



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**STUDIO DI UN NUOVO SISTEMA DI PROVA PER LA  
CARATTERIZZAZIONE DI SISTEMI FILTRANTI PER LA  
SALUBRITÀ DELL'ARIA INTERNA**

**STUDY OF A NEW TEST SYSTEM FOR THE  
CHARACTERIZATION OF FILTERING DEVICES FOR  
THE HEALTHINESS OF INDOOR AIR**

Relatore: Chiar.ma

**Prof.ssa Ruello Maria**

**Letizia**

Tesi di Laurea di:

**Nicolai Elisa**

Correlatore: Chiar.ma

**Ing. Giosuè Chiara**

A.A. 2020/2021

# Sommario

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>2</b>
<b>1 FILTRAZIONE ELETTROSTATICA DELL'ARIA INDOOR.....</b>	<b>3</b>
1.1. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO .....	3
1.2. GENERALITÀ SULL'ELETTROFILTRO .....	6
<b>2 OZONO .....</b>	<b>9</b>
2.1. LEGISLAZIONE E NORMATIVE .....	10
2.3. L'EFFETTO CORONA .....	13
2.4. FATTORI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI OZONO .....	14
<b>3 DESCRIZIONE DEL FILTRO .....</b>	<b>15</b>
3.1. GENERALITÀ SUL FILTRO PRESO IN ESAME.....	15
3.2. COLLEGAMENTI ELETTRICI .....	17
<b>4 PROVE DI LABORATORIO .....</b>	<b>18</b>
4.1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA: OZONE MONITOR .....	18
4.1.1. <i>Principio di funzionamento</i> .....	18
4.2. PROVE STATICHE (O BATCH) .....	19
4.2.1. <i>Preparazione e descrizione della prova</i> .....	21
4.2.2. <i>Risultati ottenuti</i> .....	24
4.2.3. <i>Considerazioni finali</i> .....	25
4.3. PROVE DINAMICHE (PLUG-FLOW) .....	26
4.3.1. <i>Realizzazione della canalizzazione</i> .....	28
4.3.2. <i>Preparazione e descrizione delle prove</i> .....	34
4.3.3. <i>Risultati ottenuti</i> .....	38
4.3.3.1. Risultati prove a breve termine e considerazioni .....	38
4.3.3.2. Risultati prove a lungo termine e considerazioni .....	48
<b>5 CONCLUSIONI .....</b>	<b>58</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>60</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE .....</b>	<b>61</b>
<b>SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>62</b>
<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>64</b>

## Introduzione

Il seguente elaborato tratta uno studio sul problema della produzione di ozono da parte di elettrofiltri, ad oggi utilizzati in ambito sia industriale che civile, per la depurazione dell'aria indoor.

Tutti siamo consapevoli, e ci preoccupiamo, dello scarso livello di qualità dell'aria esterna e molti ritengono di essere più al sicuro all'interno degli edifici. Bisogna tuttavia ricordarsi che le persone trascorrono in media il 90% del loro tempo negli ambienti confinati, quali abitazioni, uffici, centri commerciali, cinema, teatri, ecc., dove le condizioni di salubrità degli ambienti confinati rischiano di essere peggiori di quelle esterne.

Il requisito relativo alla purezza dell'aria che respiriamo all'interno degli ambienti dove viviamo e lavoriamo è diventato sempre più sentito in virtù della maggiore consapevolezza dell'importanza della qualità dell'aria interna nel garantire condizioni di salute e benessere.

Negli edifici civili l'inquinamento indoor dipende essenzialmente dalla presenza di persone e dal rilascio di particelle volatili da parte dei materiali da costruzione e da arredo. Per effetto dei processi fisiologici (respirazione, traspirazione, sudorazione) gli occupanti di un ambiente immettono nell'aria vapore d'acqua, prodotti aromatici, anidride carbonica, virus, batteri, fumo da tabacco (dove consentito). Tali inquinanti, insieme ai prodotti volatili rilasciati da arredi e materiali, devono essere eliminati attraverso l'immissione di aria pulita.

Pertanto, per ottenere il livello ottimale di qualità dell'aria indoor, risulta fondamentale provvedere, oltre a un adeguato ricambio dell'aria viziata, anche ad una corretta filtrazione in modo da ridurre gli inquinanti nell'aria interna. In quest'ottica i sistemi filtranti utilizzati dagli impianti di climatizzazione e ventilazione giocano un ruolo fondamentale e devono quindi essere scelti e dimensionati con grande attenzione, tenendo conto sia delle più recenti normative sia delle più avanzate tecnologie disponibili.

In questa ottica, la trattazione si incentra sul funzionamento degli elettrofiltri per poi arrivare ad una particolarità (SABIANA S.p.A.) con il conseguente problema dell'ozono, come gas inquinante, prodotto da quest'ultimo.

Si analizzano in seguito prove batch e plug-flow eseguite nei laboratori del dipartimento SIMAU (UNIVPM) con opportune considerazioni sulla canalizzazione realizzata.

# 1 Filtrazione elettrostatica dell'aria indoor

Nota da oltre un secolo, la filtrazione elettrostatica è utilizzata in impianti industriali e civili per depurare l'aria.

Il principio di funzionamento, che prevede l'alimentazione di elettrodi con tensioni sufficientemente alte da ionizzare l'aria per effetto corona, consente di raggiungere efficienze di cattura oltre il 99.5% tali da permettere la filtrazione di particelle inferiori al micron e quindi di purificare anche l'aria ambiente dalle particelle che vi sono in sospensione prima di immetterla in ambienti chiusi come edifici civili, specialmente se con ridotto scambio d'aria.

Studi effettuati negli USA, dove le normative sull'inquinamento di ambienti interni per prime si sono rese più restrittive, hanno dimostrato come malattie prevalentemente respiratorie siano sempre più frequenti all'aumentare del tempo trascorso mediamente in ambienti confinati. Uno dei principali gas inquinanti e irritanti è l'ozono, gas generato per la presenza di effetto corona dai filtri stessi.

## 1.1. Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dell'elettrofiltro si basa sulla carica di particelle sospese per effetto della ionizzazione causata dalle tensioni elevate su filamenti di piccolo diametro e la loro cattura su piastre alimentate (o non) a potenziale diverso in modo da creare un campo elettrico che applichi una forza di tipo coulombiano sulle particelle appena caricate tale da rendere trascurabili le forze di origine diversa.

Tra le piastre sono disposti una serie di elettrodi, non necessariamente di forma uguale, alimentati ad alta tensione positiva o negativa tale da produrre un campo elettrico sufficiente a ionizzare l'aria in prossimità degli elettrodi stessi: in questo modo un flusso di cariche dello stesso segno del potenziale applicato all'elettrodo viene respinto dalla zona di campo massimo prossima al filamento verso le piastre, incrociando sia altri atomi e molecole che vengono a loro volta ionizzati (effetto valanga), sia le particelle sospese nell'aria sulle quali si depositano.

In questo modo le particelle acquisiscono una carica. Proseguendo il loro moto all'interno della sezione, queste risentono del campo creato dagli elettrodi più interni e, essendo il potenziale concorde al segno della carica acquisita, vengono respinte verso le piastre di cattura sulle quali il loro moto si arresta per una combinazione di forze di van der Waals e di attrazione elettrica.



La velocità con cui le particelle, sotto l'azione della forza elettrica, si dirigono verso le piastre di raccolta è determinata dall'equilibrio tra la forza elettrica e la forza resistente. Tale velocità è detta velocità di migrazione ed è pari a:

$$W_d = \frac{D \cdot K_0 \cdot E^2 \cdot d_p}{(2 + D) \cdot \mu}$$

Dove:

D = costante dielettrica del mezzo;

$K_0$  = costante dielettrica del vuoto;

E = intensità del campo elettrico;

$\mu$  = viscosità del mezzo

$d_p$  = diametro della particella

L'efficienza di rimozione di un precipitatore elettrostatico è definita dall'azione Deutsch-Anderson:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{W_d \cdot A}{Q}}$$

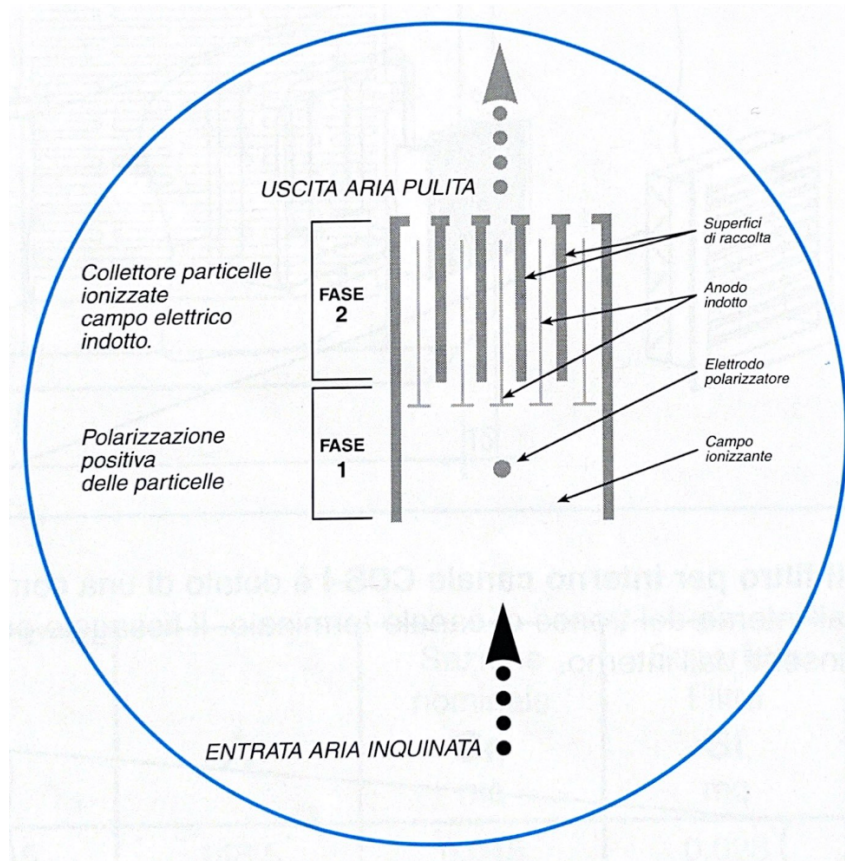
dove:

A = superficie dell'elettrodo di raccolta;

$W_d$  = velocità di migrazione di una particella carica;

Q = flusso entrante.

Una volta formatosi uno strato di particelle sulle piastre di raccolta, queste devono essere rimosse; si utilizzano sistemi di tipo meccanico (martelletti) o sistemi di lavaggio.



*Figura 1 - Principio di funzionamento elettrofiltro*

In sintesi, il processo di separazione delle particelle in un filtro elettrostatico avviene attraverso diversi passaggi sottoelencati:

1. generazione di un campo elettrico;
2. generazione di una carica elettrica;
3. trasferimento della carica elettrica alla particella;
4. movimento della particella carica in un campo elettrico verso l'elettrodo collettore;
5. adesione della particella carica sulla superficie dell'elettrodo collettore;
6. rimozione dello strato di particelle dall'elettrodo collettore.

In genere i due elettrodi sono uno di scarica, un filo in tungsteno, e un elettrodo collettore.

L'elettrodo di scarica è solitamente polarizzato negativamente, mentre il collettore positivamente, anche se è possibile che le polarità siano invertite.

La tensione applicata varia secondo la distanza che vi è tra gli elettrodi.

Le conseguenze dell'applicazione dell'alta tensione, sono la generazione di un intenso campo elettrico, e di una scarica elettrica con formazione di ioni all'elettrodo di scarica, effetto quest'ultimo visibile e noto come effetto "corona".

## 1.2. Generalità sull'elettrofiltro

Tali filtri permettono la depurazione dell'aria attraverso l'azione di forze elettrostatiche.

Essi agiscono tramite la generazione di un campo elettrico tra un elettrodo positivo e uno negativo, nel quale le particelle cariche sono forzate a muoversi in direzione di un elettrodo collettore.

Sulle piastre di raccolta del filtro cresce nel tempo uno strato di particelle che deve essere rimosso: si utilizzano sistemi di tipo meccanico (martelletti) o sistemi di lavaggio. In impianti industriali, la rimozione dev'essere eseguita automaticamente e regolarmente con interventi tanto più frequenti quanto maggiore è il carico di polveri depositate; per impianti di filtrazione dell'aria per edifici civili la pulizia viene eseguita in sede di manutenzione ordinaria essendo i depositi molto inferiori.

Il principio che c'è dietro la genesi della forza che causa la precipitazione elettrostatica è da attribuire a Coulomb, il quale introdusse una legge che mette in relazione attrazione e repulsione tra corpi con la distanza tra gli stessi.

I precipitatori elettrostatici, seppur strutturalmente molto semplici, offrono ancora ampi margini di miglioramento in termini di efficienza, costi, dimensioni e compatibilità con gli ambienti di installazione.

Sebbene sia difficile riportare esaustivamente vantaggi e svantaggi di una tecnologia di così vasta applicazione senza contestualizzare, una generica analisi dei pro (+) e dei contro (-) viene di seguito riportata.

+ Elevata efficienza di separazione;

+ bassi consumi energetici;

+ minime perdite di carico;

- + capacità di catturare anche particelle di tipo biologico. Diversamente dai filtri meccanici, l'accumulo di sporcizia e di crescita microbica non è attraversato costantemente dal flusso d'aria (nei filtri elettrostatici l'aria scorre longitudinalmente alle piastre di raccolta) con conseguente minor rischio di contaminazione degli ambienti;
- + potenza elettrica richiesta molto modesta;
- + capacità di trattare grandi portate di gas;
- + costi di esercizio estremamente ridotti;
- + vita operativa molto lunga e con ridotte esigenze di manutenzione (necessaria in primis per i filamenti);
- + affidabilità dovuta all'assenza di parti in movimento;
- + elevati rendimenti di rimozione per particelle di diametro molto piccolo ( $\approx 1\mu\text{m}$ )

Sebbene siano numerose le potenzialità di questi filtri, vanno comunque trattati i principali aspetti negativi:

- costi di investimento iniziali maggiori rispetto ai filtri meccanici (in particolare nell'applicazione industriale);
- scarsamente versatili sotto il profilo dimensionale e necessitano di spazi superiori rispetto ad altri sistemi filtranti;
- la resistività delle particelle incide sull'efficienza di cattura in modo molto pesante. Nel caso di applicazioni civili la resistività non è molto variabile, mentre in applicazioni industriali, in particolare con emissioni derivanti dalla combustione del carbone, la resistività varia anche di alcuni ordini di grandezza;
- condizioni di funzionamento sensibili alle condizioni ambientali;

- nella manutenzione, essendo costruiti con materiali specifici e delicati (fili ionizzanti, isolatori ecc.) sono spesso vittime di rotture che ne determinano un uso molto attento.

- le tensioni elevate con cui si alimentano gli elettrodi, ionizzando l'aria, danno origine a reazioni che producono gas indesiderati, in particolare l'ozono.

## 2 Ozono

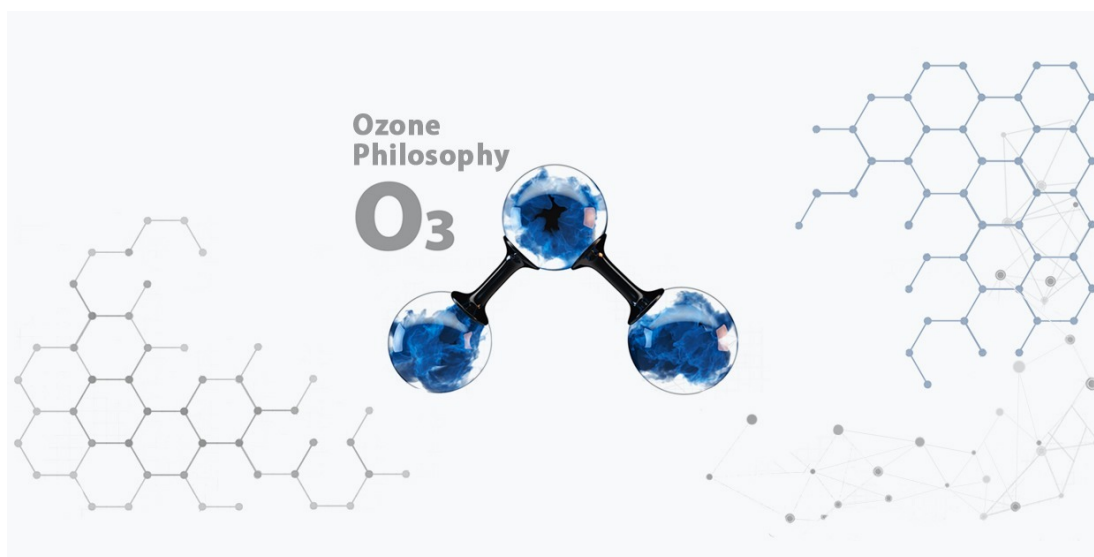


Figura 2 – Rappresentazione molecolare ozono (O<sub>3</sub>).

L'ozono (simbolo chimico O<sub>3</sub>) è una forma allotropica dell'ossigeno che si presenta in natura sotto forma di gas inorganico, di colore blu via via più scuro man mano che la temperatura scende prossima a quella di condensa (80 K) e caratterizzato da un odore agliaceo pungente.

Peso molecolare	48 g/mol
Punto di ebollizione	161,5 K
Punto di fusione (a 1 atm)	80,6 K
Densità (a 1 atm, 273,15 K)	2,14 kg/m <sup>3</sup>
Valore massimo consentito in ambiente	0,1 ppm (0,2 mg/m <sup>3</sup> d'aria)
Soglia di percezione odore	0,01 ppm
Potenziale redox	2,07 V

Tabella 1 – Principali caratteristiche dell'ozono

La molecola fu scoperta da Christian Friedrich Schönbein nel 1840, solo successivamente si fu in grado di determinare la sua formula chimica, la struttura fisica dei legami e la sua caratteristica diamagnetica. È un composto più instabile dell'ossigeno biatomico dal quale si genera in presenza di radiazione ultravioletta, scariche atmosferiche naturali o mediante dispositivi generatori di effetto

corona. La sua concentrazione media dell'atmosfera terrestre è pari a 0,6 ppm; l'unità di misura della quantità totale di ozono che ci sovrasta in qualsiasi punto dell'atmosfera è il Dobson (DU) che equivale ad uno spessore di 0,01 mm di ozono puro alla densità che questo gas possiede con una pressione atmosferica misurata al suolo pari a 1 atm.

Purtroppo, l'ozono, negli strati bassi dell'atmosfera, è un gas fortemente indesiderato.

Esso, infatti, è un potente ossidante e tale proprietà lo rende altamente velenoso per gli esseri viventi. Fino al XX secolo, i naturalisti lo consideravano un composto benefico: solo successivamente si compresero gli aspetti negativi. Vi è un'evidenza scientifica sui rischi che comporta la presenza di ozono: il sistema respiratorio costituisce l'insieme di tessuti e mucosi maggiormente pregiudicati con irritazioni a faringe, trachea e polmoni con conseguenze patologiche quali asma, bronchiti e problemi cardiopolmonari. Lunghe esposizioni aumentano malattie polmonari croniche, come dimostrato da uno studio durato 18 anni basato su 450.000 persone abitanti negli USA: nelle città con elevati valori di ozono come Houston, Los Angeles e Città del Messico (concentrazione media tra i 41 e 125 ppb) il rischio di morte per problemi respiratori è superiore del 30% rispetto alla media ed è considerato il quinto fattore di rischio per la salute umana. Dimostrati sono anche i problemi agli occhi conseguenti alle pesanti irritazioni che si possono verificare anche in presenza di basse concentrazioni di ozono. L'ozono è un agente inquinante secondario, ossia un gas che si forma dalla reazione fotochimica di inquinanti cosiddetti precursori in zone dove le condizioni climatiche presentano temperatura elevata, forte radiazione solare, alta pressione e bassa ventilazione.

Tipicamente il picco di ozono si presenta nelle ore centrali delle giornate estive.

## 2.1. Legislazione e Normative

Per garantire livelli di concentrazione di gas dovuti ad attività antropica non dannosi per gli esseri umani e per l'ambiente, negli ultimi decenni innumerevoli norme e linee guida si sono succedute presentando un trend che conduce a valori sempre minori di concentrazioni ammesse che si traducono in vincoli sempre più stringenti per prodotti il cui funzionamento produce gas nocivi.

La normativa in vigore è il Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155, in recepimento della Direttiva sulla Qualità dell'Aria Ambiente e Aria più Pulita per l'Europa n. 50/2008 del 21 maggio 2008, che fissa i valori limite e gli obiettivi di qualità per le concentrazioni nell'aria ambiente di biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo, particolato PM10, particolato PM2.5 e ozono e sostituisce le disposizioni di attuazione della direttiva 2004/107/CE.

