OZONO IN UN'UNICA GIORNATA PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE E TEMPO DI GENERAZIONE DI 35 MINUTI .....	32
FIG 30.GRAFICO DELLA GENERAZIONE DELL'OZONO PER LE PROVE BATCH CON VENTILAZIONE E TEMPO DI GENERAZIONE DI 35 MINUTI DOPO AVER SIGILLATO LA CAMERA .....	33
FIG 31.VENTOLA RADIALE INSERITA A UN LATO DEL BOX .....	35
FIG 32.A SINISTRA VISTA FRONTALE DEL FILTRO ALL'INTERNO DEL BOX PRIMA DEL RIVESTIMENTO, A DESTRA VISTA DALL'ALTO DEL BOX DOPO IL RIVESTIMENTO.....	35