Le finalità del D.Lgs. 155 (art.1, comma 1) sono:

- definire gli obiettivi di qualità dell'aria ambiente volta ad evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana e per l'ambiente nel suo complesso;
- valutare la qualità dell'aria sulla base di metodi e criteri comuni su tutto il territorio nazionale;
- ottenere informazioni sulla qualità dell'aria come base per contrastare l'inquinamento e gli effetti nocivi di quest'ultimo sulla salute umana e sull'ambiente e per monitorare le tendenze a lungo termine, nonché i miglioramenti dovuti alle misure adottate;
- mantenere la qualità dell'aria laddove buona e migliorare negli altri casi;
- garantire al pubblico le informazioni sulla qualità dell'aria;
- realizzare una migliore cooperazione tra gli Stati dell'Unione Europea in materia di inquinamento atmosferico.

Inoltre:

- conferma tutti i precedenti valori di concentrazione degli inquinanti;
- conferma regioni/province autonome come autorità competenti in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria;
- istituisce un coordinamento tra ministero, regioni e altre autorità competenti in materia di aria ambiente al fine di garantire un'attuazione coordinata e omogenea delle norme e prevenire situazione di inadempienza (art.20).

La legge fissa tali valori limite:

- una soglia di informazione pari a 180  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  equivalenti a circa 90 ppb (ppb= parti per miliardo);
- una soglia di allarme pari a 240  $\mu\text{gr}/\text{m}^3$  equivalenti a circa 120 ppb.

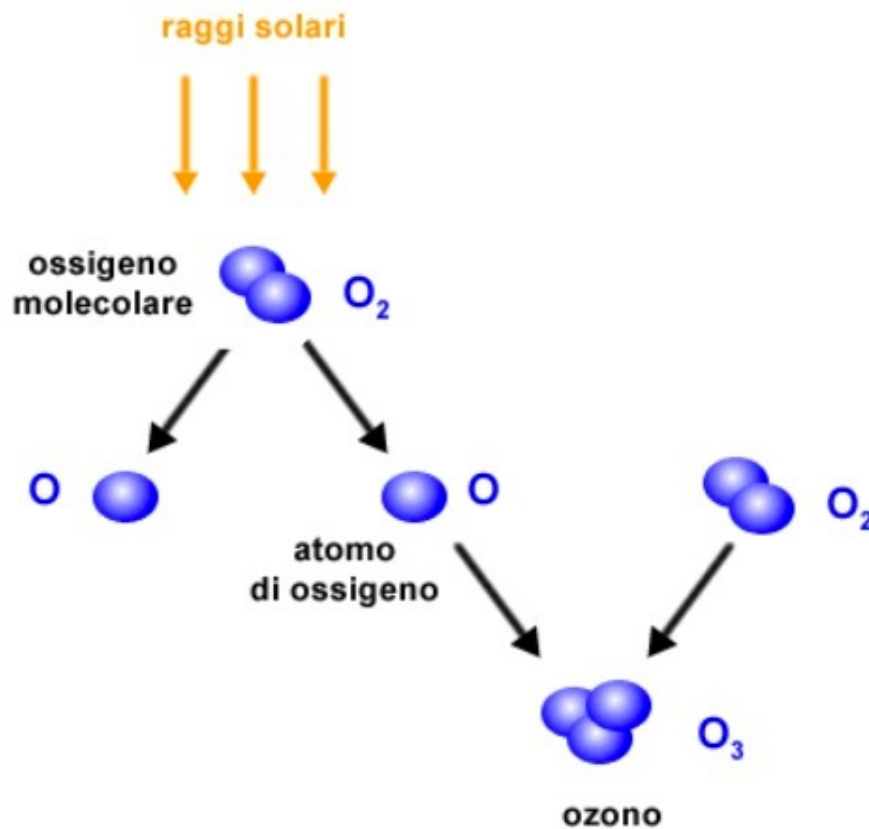
## 2.2. Produzione Ozono

Sono varie le cause che determinano la produzione di Ozono, sia naturali che antropiche; in seguito, si propone un cenno riguardo al naturale meccanismo di produzione dell'ozono, per poi passare alla sua formazione tramite generatori.



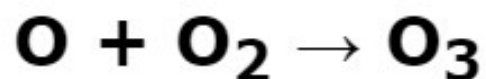
- Formazione dell'ozono atmosferico

Le radiazioni solari con lunghezza d'onda inferiore ai 242 nm dividono l'ossigeno molecolare (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) in ossigeno atomico (O). Di seguito si illustra una semplice immagine riguardante la reazione chimica di interesse.



*Figura 3 - Formazione ozono atmosferico*

Gli atomi di ossigeno liberati (O) si combinano immediatamente con le altre molecole di ossigeno (O<sub>2</sub>) dando vita ad una nuova molecola di ozono (O<sub>3</sub>). La formula della reazione chimica è la seguente:



*Figura 4 - Formula della reazione chimica*

Queste nuove molecole di ozono ( $O_3$ ) assorbono le radiazioni solari con lunghezza d'onda compresa tra 240 e 340 nm generando la fotolisi che libera un atomo e una molecola di ossigeno. Grazie a questo equilibrio dinamico la quantità di ozono in atmosfera si mantiene costante.

- Produzione antropica dell'ozono

A causa del suo tempo di dimezzamento radioattivo molto breve, l'ozono viene prodotto sempre in situ da un generatore. I metodi principali sono:

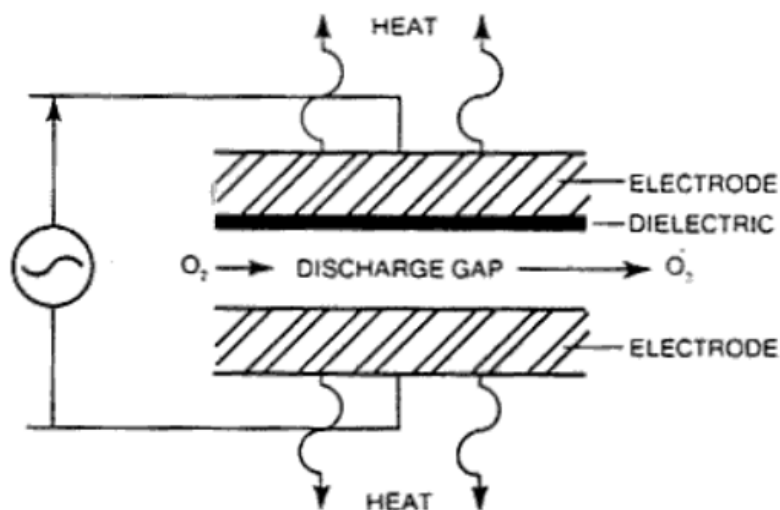
- Elettrica (Effetto Corona);
- Elettrochimica (Elettrolisi);
- Fotochimica (Radiazione UV).

Di seguito si approfondisce solamente la metodologia di produzione elettrica, in quanto propria delle prove sperimentali eseguite in laboratorio, che verranno discusse successivamente.

### 2.3. L'Effetto Corona

Consiste nella ionizzazione dell'aria presente in uno strato cilindrico (di qui il termine "corona"). Tale ionizzazione si ha quando il valore del Campo Elettrico supera quella della Rigidità dielettrica del materiale in questione.

In sintesi, l'effetto corona scinde la molecola di ossigeno in due radicali liberi che successivamente si attaccheranno ad altre due molecole di ossigeno, presenti nell'aria, formando l'ozono  $O_3$ .



*Figura 5 – Schema della produzione dell'effetto corona*

## 2.4. Fattori che influenzano la produzione di Ozono

La generazione di ozono nei precipitatori elettrostatici dipende da diversi parametri che possono essere geometrici, ambientali, fluidodinamici, elettrici, ecc.

A rendere il problema complesso è la dipendenza dell'ozono prodotto dal tempo di funzionamento del filtro, quindi dal carico d'aria filtrato, dallo stato degli elettrodi e dalla concentrazione di ozono naturalmente presente nell'ambiente.

Tra i parametri geometrici, quelli che influenzano in modo più sensibile la produzione di ozono sono il diametro dell'elettrodo alimentato ad alta tensione, la forma e il materiale con cui esso è realizzato. Gli elettrodi sono l'elemento più stressato meccanicamente ed elettricamente in un filtro; la scelta del materiale deve quindi considerare anche l'affidabilità che un materiale offre, la necessità di manutenzione e il costo che esso comporta.

Per quanto riguarda i parametri ambientali, pressione, temperatura e umidità sono i principali fattori che possiamo considerare per stimare la generazione di ozono al variare delle condizioni ambientali. Nelle prove eseguite, i parametri che sono stati presi maggiormente in considerazione sono stati la temperatura (°C) e l'umidità (%).

Per cui attraverso l'ottimizzazione di questi parametri è possibile monitorare la produzione di ozono da parte del filtro.

## 3 Descrizione del filtro

### 3.1. Generalità sul filtro preso in esame

Il filtro elettrostatico preso in studio è stato progettato per ridurre la diffusione, negli ambienti indoor, di agenti inquinanti di varia natura, presenti nelle canalizzazioni degli impianti di climatizzazione. È perciò indicato per differenti tipologie d'ambiente quali, ad esempio, scuole, ospedali, alberghi e dovunque occorra migliorare la qualità dell'aria interna.

Sono molteplici le cause che determinano la presenza di diversi agenti inquinanti nei canali. La principale è la scarsa o inesistente pulizia e manutenzione degli stessi, alla quale si aggiungono altri fattori quali un errato bilanciamento e/o pressurizzazione dei canali, la circolazione dell'aria tra un ambiente e l'altro ad impianto fermo, la mancanza di idonei filtri, la scarsa attenzione nella sostituzione dei filtri, la presenza di condizioni favorevoli in termini di temperatura ed umidità alla proliferazione di organismi di natura batterica, ecc.

Benché sia possibile diminuire l'inquinamento dei canali attraverso una manutenzione periodica degli stessi, nella realtà raramente questa viene effettuata a causa dei costi o della difficoltà di accesso.

Una possibile soluzione alternativa per ridurre sensibilmente il rischio per la salute e per contenere drasticamente i costi di manutenzione dei canali è rappresentata dall'installazione di barriere filtranti ad azione elettrostatica attiva immediatamente prima che l'aria venga immessa nei locali.

Come già riportato precedentemente, la filtrazione elettrostatica è considerata il metodo più efficiente ed efficace per la purificazione dell'aria in quantità importanti: garantisce una cattura quasi totale del particolato con un basso costo energetico conseguente alla ridotta perdita di carico.

Tuttavia, le alte tensioni necessarie al funzionamento del filtro generano ozono, prodotto inquinante e dannoso se introdotto in ambienti interni con un ridotto ricambio d'aria.

Di seguito vengono elencati quali sono i vantaggi del filtro elettrostatico preso in esame durante le prove eseguite in modalità plug-flow.

1. Possibile applicazione anche su impianti esistenti;
2. Ridotta perdita di carico anche a filtro sporco;
3. Elevata azione battericida su inquinanti di natura biologica;
4. Nessun costo di sostituzione (filtri totalmente rigenerabili mediante semplice lavaggio);
5. Costi energetici aggiuntivi molto contenuti;
6. Manutenzione semplice e veloce.



*Figura 6 – Filtro elettrostatico in esame*

L'elemento filtrante è composto da due sezioni: la prima è costituita dagli elettrodi in tungsteno e da elementi isolanti. La seconda sezione, destinata alla cattura delle particelle inquinanti, è costituita da speciali profili estrusi in alluminio accoppiati e opportunamente distanziati, formanti il collettore di raccolta.

Questa sezione risulta facilmente estraibile per permettere un'agevole manutenzione.

Il principio di funzionamento del filtro è estremamente semplice. Come già spiegato precedentemente, le particelle inquinanti transitano attraverso la prima sezione costituita dagli elettrodi e caricate elettronicamente per via del campo elettrico qui prodotto (ionizzazione). Le particelle vengono quindi raccolte sulle piastre del filtro che si trovano a polarità opposta. Per via delle elevate tensioni, all'interno del filtro si genera un intenso quanto difforme campo elettrico ad effetto valanga denominato scarica corona.

## 3.2. Collegamenti elettrici

L'apparecchiatura di alimentazione dei filtri è contenuta in apposita cassetta in ABS che contiene la scheda elettronica di potenza, una morsettiera di alimentazione principale 230 V + 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 ed un morsetto per il collegamento dell'apparecchiatura alla massa dei filtri.

L'apparecchiatura può essere installata in prossimità del filtro oppure in posizione remota.



*Figura 7 - Alimentazione filtro*

## 4 Prove di laboratorio

### 4.1. Strumentazione utilizzata: Ozone Monitor

Lo strumento utilizzato per misurare la concentrazione di ozono nelle diverse prove è stato l'Ozone Monitor (model 450) visibile nella seguente immagine.

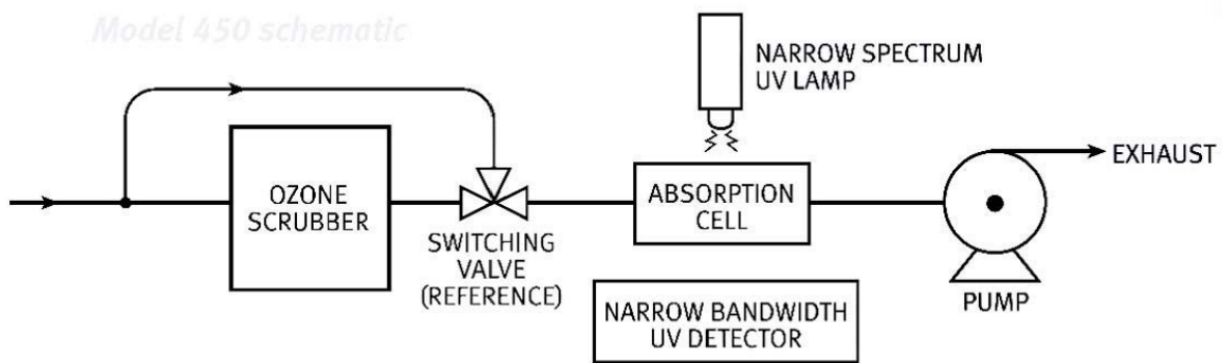


*Figura 8 – Ozone Monitor model 450*

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 adopera una lampada al mercurio tale che la maggior parte della luce emessa abbia lunghezza d'onda intorno a quella d'assorbimento dell'ozono.

#### 4.1.1. Principio di funzionamento

La cella d'assorbimento (absorption cell) viene alternatamente riempita di gas tale e quale e dal gas stesso ripulito della componente dell'ozono tramite uno scrubber (di fatto si tratta di un filtro). La concentrazione è ottenuta attraverso il confronto del diverso assorbimento della radiazione ultravioletta fra il campione tale e quale e quello "ripulito".



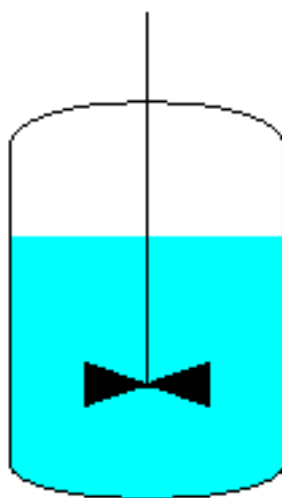
*Figura 9 – Schema di funzionamento dell’Ozone Monitor model 450*

## 4.2. Prove statiche (o Batch)

Nell’ingegneria chimica e nella chimica industriale, un reattore chimico è un contenitore progettato per farvi avvenire una reazione chimica.

Esistono diverse tipologie di reattore chimico, in funzione della reazione da svolgervi e della natura chimica e delle sostanze coinvolte, nonché dalla modalità di conduzione della reazione: continua o discontinua.

Un reattore chimico di tipo batch è dunque un’apparecchiatura utilizzata per lo svolgimento di reazioni chimiche in maniera discontinua.



*Figura 10 - Schematizzazione di un reattore batch*



È in genere costituito da un recipiente con un sistema di agitazione e di condizionamento termico.

Un reattore batch opera secondo una precisa sequenza:

- Carico di tutti i reagenti e chiusura del reattore;
- Condizionamento termico;
- Reazione chimica;
- Spegnimento;
- Apertura e svuotamento;
- Lavaggio.

Nell'analisi di questo tipo di sistemi generalmente si suppone che in ogni punto del reattore la composizione sia la stessa (condizione di idealità). Di seguito  $V$ , detto volume del reattore, si riferisce in pratica al volume del fluido contenuto nel reattore stesso. Le portate entranti ed uscenti sono entrambe nulle.

Utilizzando lo spazio chiuso come volume di controllo, è possibile scrivere un'equazione di bilancio nella forma simbolica:

$$E - U = A - G$$

In cui con il simbolo "E" indichiamo l'entità in entrata, con il simbolo "U" l'entità in uscita, con il simbolo "A" l'accumulo di entità e con il simbolo "G" la generazione di entità.

Nel reattore discontinuo non abbiamo materia entrante o uscente, pertanto il bilancio di materia si ridurrà alla uguaglianza fra le quantità di specie generata e la quantità di specie accumulata.

$$A = G$$

Per cui il bilancio dipenderà dalla legge di generazione, ossia da quanto è veloce la reazione ( $r$ ) e da quanto è grande il reattore ( $V$ ).

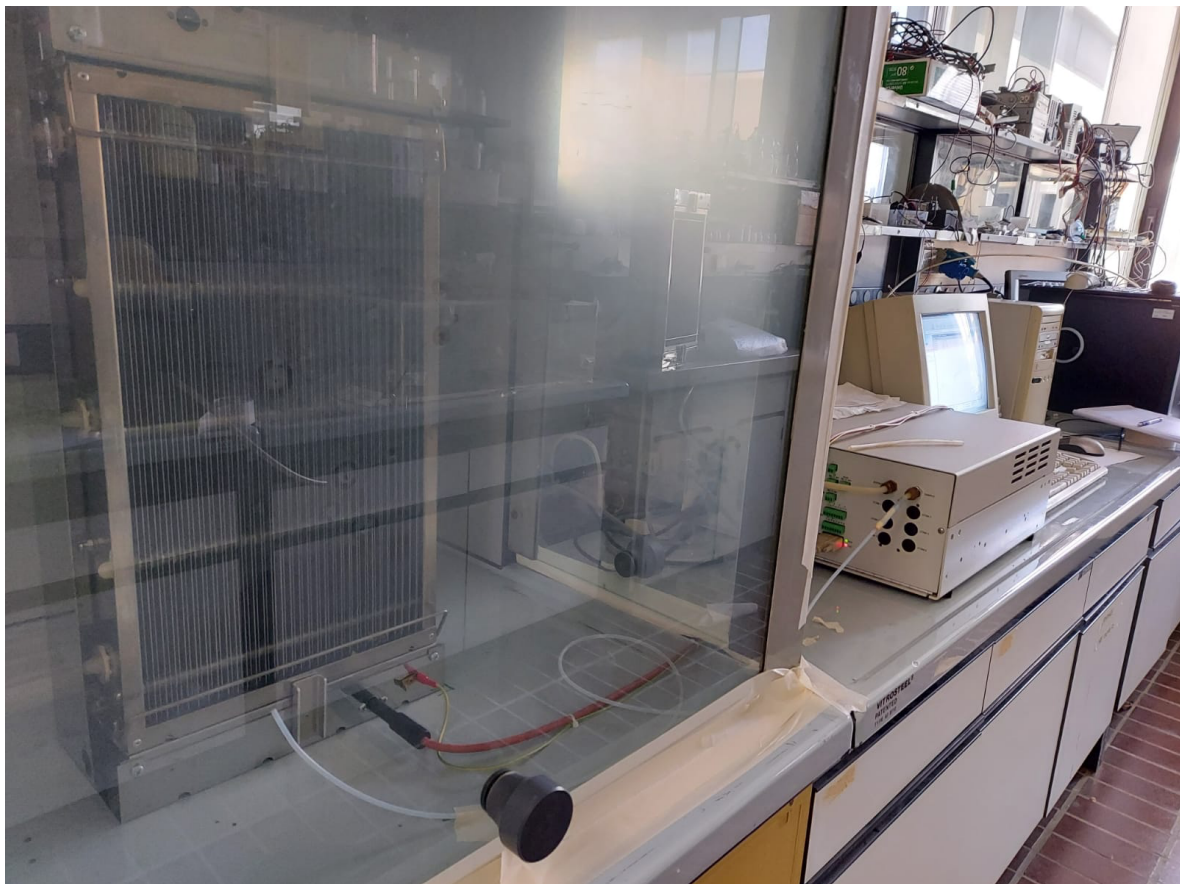
#### 4.2.1. Preparazione e descrizione della prova

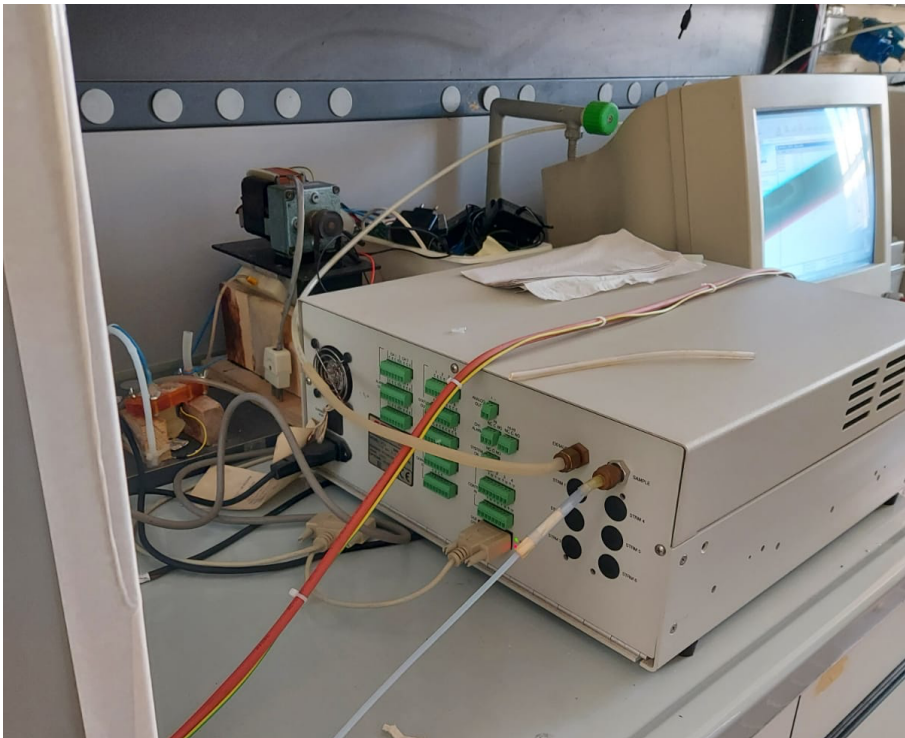
In una prima fase, per analizzare il comportamento dei filtri a disposizione, le prove sono state effettuate all'interno di un box, più precisamente in una cappa chimica non più in uso, cercando di simulare quella che è una configurazione di tipo batch o più semplicemente statica.

La cappa è stata attentamente chiusa e resa il più possibile ermetica in modo da evitare perdite di qualsiasi genere durante l'esecuzione delle prove.

All'interno del box è stato posizionato il filtro collegato al generatore esterno, una ventola che agisce da miscelatore e un tubicino (in) collegato direttamente all'Ozone Monitor.

L'uscita (out) dell'Ozone Monitor è stata posizionata all'esterno del laboratorio per evitare un aumento eccessivo della concentrazione di ozono nel luogo di lavoro.







*Figura 11 – Allestimento prova*

Di seguito si riassume la modalità di esecuzione delle prove.

Nei primi cinque minuti solo la ventola è accesa e si acquisisce la concentrazione di ozono presente all'interno del box.

Successivamente si attiva il filtro; la sua accensione comporta un aumento evidente di concentrazione dell'ozono.

Il filtro rimane acceso fino al raggiungimento di un "plateau" (concentrazione stabile), dopodiché viene spento.

Lo spegnimento comporta una diminuzione della concentrazione di ozono dovuta al fatto che il filtro non lavora più e l'ozono prodotto si scinde in ossigeno ( $O_2$ ) molecolare e ossigeno atomico (O).

Le prove sono state eseguite su due filtri (FILTRO 1 – FILTRO 2), che hanno manifestato un diverso comportamento per quanto riguarda la produzione di ozono.

#### 4.2.2. Risultati ottenuti

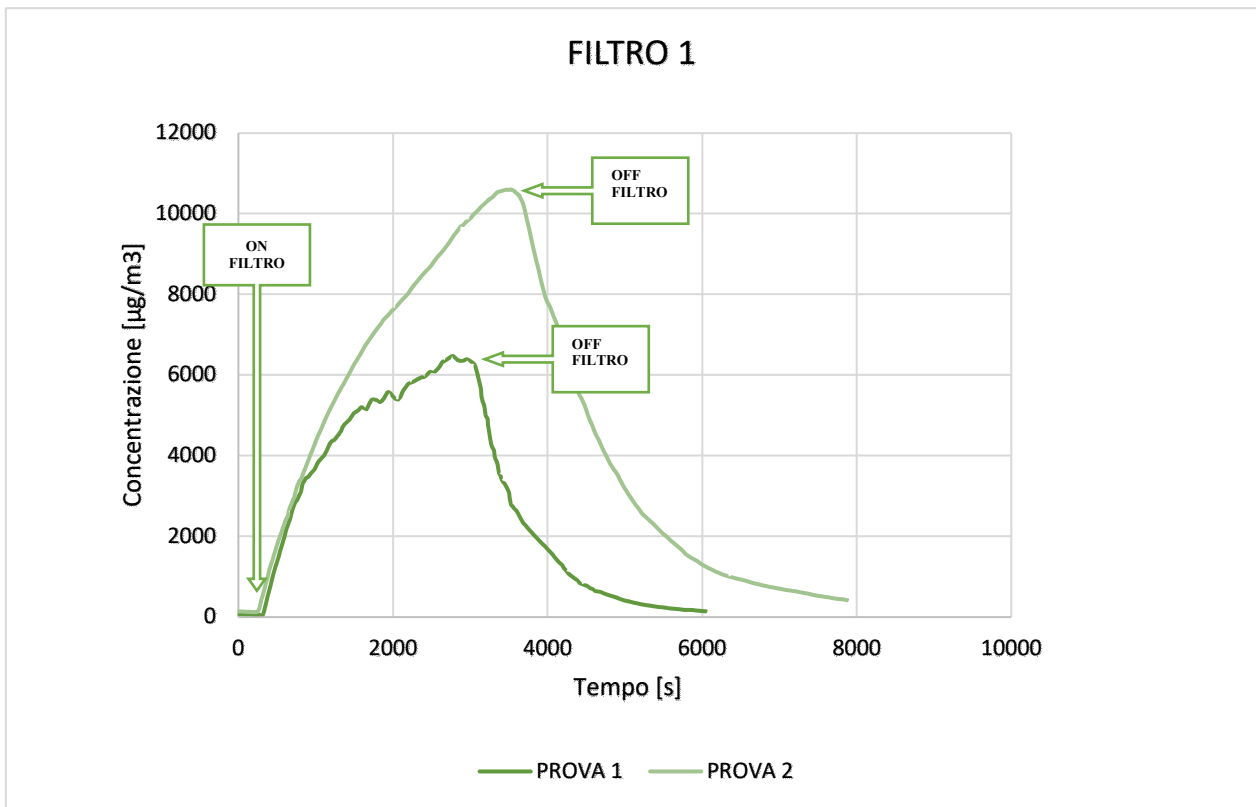


Figura 12 – Andamento della concentrazione di ozono prodotto dal FILTRO 1

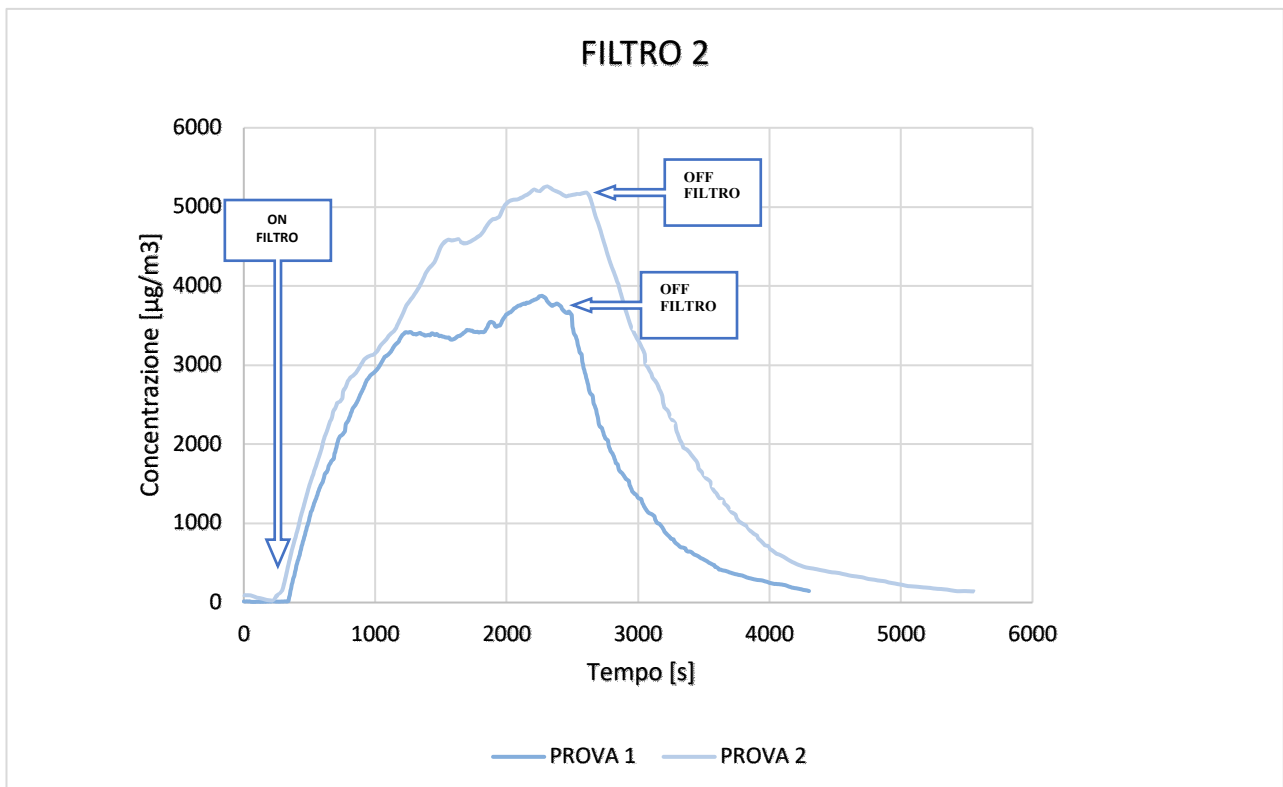


Figura 13 – Andamento della concentrazione di ozono prodotto dal FILTRO 2

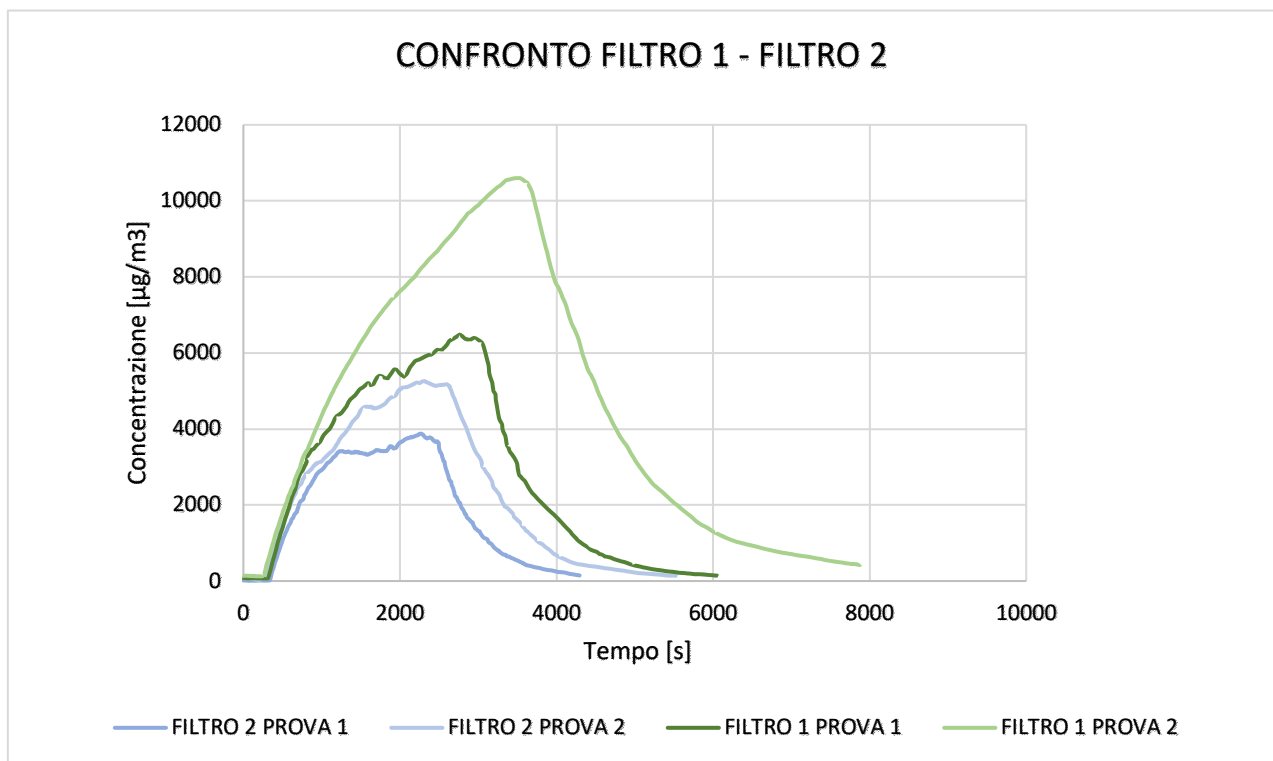


Figura 14 – Confronto dell'andamento della concentrazione di ozono prodotta tra i due filtri

Dai risultati ottenuti nei grafici sopra riportati, si nota come il FILTRO 1 produca più ozono rispetto al FILTRO 2.

Nella prova 1 e nella prova 2 del FILTRO 1 i picchi sono rispettivamente pari a circa 6400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 10600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Invece, nella prova 1 e nella prova 2 del FILTRO 2 i picchi sono rispettivamente pari a circa 3900  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 5200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 4.2.3. Considerazioni finali

Nonostante le prove effettuate in modalità Batch, ci si è resi conto che il contesto sperimentale adottato non rispecchia a pieno le condizioni di reale attività del filtro, anzi sono molto distanti da esse.

Di conseguenza sono state effettuate ulteriori prove adottando una configurazione di tipo plug-flow per avvicinarsi maggiormente al contesto reale. Difatti, una delle applicazioni del filtro nella realtà è quella di utilizzarlo all'interno delle canalizzazioni degli impianti di climatizzazione per ridurre gli agenti inquinanti di varia natura presenti in esse prima di immettere l'aria nei locali.

Non avendo a disposizione una canalizzazione per realizzare le prove è stato costruito un box che si avvicinasse al meglio all'ideale condizione di lavoro.

La realizzazione di quest'ultimo viene descritta più dettagliatamente nei capitoli a seguire.

### 4.3. Prove dinamiche (plug-flow)

Il reattore PFR (Plug Flow Reactor = reattore a flusso a pistone) è un'apparecchiatura utilizzata per lo svolgimento di reazioni chimiche in maniera continua.

Questa configurazione reattoristica è schematizzabile come un tubo che viene alimentato con i reagenti e da cui fuoriescono continuamente prodotti di reazione.

Il reattore PFR a differenza del batch non ha elementi meccanici per garantire la miscelazione; quest'ultima viene garantita dalla portata distribuita su ogni sezione retta 'A'.

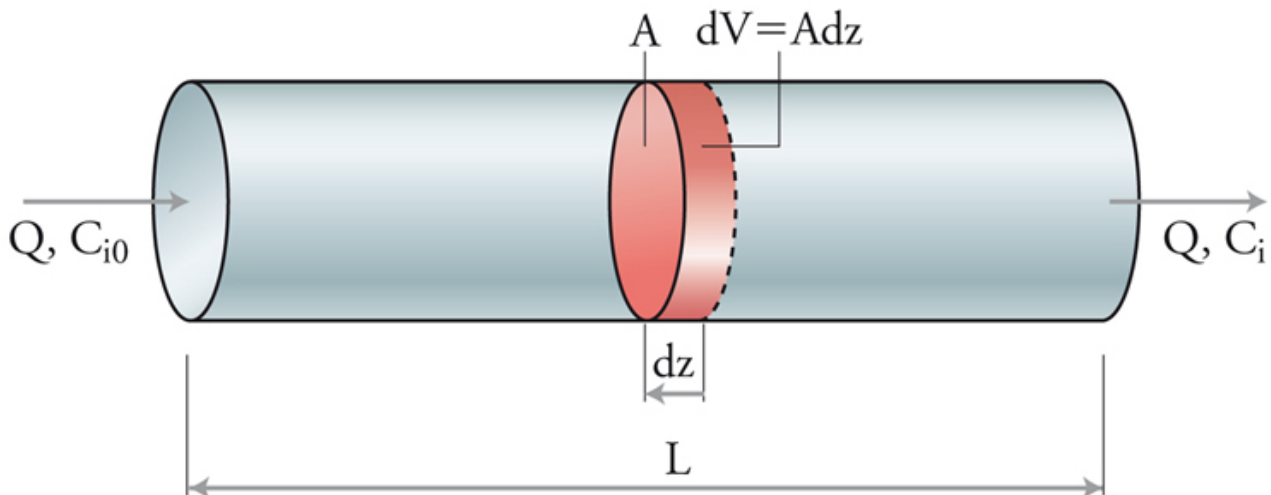


Figura 15 – Schematizzazione di un reattore plug-flow

In un reattore di questo tipo si suppone che la portata della miscela reagente sia tale da non consentire diffusione assiale e che la concentrazione sia la stessa in tutti i punti appartenenti alla stessa sezione retta (condizione di idealità).

Presupposto affinché possa esistere flusso a pistone è che ogni particella fluida attraversi il reattore con la stessa velocità ossia il tempo di permanenza nel reattore sia lo stesso per tutte le particelle.

Questo modello PFR funziona bene per molti fluidi: liquidi, gas e fanghi. Sebbene il flusso turbolento e la diffusione assiale causino un grado di miscelazione nella direzione assiale nei reattori reali, il modello plug-flow è appropriato quando questi effetti sono sufficientemente piccoli da poter essere ignorati.



Nel caso più semplice di un modello PFR, devono essere fatte diverse assunzioni chiave per semplificare il problema, alcune delle quali sono descritte di seguito:

- Flusso a pistone;
- Stato stazionario;
- Densità costante;
- Singola reazione che si verifica nella massa del fluido (in modo omogeneo):

Il bilancio di materia dà come equazione simbolica:

$$A = E - U + G$$

In cui con il simbolo ‘E’ indichiamo l’entità in entrata, con il simbolo ‘U’ l’entità in uscita, con il simbolo ‘A’ l’accumulo di entità e con il simbolo ‘G’ la generazione di entità.

Il modello PFR ideale prevede che ci si metta nelle condizioni di regime stazionario (quindi accumulo nullo  $A=0$ ), moto a pistone perfetto (ovvero il vettore velocità  $v_z$  ha solo componente assiale costante lungo il profilo del reattore) ed assenza di moti diffusivi.

L’equazione di bilancio può essere così definita:

$$0 = -v_z \frac{dC_i}{dx} + r_i$$

$$v_z \frac{dC_i}{dx} = r_i$$

e riconoscendo che  $\frac{dx}{v_z} = d\tau$  è il tempo di residenza, si può riscrivere:

$$\frac{dC_i}{d\tau} = r_i$$



Dove:

- $C$  è la concentrazione di  $i$ ;
- $V$  è il vettore velocità;
- $r$  è la velocità di produzione di  $i$ .

#### 4.3.1. Realizzazione della canalizzazione

Non avendo a disposizione una canalizzazione che simulasse le reali condizioni di lavoro del filtro preso in esame, si è deciso di progettare e costruire un piccolo condotto avvicinandoci ad una configurazione di tipo plug-flow.

Il materiale scelto per realizzare il box è il legno.

Il legno è costituito essenzialmente da circa 50% di carbonio (C), 44% di ossigeno (O) e 6% di idrogeno (H), da un contenuto medio di ceneri pari a 0,2-0,3% (→ sostanze minerali) e da un contenuto di azoto inferiore allo 0,1%.

Per la sua composizione chimica il legno potrebbe reagire con l'ozono e per questo motivo, dopo aver realizzato la canale, questa è stata rivestita internamente con carta di alluminio.

Questa scelta è stata dettata dal fatto che, a differenza di altri materiali, l'alluminio ha una discreta compatibilità con l'ozono.

Di seguito viene riportata una tabella in cui sono presenti alcuni materiali e viene indicata la compatibilità che questi hanno con l'ozono.

<i><b>Legenda</b></i>	
<b>A</b>	Eccellente compatibilità
<b>B</b>	Buona compatibilità se non c'è un uso continuativo di ozono ad alte concentrazioni
<b>C</b>	Discreta compatibilità, segnali di deterioramento dopo un uso per alcune settimane consecutive
<b>D</b>	Scarsa/nessuna compatibilità già dopo pochi giorni di uso

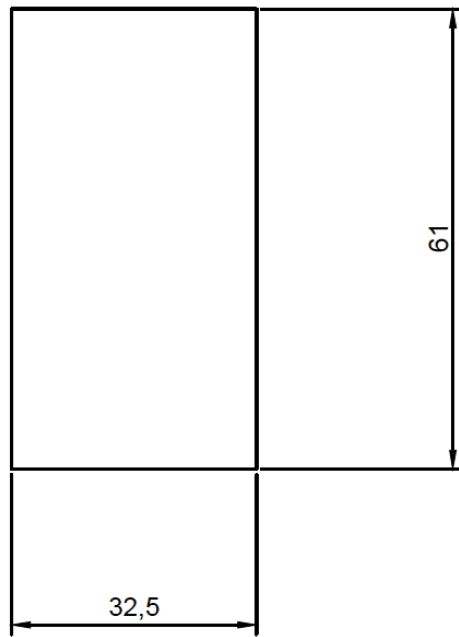
*Tabella 2 – Legenda*

ABS	B	Neoprene	B/C
Acciaio dolce	D	Nitrato	D
Acciaio galvanizzato/zincato	C	Nylon	D
Acciaio Inox 304/316	A	Ottone	C/D
Acciaio inox altre classi	B	Plexiglass	A
Acetato di butile	A	Policarbonato	A
<b>Alluminio</b>	<b>B/C</b>	Polietilene	B
Bronzo	B	Poliuretano	A
CPVC	A	PVC	A/B
Etilene-propilene	A	Rame	B
Fluorosilicone	A	Teflon	A
Gomma naturale	D	Titanio	A
Ghisa	C	Vetro	A
Magnesio	D	Zinco	D

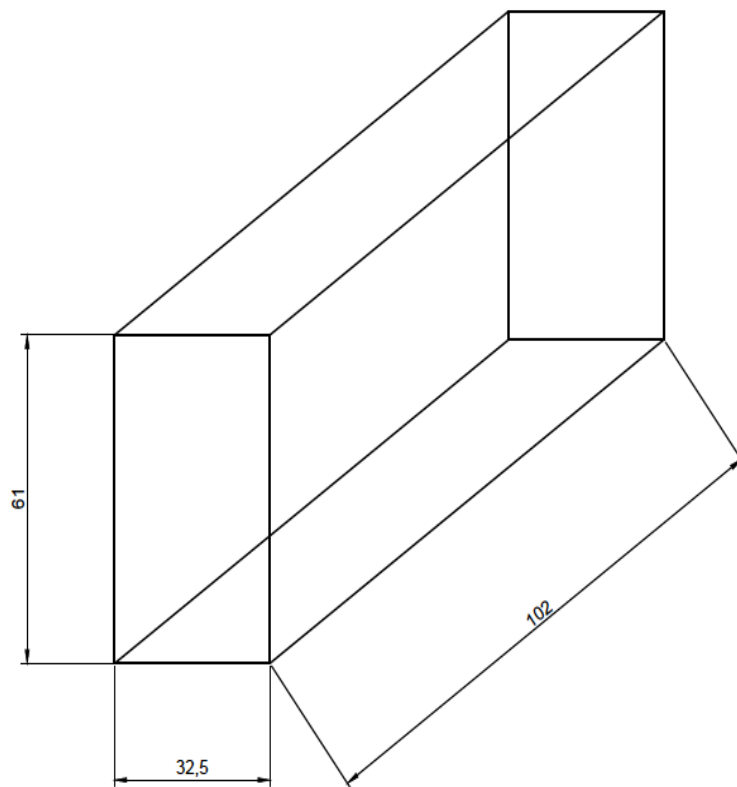
*Tabella 3 – Compatibilità di alcuni materiali con l'ozono*

Dopo aver scelto i materiali con cui realizzare la canalizzazione sono state definite le dimensioni:

- Altezza: H= 61 cm
- Lunghezza: l=102 cm
- Larghezza: L= 32,5 cm



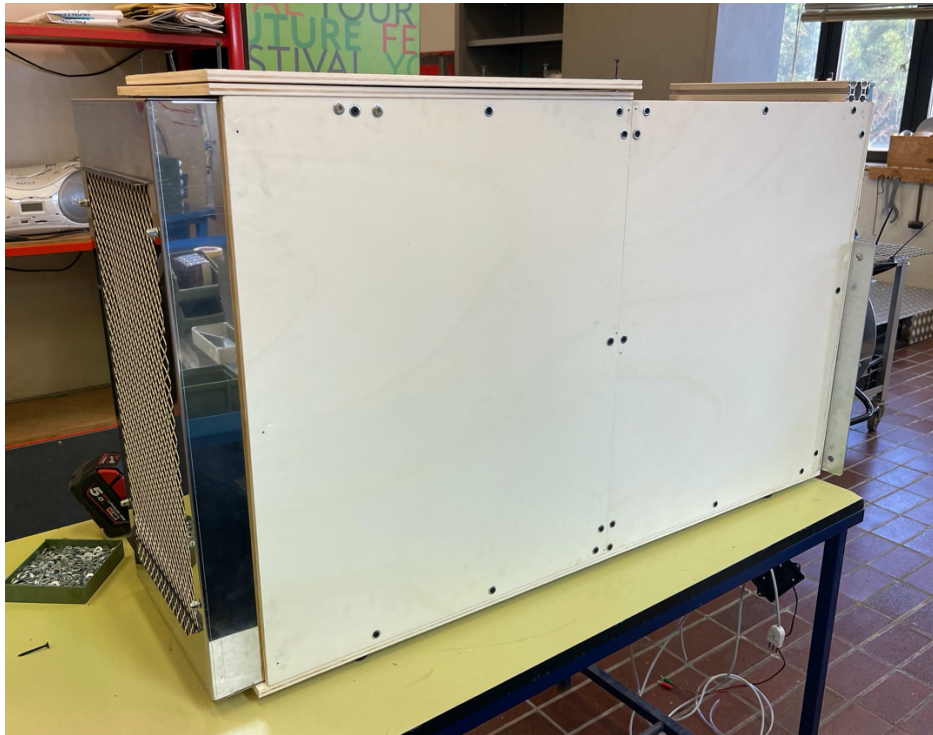
*Figura 16 – Sezione trasversale canalizzazione*



*Figura 17 – Rappresentazione canalizzazione*



*Figura 18 – Interno della canalizzazione*

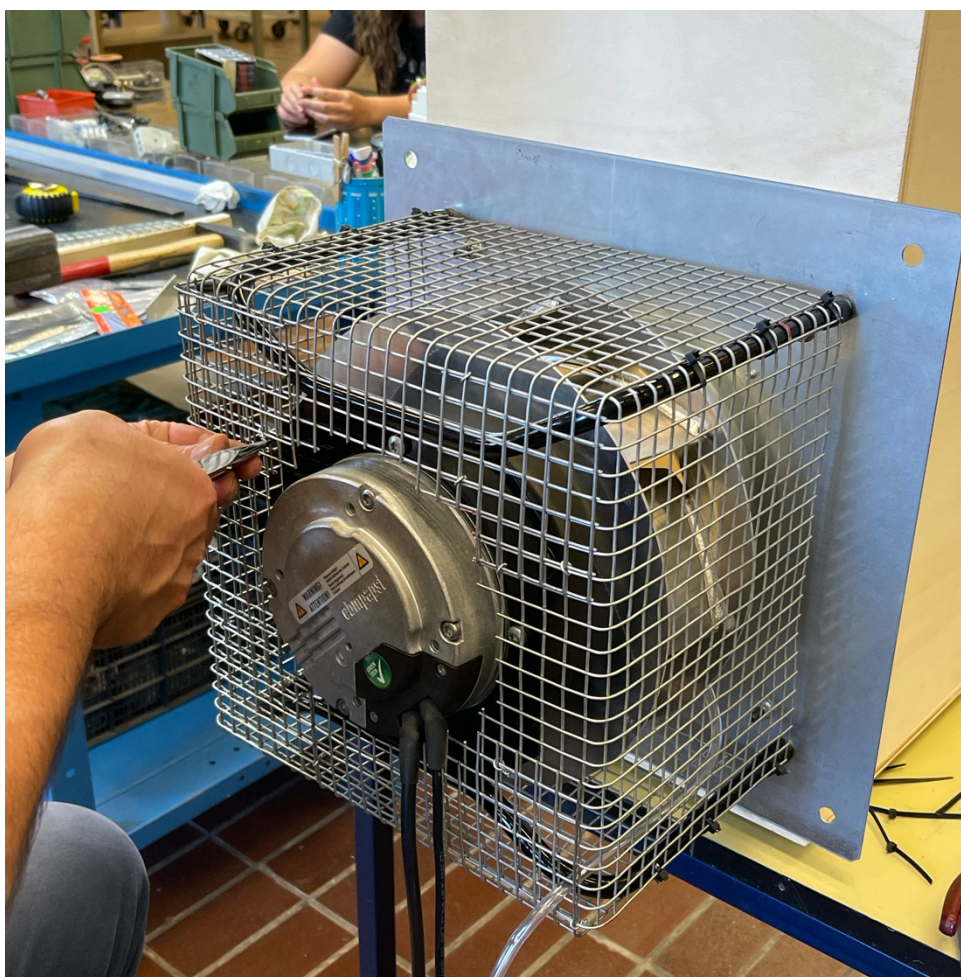


*Figura 19 – Canalizzazione assemblata*

In figura 19 si può vedere come in un'estremità è stato posizionato il filtro mentre nell'estremità opposta una ventola che lavora in aspirazione e di conseguenza crea un flusso d'aria all'interno del condotto.

Tutto il box è componibile ovvero è costituito da elementi singoli che, assemblati tra loro, formano l'intera canalizzazione.

La scelta di fare un box componibile e non unico va a semplificare le operazioni di controllo della canalizzazione, se necessarie, e il cambio tra un filtro e l'altro.

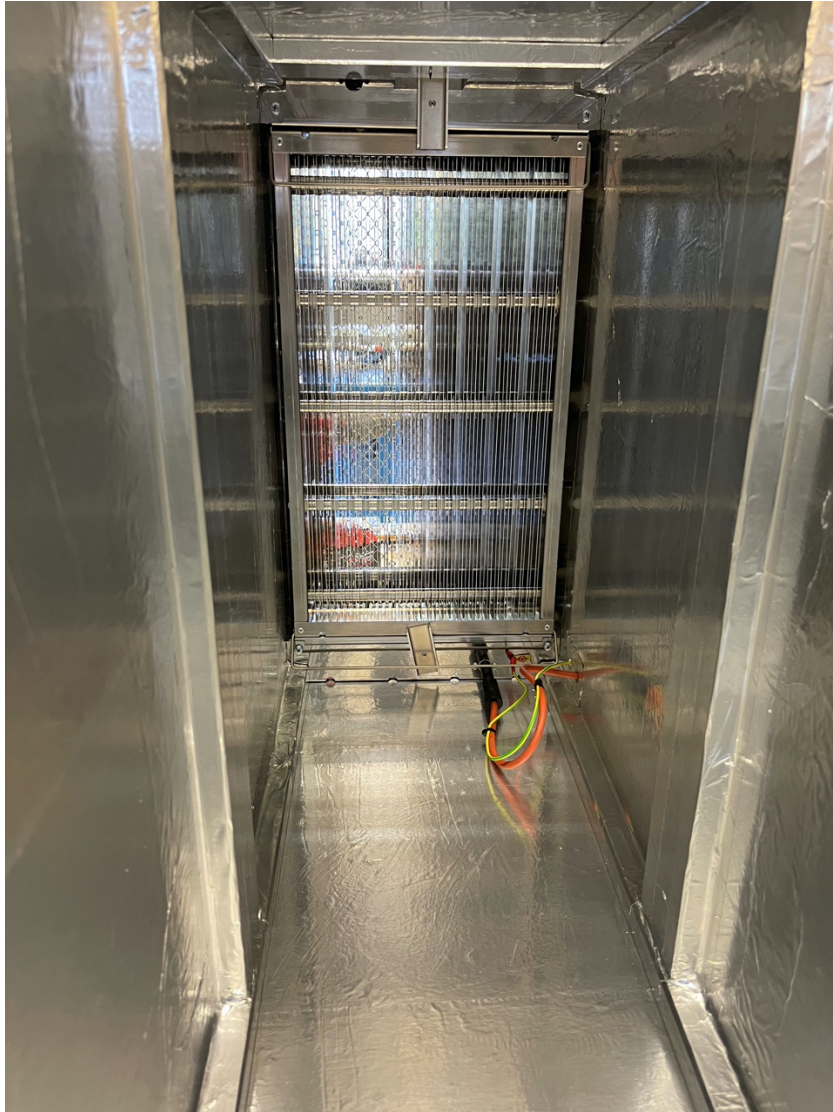


*Figura 20 – Ventola protetta da una rete metallica*

Come si può vedere dall'immagine sopra riportata, la ventola è ben fissata alla canalizzazione e rivestita da una rete metallica, realizzata su misura, per questioni di sicurezza durante il suo funzionamento.



Nella figura 21 è possibile visualizzare come tutto l'interno della canalizzazione sia stato rivestito attentamente con carta di alluminio per evitare che, durante l'esecuzione delle prove, l'ozono generato dal filtro potesse reagire con il legno.



*Figura 21 – Interno della canalizzazione rivestito con carta di alluminio*



*Figura 22– Interno della canalizzazione vista dall'alto*

#### 4.3.2. Preparazione e descrizione delle prove

Dopo aver realizzato la canalizzazione quest'ultima è stata collocata, insieme alla strumentazione necessaria per eseguire le prove, all'interno dei capannoni del dipartimento SIMAU.





*Figura 23 – Postazione prova*

Come già anticipato, in un'estremità della canalizzazione è posizionato il filtro mentre nell'estremità opposta la ventola.

La ventola, a flusso radiale, lavora in aspirazione creando un flusso d'aria all'interno del condotto ed è in grado di lavorare a portate differenti. [m<sup>3</sup>/h]

Il punto di misura della concentrazione di ozono è posizionato all'interno del canale ad una distanza che è pari alla metà di tutta la sua lunghezza.

Sapendo che la generazione di ozono nei precipitatori elettrostatici dipende da diversi parametri, tra cui quelli ambientali, nelle prove eseguite sono stati monitorati temperatura  $T = [^{\circ}\text{C}]$  e umidità  $U = [\%]$  attraverso un igrometro.





*Figura 24 – Postazione prova: ventola*



*Figura 25– Postazione prova: generatore del filtro*

Per meglio rendere l'idea sul funzionamento che è alla base delle prove, si riassume brevemente il percorso dell'aria all'interno della canalizzazione:

- l'aria inizialmente attraversa il filtro, per poi entrare nella canalizzazione;
- l'ossigeno, presente nell'aria per il 21%, si trasforma in ozono a causa del campo elettrico creato dal filtro;
- la concentrazione di ozono viene rilevata dal punto misura, connesso esternamente all'Ozone Monitor;
- infine, l'aria fuoriesce attraverso la ventola, che lavora in aspirazione da dentro la canalizzazione.

Sono state eseguite due tipologie di prove sui filtri a disposizione: prove a breve termine e prove a lungo termine.

Lo scopo di queste prove è quello di interpretare i risultati ottenuti in modo da analizzare il sistema di prova realizzato e dunque capire se:

- risulta stabile;
- dà risultati riproducibili fra le diverse prove eseguite;
- consente di visualizzare le variazioni di risposta in relazione ai cambiamenti delle condizioni di umidità e temperatura, che influiscono per certo sulla concentrazione dell'ozono.

### Prove a breve termine

Per le prove a breve termine la ventola ha lavorato a diverse portate:

- 70 m<sup>3</sup>/h (valore minimo)
- 140 m<sup>3</sup>/h
- 184 m<sup>3</sup>/h

Di seguito verrà descritto più in dettaglio il procedimento delle prove a breve termine.

Nei primi 5 minuti la ventola si mantiene accesa mentre il filtro è spento e si osserva la concentrazione di ozono (O<sub>3</sub>) ambientale.

Successivamente il filtro viene acceso e lo si lascia lavorare per 13 minuti, tempo sufficiente per osservare delle variazioni rispetto alla situazione iniziale ambientale.

Terminato il tempo di lavoro del filtro (13 minuti), quest'ultimo viene spento e per i 5 minuti successivi si acquisisce un ulteriore cambiamento della concentrazione dell'ozono, tornando approssimativamente a quella iniziale, ovvero quella ambientale.

Un elemento preso in considerazione, durante l'esecuzione delle prove e che dai risultati ottenuti sembra influenzare l'andamento generale di ozono prodotto dal filtro, è la presenza o non di corrente con finestre/porte aperte.

Per entrambi i filtri sono state eseguite più prove per ogni portata della ventola.

### Prove a lungo termine

Le prove a lungo termine hanno avuto una durata pari a quattro giorni.

Come per le prove a breve termine, i parametri ambientali presi in considerazione e monitorati sono stati temperatura e umidità.

La ventola ha lavorato in questo periodo ad una portata sempre pari a 70 m<sup>3</sup>/h.

Questa tipologia di prove, che si avvicina maggiormente alle reali condizioni di lavoro del filtro, ha lo scopo di analizzare come quest'ultimo lavora per più giorni in termini di concentrazione di ozono. All'inizio si è registrata la concentrazione di ozono ambientale, mantenendo il filtro spento, poi le due acquisizioni successive, fatte in giornata, hanno avuto una durata pari ad un'ora e trenta minuti intervallate da un periodo di non registrazione.

Durante tutto il pomeriggio e la notte le porte e le finestre dei capannoni sono chiuse, per cui il filtro lavora in condizioni ambientali (temperatura e umidità) diverse rispetto al mattino.

Di conseguenza, oltre alle acquisizioni di un'ora e trenta minuti, nei giorni successivi prima di aprire le porte dei capannoni, per dieci minuti si è registrata la concentrazione di ozono, in modo tale da poter avere un confronto con le acquisizioni effettuate a porte aperte.

#### 4.3.3. Risultati ottenuti

##### 4.3.3.1. Risultati prove a breve termine e considerazioni

Di seguito vengono riportati i grafici ottenuti dalle prove a breve termine.

I due filtri presi in considerazione sono quelli utilizzati nelle prove batch e dunque si distinguono in FILTRO 1 e FILTRO 2.

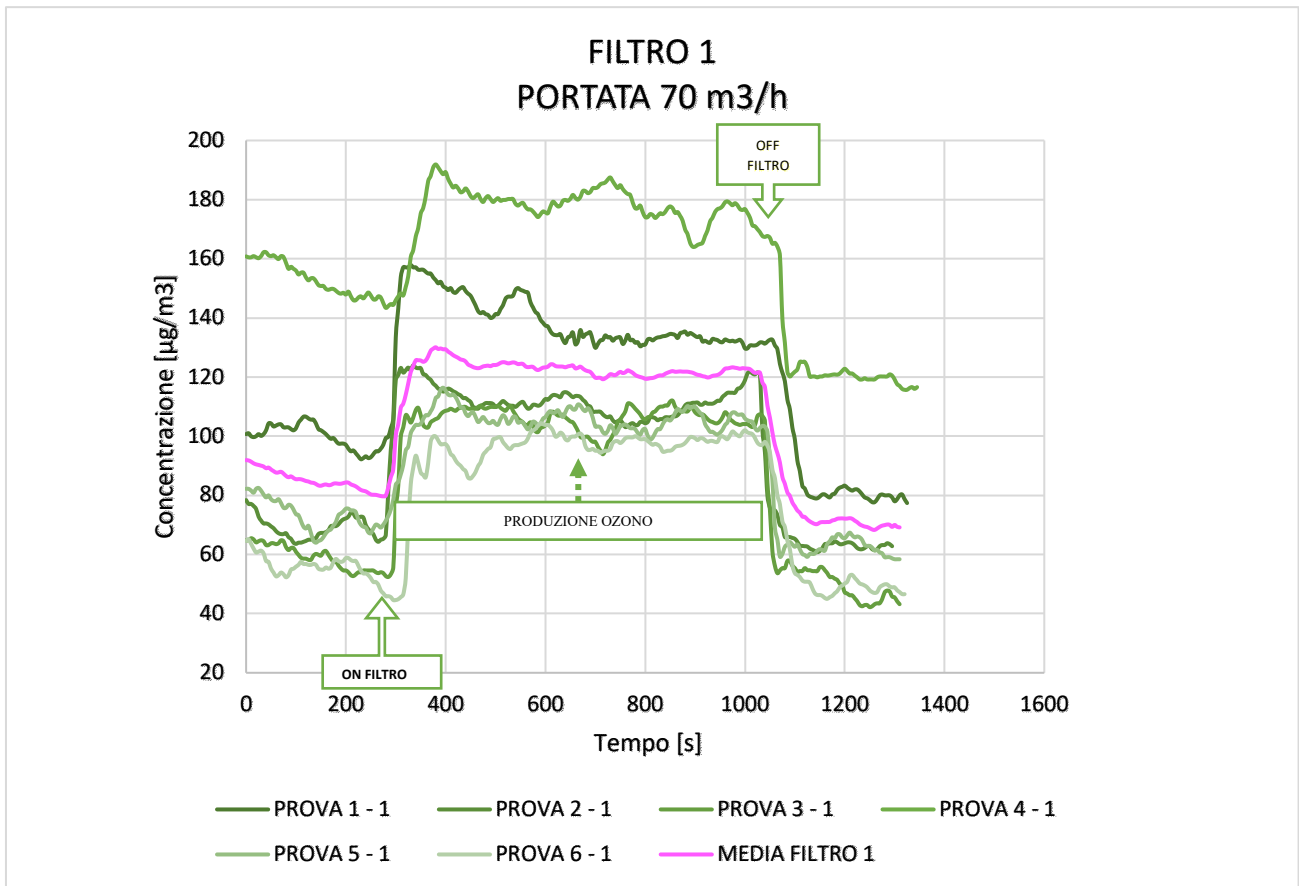


Figura 26 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 70 m<sup>3</sup>/h

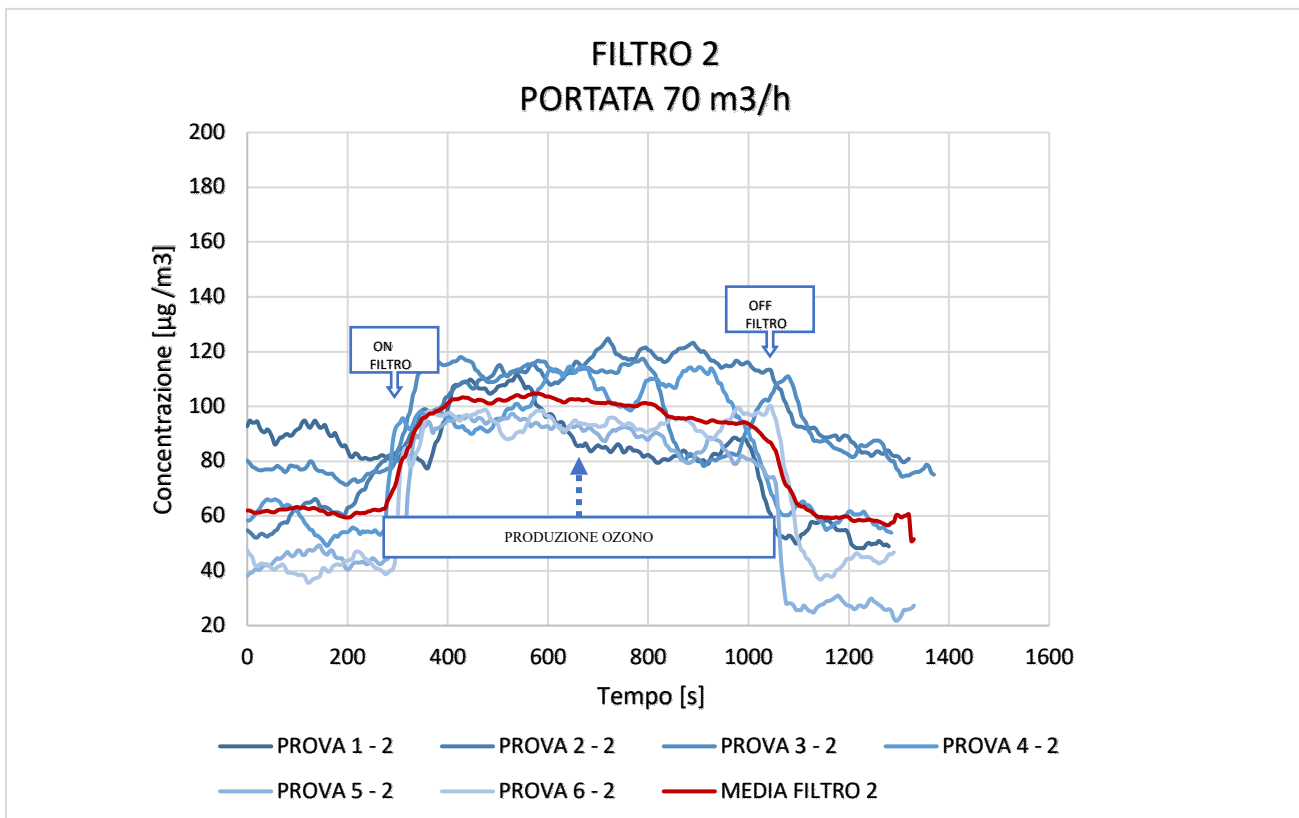


Figura 27 – andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 70 m<sup>3</sup>/h

Nei grafici riportati in figura 26 e 27 sono rappresentate le diverse prove effettuate sui due filtri presi in esame (FILTRO 1 – FILTRO 2) ad una portata della ventola pari a 70 m<sup>3</sup>/h e una relativa media di tutte le prove per individuare in modo più chiaro l'andamento generale della concentrazione di ozono. Nei primi minuti di prova, con filtro spento, si nota una concentrazione di ozono ambientale più o meno stabile.

Dopo l'accensione del filtro si ha un evidente aumento della concentrazione di ozono.

Il salto che si può individuare subito dopo l'accensione dell'elemento filtrante risulta essere differente nei due filtri: infatti nel FILTRO 1 esso risulta essere maggiore rispetto a quello del FILTRO 2. Da questi primi risultati si nota come il sistema di prova realizzato fa emergere che il primo filtro produce una quantità di ozono maggiore rispetto al secondo, risultato riscontrato nelle prove batch.

<b>PORTATA 70 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>PROVA</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDITA' (%)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro spento (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro acceso (µg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>FILTRO 1</i>	1	30	70	≈ 97	≈ 160
<i>FILTRO 2</i>	1	30	68	≈ 80	≈ 105
<i>FILTRO 1</i>	2	30	66	≈ 65	≈ 120
<i>FILTRO 2</i>	2	30	70	≈ 80	≈ 120
<i>FILTRO 1</i>	3	30	65	≈ 53	≈ 110
<i>FILTRO 2</i>	3	30	73	≈ 70	≈ 110
<i>FILTRO 1</i>	4	30	70	≈ 143	≈ 180
<i>FILTRO 2</i>	4	30	45	≈ 53	≈ 110
<i>FILTRO 1</i>	5	25	65	≈ 70	≈ 110
<i>FILTRO 2</i>	5	26	62	≈ 46	≈ 85
<i>FILTRO 1</i>	6	25	65	≈ 46	≈ 100
<i>FILTRO 2</i>	6	26	62	≈ 40	≈ 90

*Tabella 4 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 70 m<sup>3</sup>/h)*

Nella tabella precedente sono riportati i valori delle concentrazioni di ozono, a filtro spento e a filtro acceso, delle prove effettuate ad una portata pari a 70 m<sup>3</sup>/h con i relativi parametri ambientali monitorati.

Mettendo a confronto, per esempio, la PROVA 1 - 1 con la PROVA 1 - 2, riportate rispettivamente in figura 26 e 27, risulta evidente la differenza di concentrazione presente nella canalizzazione a filtro spento e a filtro acceso.

Nella PROVA 1 - 1 la temperatura registrata è di  $T=30^{\circ}\text{C}$  mentre l'umidità è pari a  $U=70\%$ .

Nella PROVA 1 - 2 la temperatura registrata è di  $T=30^{\circ}\text{C}$  mentre l'umidità è pari a  $U=68\%$ .

Nonostante le condizioni ambientali, in termini di temperatura ed umidità, tra le due prove siano simili, le concentrazioni di ozono prodotte dai due filtri sono differenti.

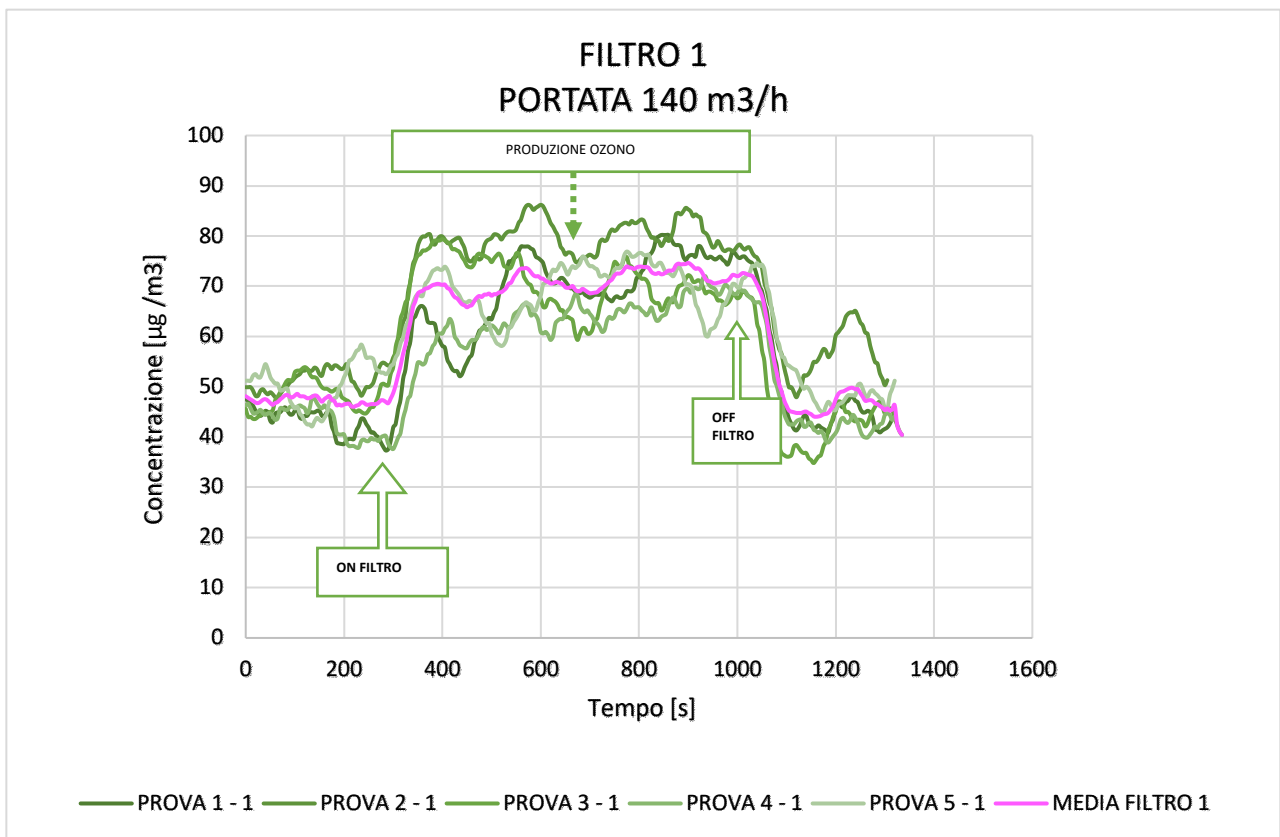
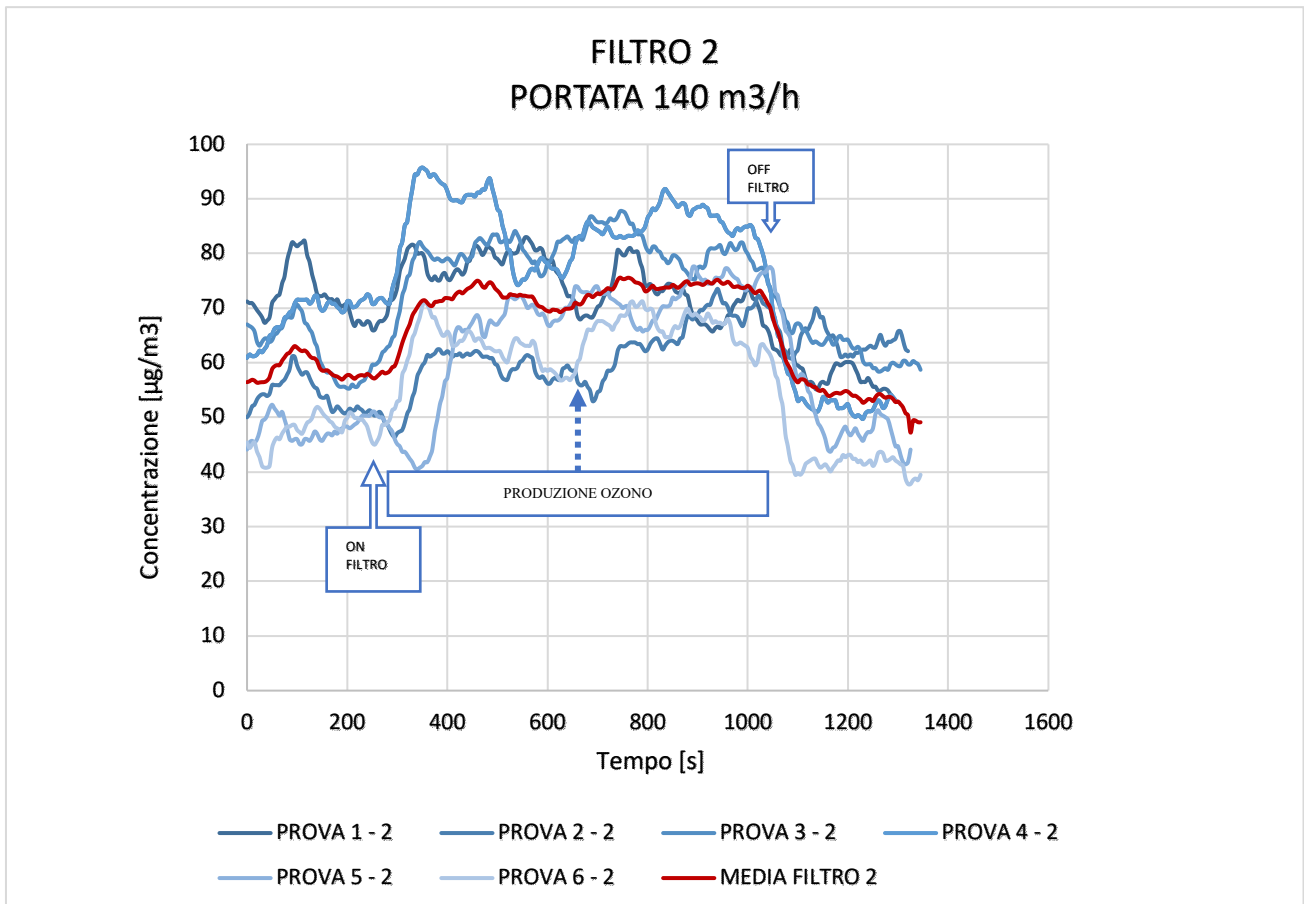


Figura 28 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 140 m<sup>3</sup>/h



*Figura 29 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 140 m<sup>3</sup>/h*

Le prove eseguite con una portata pari a 140 m<sup>3</sup>/h mostrano durante l'accensione dell'elemento filtrante un andamento della concentrazione di ozono meno stabile rispetto alle prove precedenti ad una portata pari a 70 m<sup>3</sup>/h.

Nei due grafici della figura 28 e della figura 29 sono riportate le medie di tutte le prove effettuate; da quest'ultime è possibile percepire una differenza di concentrazione di ozono nei due filtri.

Nella tabella successiva, attraverso i dati numerici, si può notare, anche se minima, questa differenza.

<b>PORTATA 140 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>PROVA</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDITA' (%)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro spento (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro acceso (µg/m<sup>3</sup>)</b>
FILTRO 1	1	30	70	≈ 37	≈ 78
FILTRO 2	1	30	70	≈ 66	≈ 80
FILTRO 1	2	30	65	≈ 54	≈ 86
FILTRO 2	2	30	65	≈ 49	≈ 60
FILTRO 1	3	30	60	≈ 50	≈ 80
FILTRO 2	3	30	65	≈ 60	≈ 80
FILTRO 1	4	25	65	≈ 40	≈ 70
FILTRO 2	4	30	45	≈ 70	≈ 90
FILTRO 1	5	26	66	≈ 53	≈ 75
FILTRO 2	5	26	55	≈ 48	≈ 70
FILTRO 2	6	26	55	≈ 50	≈ 70

Tabella 5 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 140 m<sup>3</sup>/h)

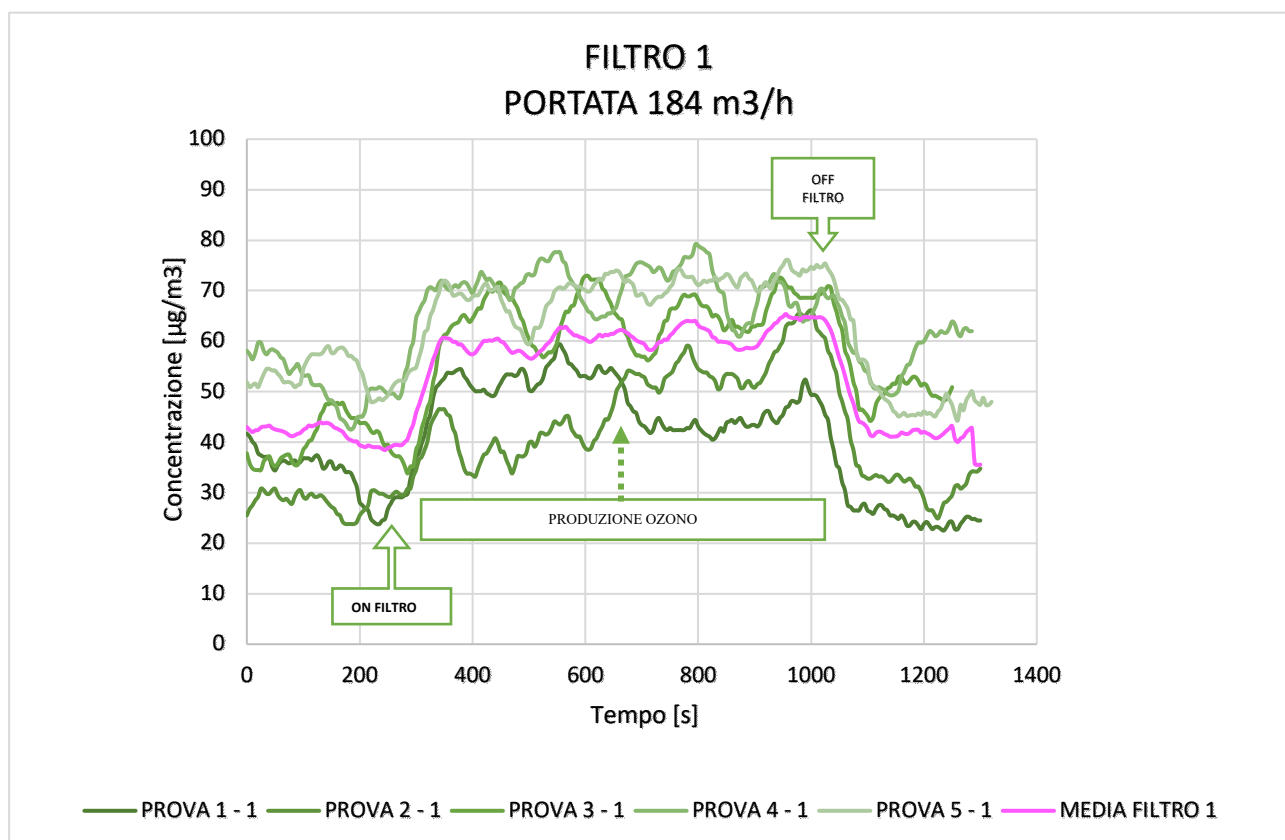


Figura 30 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 184 m<sup>3</sup>/h



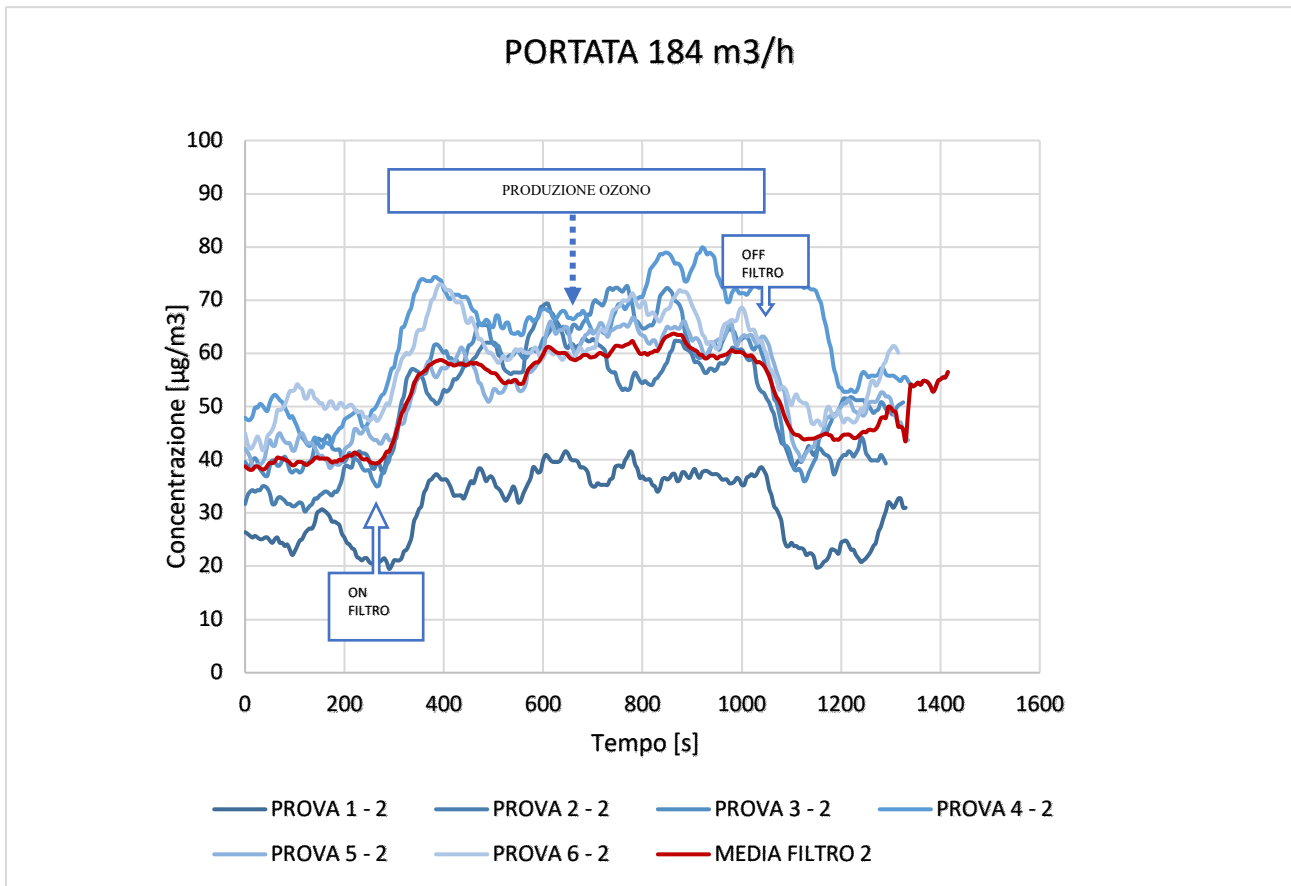


Figura 31 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 184 m<sup>3</sup>/h

<b>PORTATA 184 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>PROVA</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDITA' (%)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro spento (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentrazione ozono con filtro acceso (µg/m<sup>3</sup>)</b>
FILTRO 1	1	30	54	≈ 30	≈ 60
FILTRO 2	1	30	55	≈ 21	≈ 40
FILTRO 1	2	30	49	≈ 30	≈ 50
FILTRO 2	2	30	50	≈ 40	≈ 60
FILTRO 1	3	30	47	≈ 35	≈ 70
FILTRO 2	3	30	50	≈ 37	≈ 65
FILTRO 1	4	26	65	≈ 50	≈ 77
FILTRO 2	4	30	50	≈ 50	≈ 70
FILTRO 1	5	26	65	≈ 53	≈ 70
FILTRO 2	5	26	55	≈ 44	≈ 65
FILTRO 2	6	26	55	≈ 50	≈ 70

Tabella 6 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 184 m<sup>3</sup>/h)

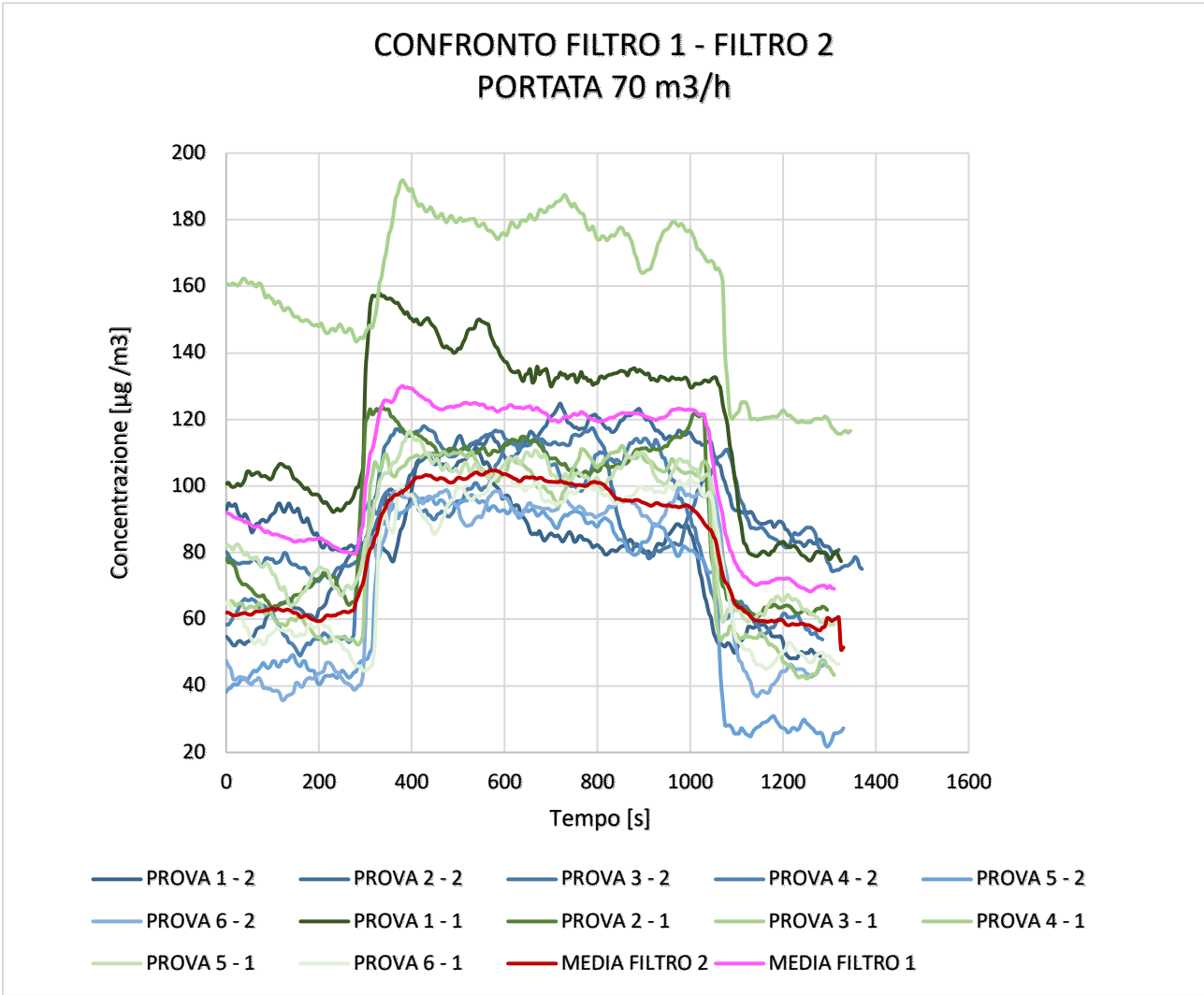


Figura 32 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1- FILTRO 2 con portata pari a 70 m<sup>3</sup>/h

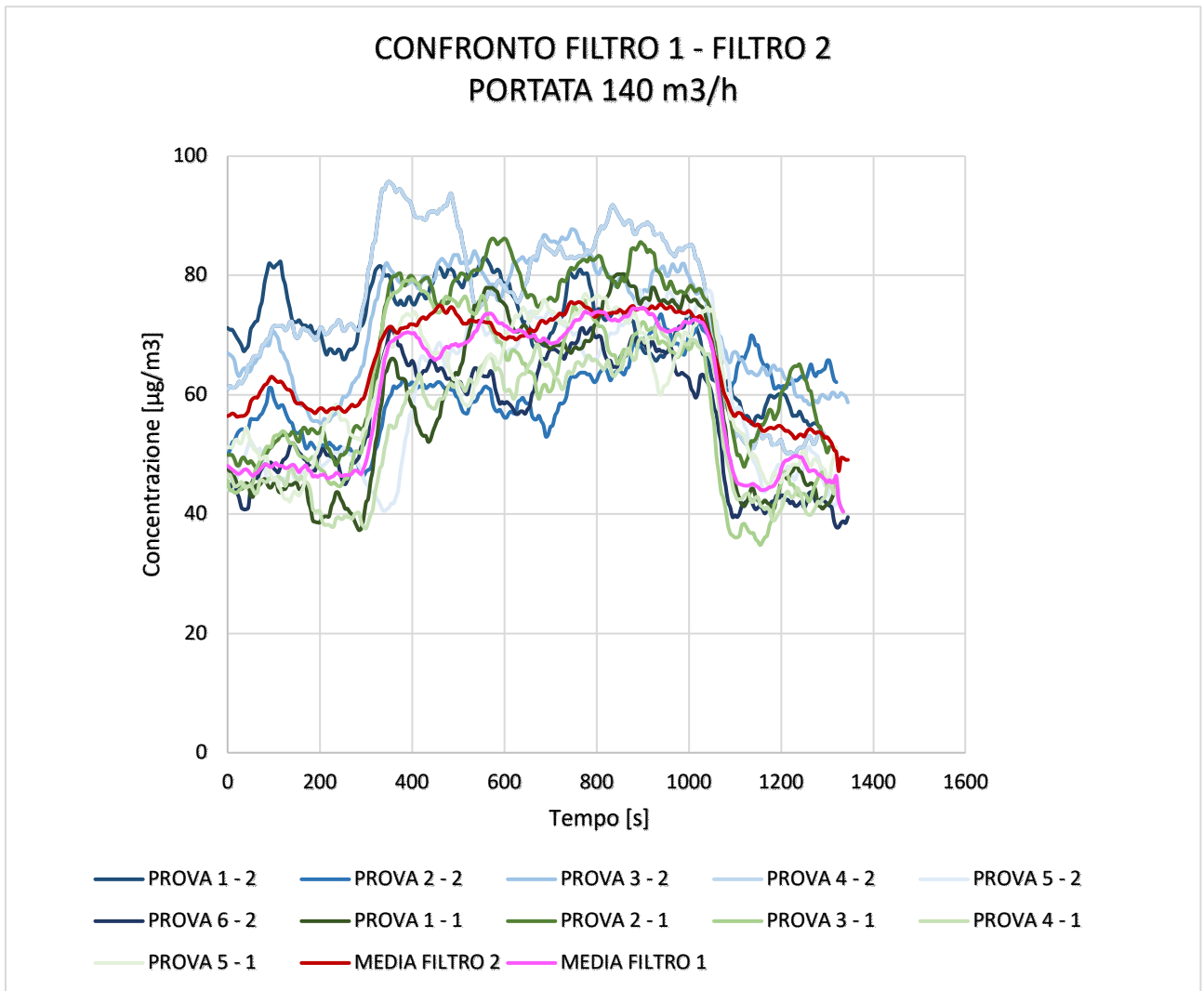
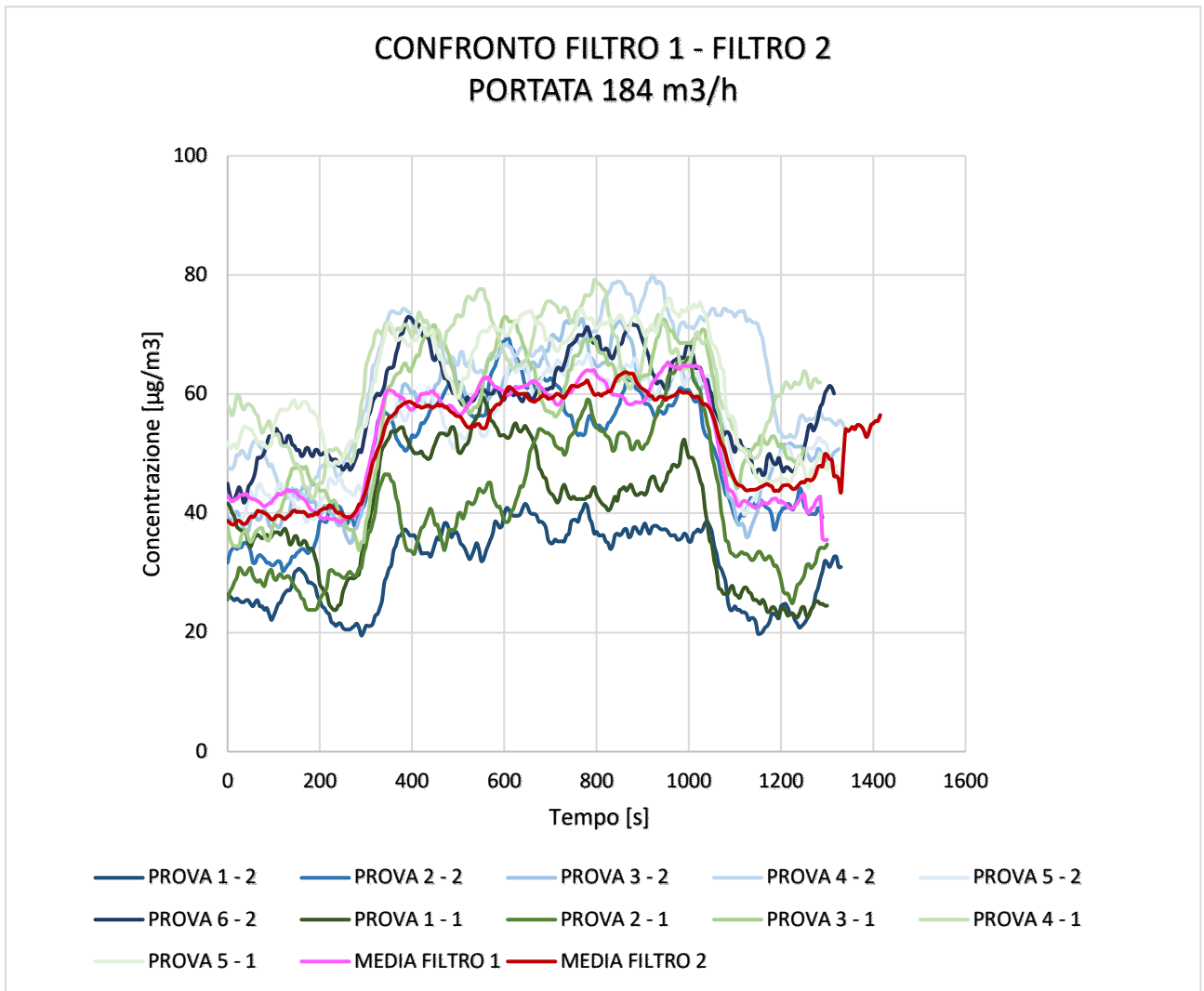


Figura 33 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1 – FILTRO 2 con portata pari a 140 m<sup>3</sup>/h



*Figura 34 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1 – FILTRO 2 con portata pari a 184 m<sup>3</sup>/h*

#### 4.3.3.2. Risultati prove a lungo termine e considerazioni

Le prove a lungo termine hanno avuto una durata pari a quattro giorni.

I due filtri sono stati mantenuti accesi insieme alla ventola, la quale lavorava ad una portata costante e pari a 70 m<sup>3</sup>/h.

Sono state effettuate diverse acquisizioni con durate differenti:

- Un'ora (porte aperte);
- Trenta minuti (porte aperte);
- Quindici minuti (dieci minuti a porte chiuse e cinque minuti a porte aperte).

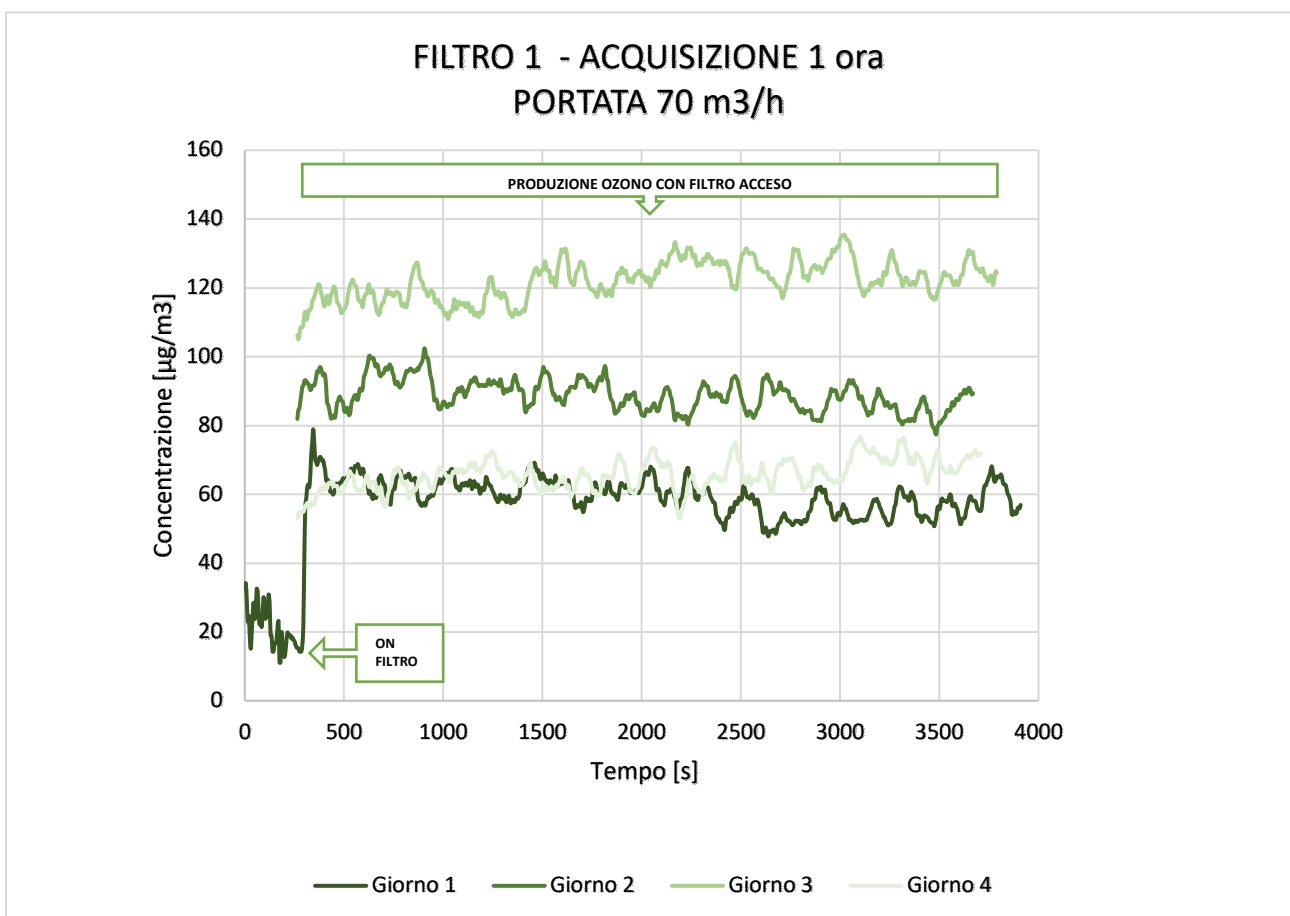


Figura 35 – Andamento prove a lungo termine FILTRO 1 (Acquisizione un'ora)

Dal grafico riportato sopra si nota, nel Giorno 1, una variazione della concentrazione dell'ozono dovuto all'accensione del filtro.

Prima del funzionamento di quest'ultimo, l'Ozone Monitor rileva una concentrazione di ozono che risulta essere quella ambientale, successivamente questa concentrazione aumenta fino ad arrivare ad un valore che si mantiene più o meno stabile fino alla fine della registrazione.

Dalla tabella sotto riportata si percepisce come tra un giorno e l'altro la concentrazione dell'ozono non si mantiene costante, nonostante le condizioni ambientali siano molto simili tra loro, in termini sia di temperatura che di umidità.

FILTRO 1	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE FILTRO SPENTO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CONCENTRAZIONE FILTRO ACCESO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Giorno 1	26	60	15	$\approx 65$
Giorno 2	28	55	-	$\approx 90$
Giorno 3	26	65	-	$\approx 120$
Giorno 4	26	55	-	$\approx 65$

Tabella 7 – Valori prove a lungo termine FILTRO 1 (acquisizione un'ora)

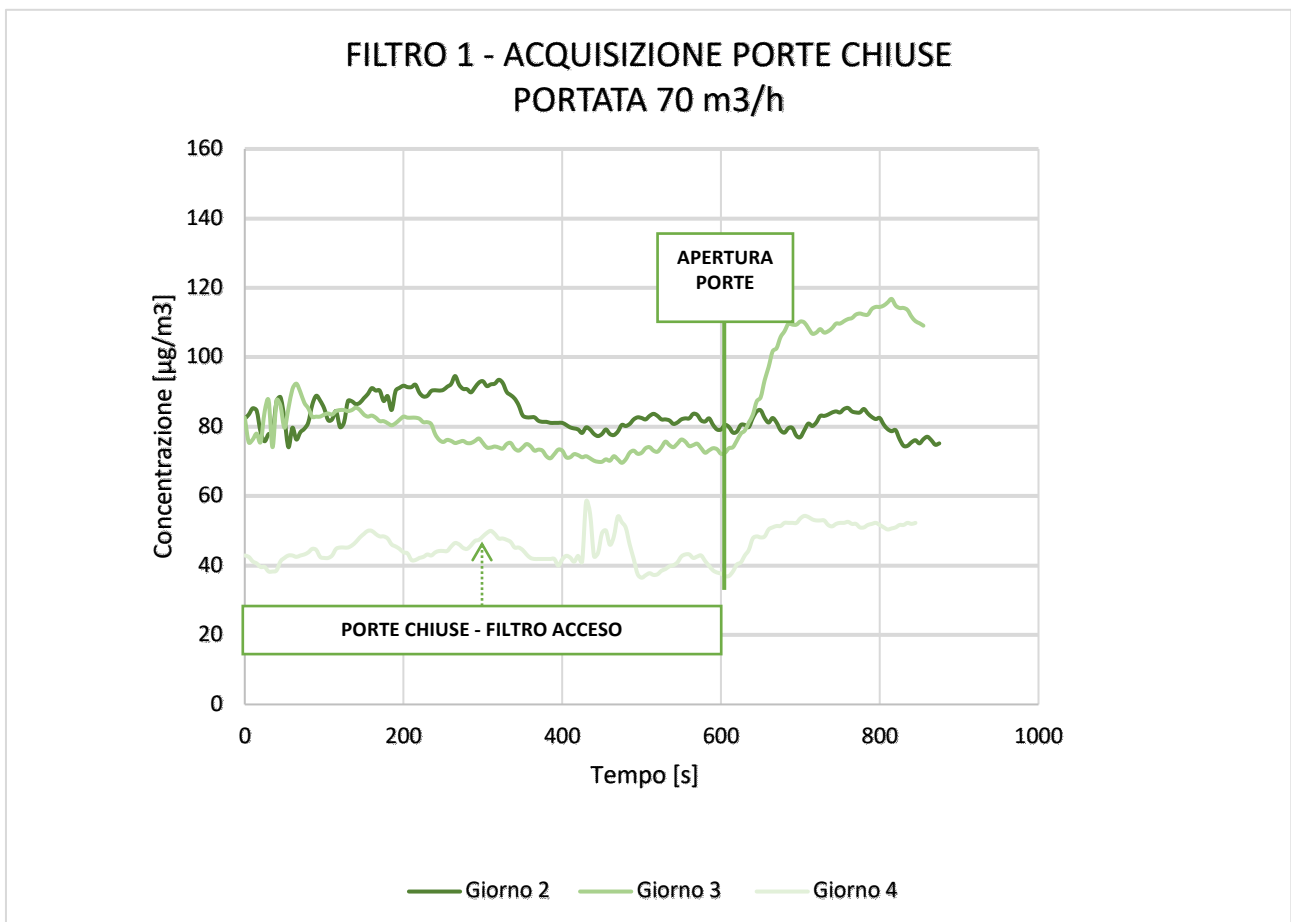


Figura 36 – Andamento concentrazione ozono porte chiuse FILTRO 1 (prove lungo termine)

Nel grafico riportato sopra, figura 36, dopo l'apertura delle porte si individua, in particolare nelle curve del giorno 3 e del giorno 4, un aumento della concentrazione dell'ozono. Il filtro, dunque, durante la notte lavora in condizioni ambientali differenti rispetto al mattino in cui si fanno le acquisizioni. Infatti, i parametri di temperatura e umidità monitorati nell'ambiente a porte chiuse sono differenti rispetto a quando c'è un ricircolo d'aria con l'esterno, ovvero quando le porte sono aperte.

FILTRO 1	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE PORTE CHIUSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CONCENTRAZIONE PORTE APERTE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Giorno 2	26	62	$\approx 80$	$\approx 80$
Giorno 3	26	65	$\approx 75$	$\approx 110$
Giorno 4	26	60	$\approx 36$	$\approx 52$

Tabella 8 – Valori porte chiuse, prove a lungo termine FILTRO 1

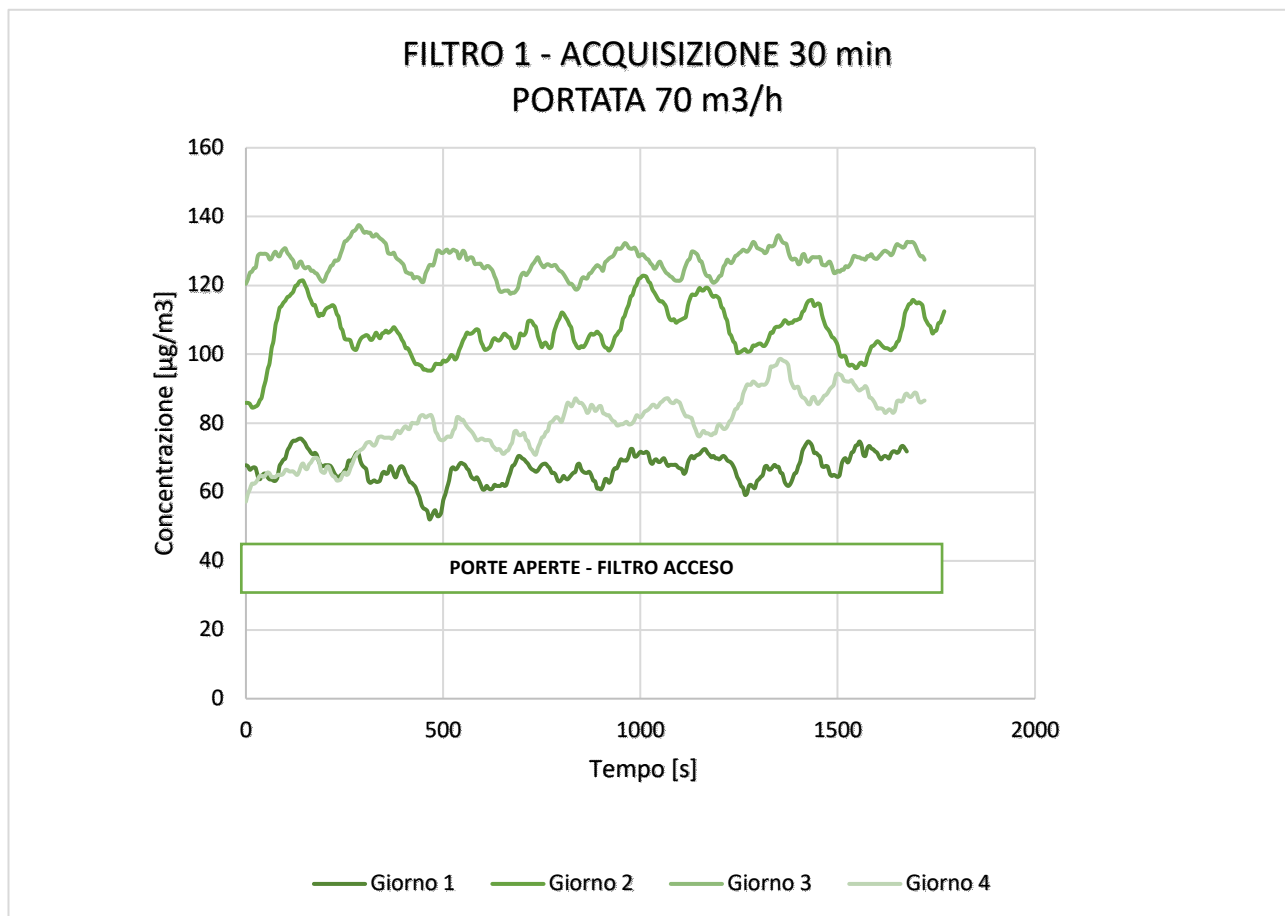


Figura 37 - Andamento concentrazione ozono acquisizione trenta minuti FILTRO 1 (prove lungo termine)



FILTRO 1	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE PORTE APERTE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Giorno 1	26	55	$\approx 70$
Giorno 2	28	55	$\approx 110$
Giorno 3	26	65	$\approx 130$
Giorno 4	26	55	$\approx 80$

Tabella 9 – Valori prove a lungo termine, FILTRO 1 (acquisizione trenta minuti)

Come si può osservare sia dal grafico in figura 37 che dalla tabella 9, nel Giorno 4 la concentrazione di ozono, durante l'acquisizione di durata pari a trenta minuti, aumenta quando si percepisce un aumento di corrente evidente.

Infatti, il valore di concentrazione a cui tende è pari circa a  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; mentre si può notare in figura 35 e in tabella 7 che la concentrazione di ozono, nel giorno 4, durante l'acquisizione di durata pari ad un'ora è pari a circa  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

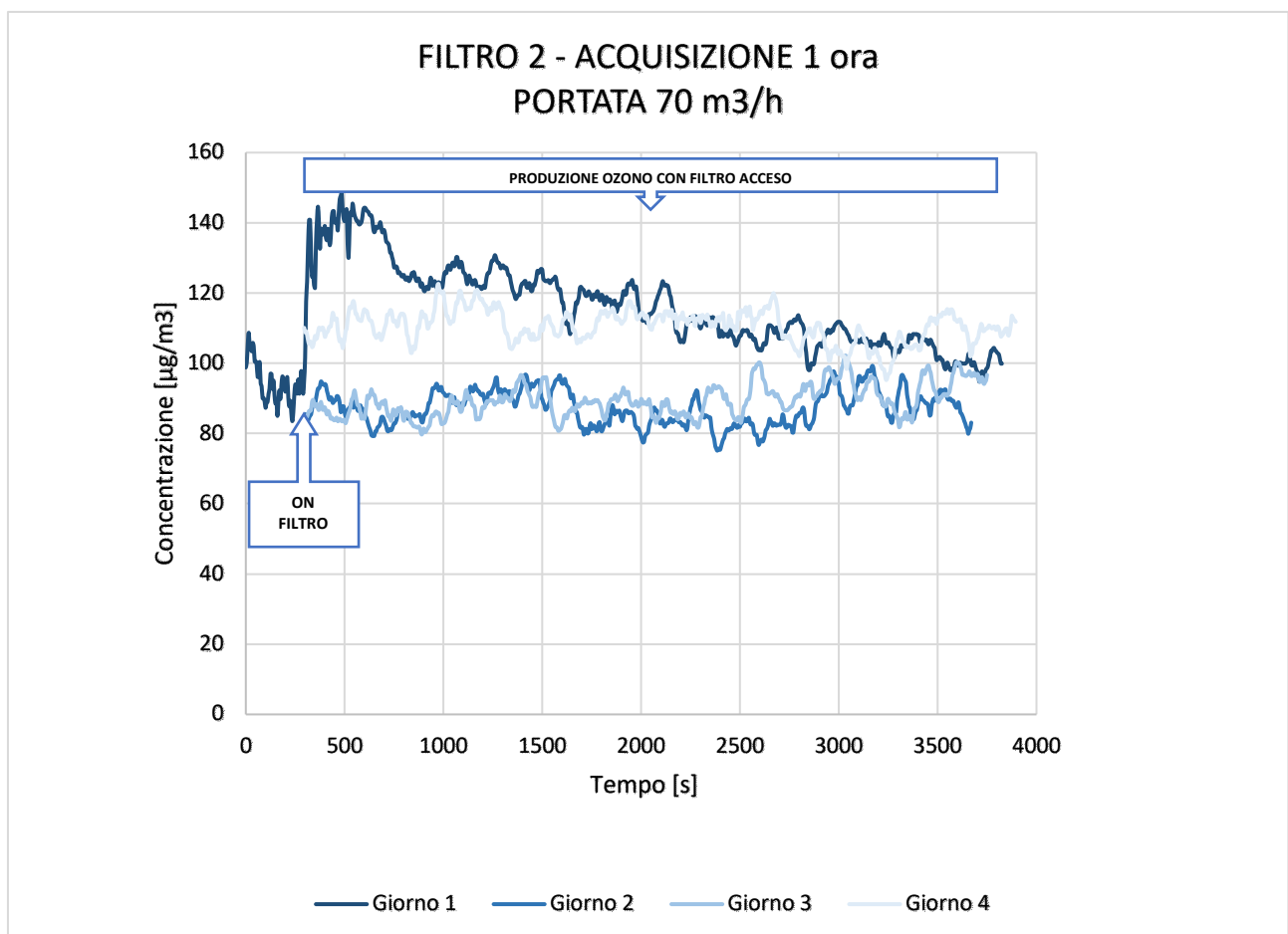


Figura 38 – Andamento prove a lungo termine FILTRO 2 (Acquisizione un'ora)

Nel grafico della figura 38 è possibile notare, nella curva del Giorno 1, la variazione di concentrazione dell'ozono dovuta all'accensione del filtro.

Il salto risulta essere meno evidente rispetto a quello della figura 35 riferito al FILTRO 1.

A differenza del primo filtro, nel FILTRO 2 la concentrazione dell'ozono tra un giorno e l'altro non subisce grandi variazioni.

FILTRO 2	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE FILTRO SPENTO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CONCENTRAZIONE FILTRO ACCESO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Giorno 1	27	66	95	$\approx 120$
Giorno 2	29	64	-	$\approx 90$
Giorno 3	29	63	-	$\approx 85$
Giorno 4	29	65	-	$\approx 115$

*Tabella 10 – Valori prove a lungo termine FILTRO 2*

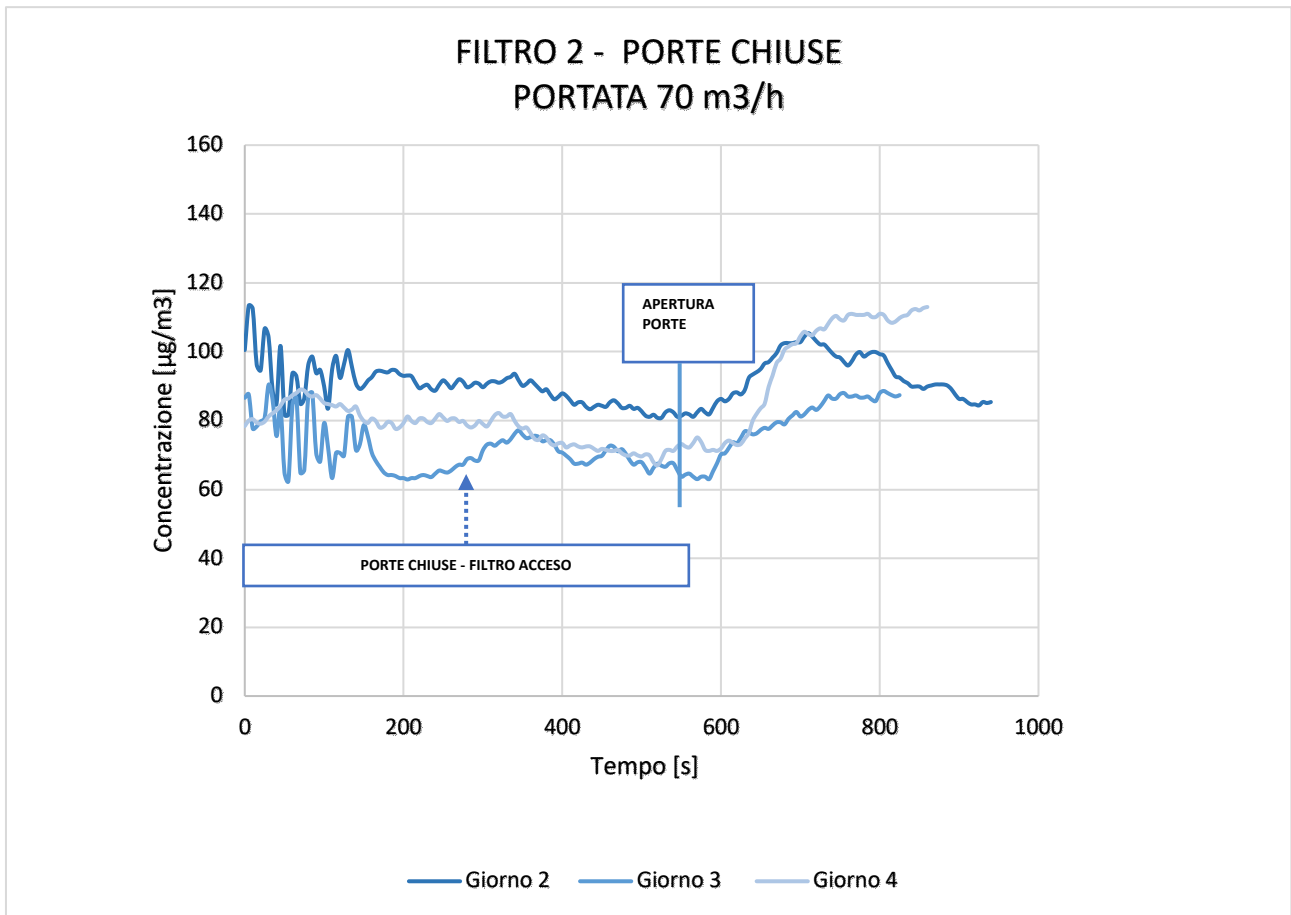


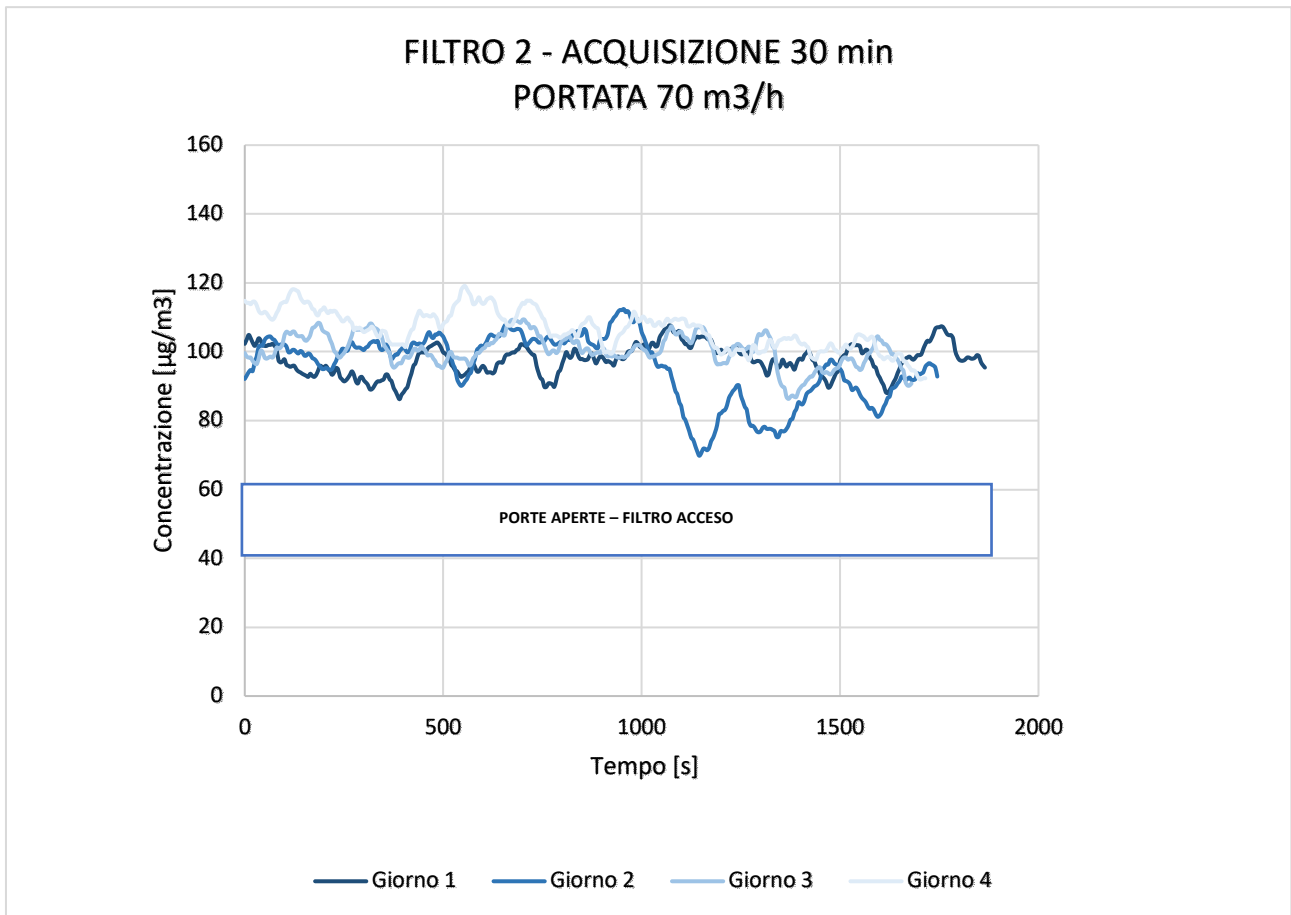
Figura 39 – Andamento concentrazione ozono porte chiuse FILTRO 2 (prove lungo termine)

Come per il FILTRO 1, anche per il secondo filtro, dopo l'apertura delle porte, si ha un aumento di concentrazione dell'ozono che tende ad avvicinarsi al valore che poi si rileva nelle acquisizioni di durata pari ad un'ora.

Questo andamento, che si ripete per entrambe le prove, può essere giustificato dal fatto che le condizioni di umidità e temperatura con le porte chiuse sono diverse rispetto a quelle che si hanno con le porte aperte.

FILTRO 2	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE PORTE CHIUSE (µg/m3)	CONCENTRAZIONE PORTE APERTE(µg/m3)
Giorno 2	29	65	≈85	≈100
Giorno 3	29	63	≈ 65	≈87
Giorno 4	29	62	≈75	≈113

Tabella 11 – Valori porte chiuse, prove a lungo termine FILTRO 2

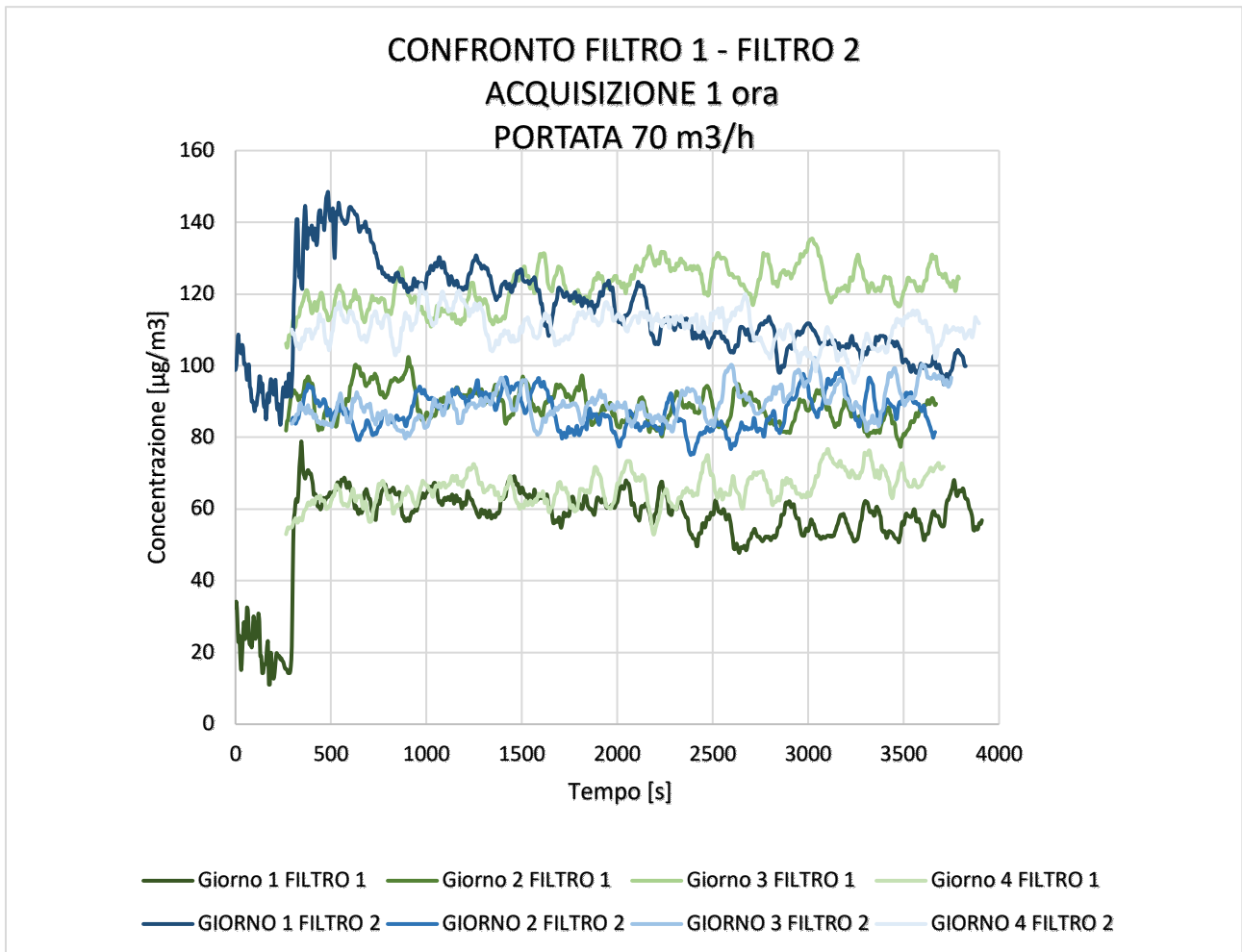


*Figura 40 – Andamento concentrazione ozono, acquisizione trenta minuti FILTRO 2 (prove lungo termine)*

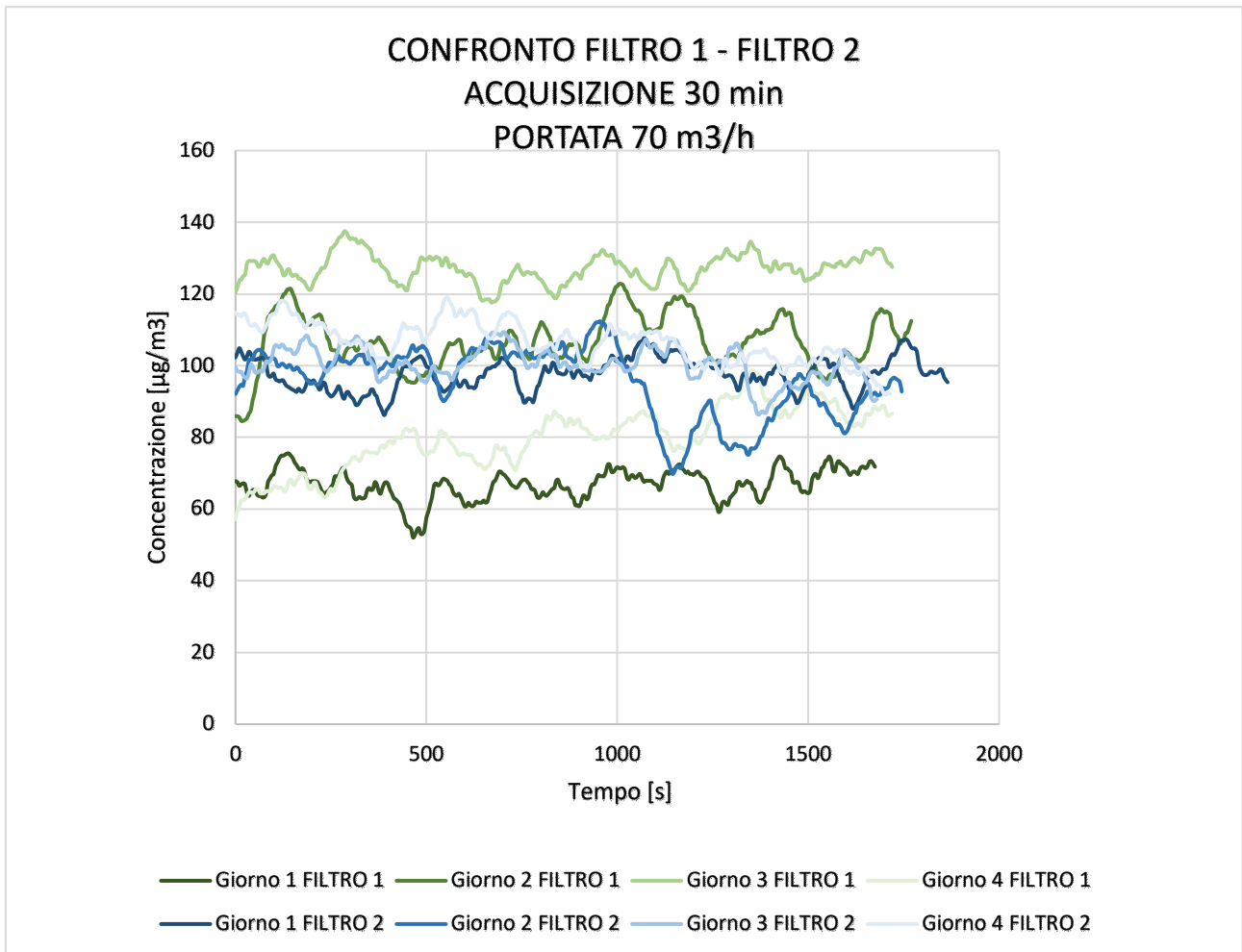
Per il FILTRO 2 si può notare come nell'acquisizione di durata pari a trenta minuti, il valore della concentrazione di ozono risulta essere quasi del tutto stabile nei quattro giorni di acquisizione.

FILTRO 2	TEMPERATURA (°C)	UMIDITA' (%)	CONCENTRAZIONE PORTE APERTE(µg/m <sup>3</sup> )
Giorno 1	29	64	≈100
Giorno 2	29	65	≈100
Giorno 3	29	63	≈105
Giorno 4	29	65	≈110

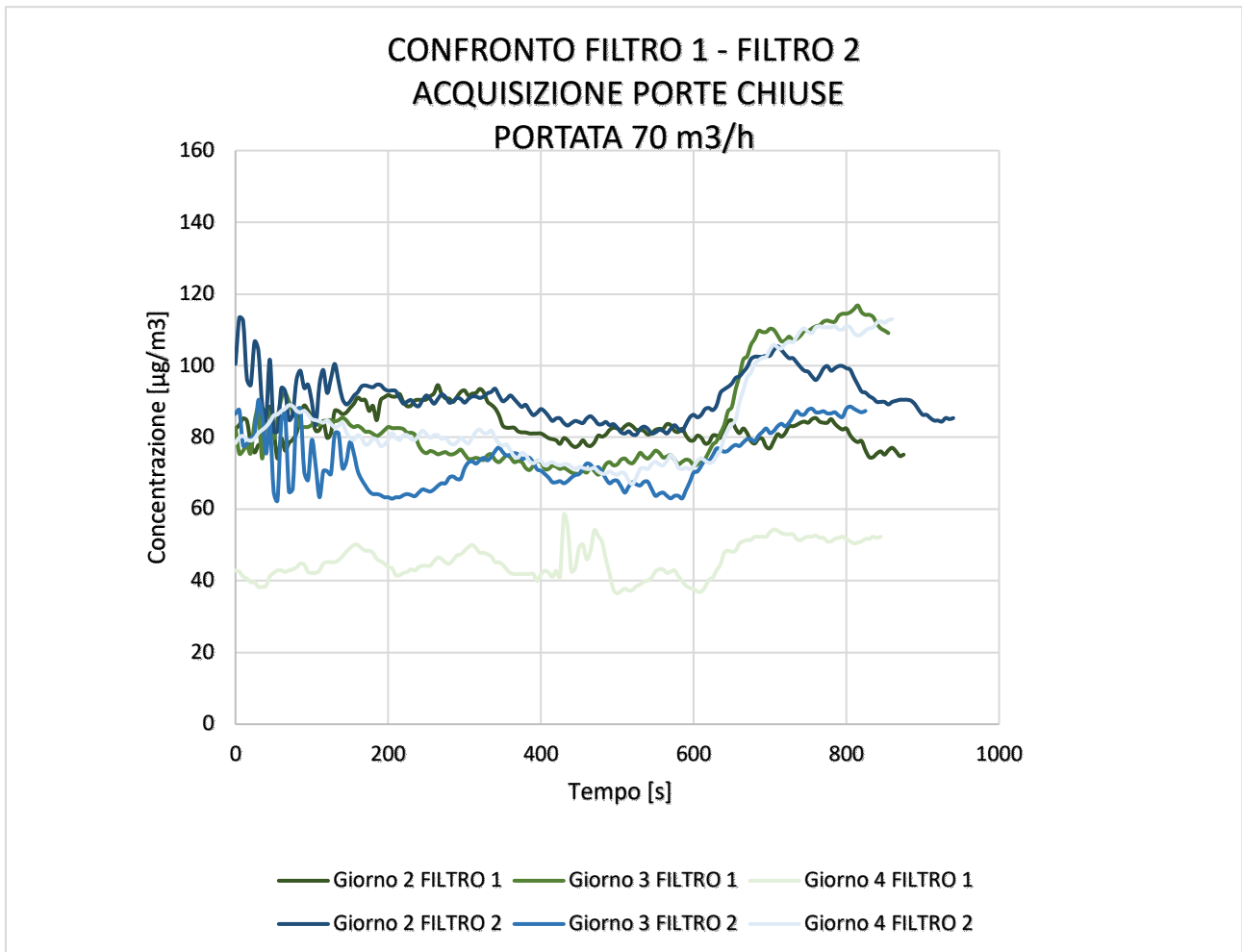
*Tabella 12 – Valori prove a lungo termine, FILTRO 2 (acquisizione trenta minuti)*



*Figura 41 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione con durata pari ad un'ora*



*Figura 42 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione con durata pari a trenta minuti*



*Figura 43 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione effettuata a porte chiuse*



## 5 Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di studiare, attraverso delle prove effettuate su i due filtri elettrostatici, un nuovo sistema di prova, in configurazione plug-flow, progettato e realizzato con lo scopo di avvicinarsi il più possibile ad una situazione lavorativa reale di questi elementi filtranti.

Difatti, come già detto, una delle applicazioni che l'elettrofiltro ha nella realtà è quella di essere utilizzato all'interno delle canalizzazioni degli impianti di climatizzazione per ridurre gli agenti inquinanti di varia natura presenti in esse prima di immettere l'aria nei canali.

Dalle prove che sono state effettuate e dai risultati ottenuti, sia a breve termine sia a lungo termine, si può constatare come questa canalizzazione è un sistema di prova che risponde alle variazioni di temperatura ed umidità e permette di individuare un diverso comportamento dei due filtri in termini di produzione di ozono.

Inoltre, dai grafici ottenuti è possibile riscontrare una riproducibilità tra le diverse prove, effettuate a breve termine, ma soprattutto un andamento della concentrazione di ozono, a filtro acceso, quasi del tutto costante, soprattutto nelle prove eseguite ad una portata della ventola pari a  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ .

I grafici relativi alle prove svolte con una portata pari a  $140 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $184 \text{ m}^3/\text{h}$  mostrano un andamento simile a quello che si ottiene con una portata minore; ovvero si ha una concentrazione di ozono inizialmente prossima a quella ambientale e successivamente, con l'accensione del filtro, questa aumenta fino a raggiungere un valore costante che si protrae fino a quando l'elemento filtrante non viene spento.

Dalle analisi effettuate in configurazione batch è emerso che il FILTRO 1 produce una maggiore quantità di ozono rispetto al FILTRO 2.

Nelle prove effettuate nel nuovo sistema di prova questo risultato, seppur in maniera meno evidente, è stato riscontrato nuovamente.

Risulta necessario precisare che nelle prove in configurazione plug-flow questa differenza, in termini di produzione di ozono tra i due filtri, risulta essere meno visibile e chiara rispetto alle prime prove realizzate in configurazione batch, dove le piastre di raccolta dei due elementi filtranti erano pulite e prive di particelle.

Dunque, questo risultato può essere legato al fatto che nelle piastre di raccolta, durante il periodo di lavorazione, si è creato inevitabilmente uno strato di particelle che non permette di visualizzare una differenza tra i due filtri.

In relazione a quanto detto, potrebbe essere opportuno effettuare dei lavaggi in modo da riportare allo stato vergine i due elettrofiltri e successivamente acquisire i dati per capire se questa differenza, in termini di ozono, tra i due elettrofiltri risulta essere più evidente.

Come è stato già precisato nelle descrizioni delle prove eseguite a breve termine, l'elemento filtrante durante l'acquisizione non è sempre acceso ma lavora per un intervallo di tempo finito.

Per cui, inizialmente l'Ozone Monitor rileva una concentrazione di ozono ambientale.

Nel periodo di accensione, il filtro crea un campo elettrico tra due elettrodi nel quale le particelle cariche sono forzate a muoversi in direzione di un elettrodo collettore; le tensioni elevate con cui si alimentano gli elettrodi, ionizzando l'aria, danno origine a reazioni che producono gas indesiderati, in particolare l'ozono.

Ragion per cui il risultato che si attendeva era quello di rilevare, nel periodo di accensione del filtro, una concentrazione di ozono, presente nella canalizzazione, più alta rispetto a quella iniziale.

I risultati che sono stati ottenuti dalle diverse prove hanno confermato quanto ci si aspettava.

Inoltre, durante le prove si è osservato che il sistema risponde anche a variazioni di corrente; dopo aver acceso il filtro ed aver assistito ad un salto della concentrazione di ozono, si raggiunge una situazione quasi costante ma non del tutto; infatti, a volte si può osservare degli aumenti di concentrazione forse dovuti ad una corrente d'aria più evidente che va ad influenzare il lavoro del filtro e dunque si può pensare che una maggiore quantità d'aria, che attraversa il filtro elettrostatico, potrebbe provocare una maggiore produzione di ozono.

Questo sistema di prova ha necessariamente bisogno di miglioramenti costruttivi e ulteriori test prima di giungere a risultati definitivi.

## Indice delle figure

Figura 1 - Principio di funzionamento elettrofiltro .....	5
Figura 2 – Rappresentazione molecolare ozono (O <sub>3</sub> ). .....	9
Figura 3 - Formazione ozono atmosferico .....	12
Figura 4 - Formula della reazione chimica .....	12
Figura 5 – Schema della produzione dell'effetto corona .....	14
Figura 6 – Filtro elettrostatico in esame.....	16
Figura 7 - Alimentazione filtro .....	17
Figura 8 – Ozone Monitor model 450.....	18
Figura 9 – Schema di funzionamento dell'Ozone Monitor model 450.....	19
Figura 10 - Schematizzazione di un reattore batch.....	19
Figura 11 – Allestimento prova .....	23
Figura 12 – Andamento della concentrazione di ozono prodotto dal FILTRO 1 .....	24
Figura 13 – Andamento della concentrazione di ozono prodotto dal FILTRO 2 .....	24
Figura 14 – Confronto dell'andamento della concentrazione di ozono prodotta tra i due filtri .....	25
Figura 15 – Schematizzazione di un reattore plug-flow .....	26
Figura 16 – Sezione trasversale canalizzazione.....	30
Figura 17 – Rappresentazione canalizzazione .....	30
Figura 18 – Interno della canalizzazione .....	31
Figura 19 – Canalizzazione assemblata .....	31
Figura 20 – Ventola protetta da una rete metallica .....	32
Figura 21 – Interno della canalizzazione rivestito con carta di alluminio .....	33
Figura 22– Interno della canalizzazione vista dall'alto .....	34
Figura 23 – Postazione prova.....	35
Figura 24 – Postazione prova: ventola.....	36
Figura 25– Postazione prova: generatore del filtro.....	36
Figura 26 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 70 m <sup>3</sup> /h .....	39
Figura 27 – andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 70 m <sup>3</sup> /h .....	39
Figura 28 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 140 m <sup>3</sup> /h .....	41
Figura 29 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 140 m <sup>3</sup> /h .....	42
Figura 30 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 1 con portata pari a 184 m <sup>3</sup> /h .....	43
Figura 31 – Andamento concentrazione ozono FILTRO 2 con portata pari a 184 m <sup>3</sup> /h .....	44
Figura 32 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1- FILTRO 2 con portata pari a 70 m <sup>3</sup> /h.....	45

Figura 33 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1 – FILTRO 2 con portata pari a 140 m <sup>3</sup> /h .....	46
Figura 34 – Confronto andamento concentrazione ozono FILTRO 1 – FILTRO 2 con portata pari a 184 m <sup>3</sup> /h .....	47
Figura 35 – Andamento prove a lungo termine FILTRO 1 (Acquisizione un’ora) .....	48
Figura 36 – Andamento concentrazione ozono porte chiuse FILTRO 1 (prove lungo termine) .....	49
Figura 37 - Andamento concentrazione ozono acquisizione trenta minuti FILTRO 1 (prove lungo termine) .....	50
Figura 38 – Andamento prove a lungo termine FILTRO 2 (Acquisizione un’ora) .....	51
Figura 39 – Andamento concentrazione ozono porte chiuse FILTRO 2 (prove lungo termine) .....	53
Figura 40 – Andamento concentrazione ozono, acquisizione trenta minuti FILTRO 2 (prove lungo termine) .....	54
Figura 41 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione con durata pari ad un’ora .....	55
Figura 42 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione con durata pari a trenta minuti .....	56
Figura 43 – Confronto delle due prove a lungo termine (FILTRO 1 – FILTRO 2) acquisizione effettuata a porte chiuse .....	57

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Principali caratteristiche dell’ozono.....	9
Tabella 2 – Legenda.....	28
Tabella 3 – Compatibilità di alcuni materiali con l’ozono.....	29
Tabella 4 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 70 m <sup>3</sup> /h) .....	40
Tabella 5 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 140 m <sup>3</sup> /h) .....	43
Tabella 6 – Valori di concentrazione di ozono a filtro acceso e spento (portata 184 m <sup>3</sup> /h) .....	44
Tabella 7 – Valori prove a lungo termine FILTRO 1 (acquisizione un’ora) .....	49
Tabella 8 – Valori porte chiuse, prove a lungo termine FILTRO 1 .....	50
Tabella 9 – Valori prove a lungo termine, FILTRO 1 (acquisizione trenta minuti) .....	51
Tabella 10 – Valori prove a lungo termine FILTRO 2 .....	52
Tabella 11 – Valori porte chiuse, prove a lungo termine FILTRO 2.....	53
Tabella 12 – Valori prove a lungo termine, FILTRO 2 (acquisizione trenta minuti) .....	54

## Sitografia e Bibliografia

- [1] <https://www.sabiana.it/it/media/newsletters/crystall-filter>
- [2] <https://www.sabiana.it/it/products/crystall-duct-system>
- [3] [http://www.mtsalutebenessere.it/j/images/Ozono\\_compendio\\_generale.pdf](http://www.mtsalutebenessere.it/j/images/Ozono_compendio_generale.pdf) Ministero della salute
- [4] <https://www.oxidationtech.com/downloads/manuals/API-450-Brochure.pdf>
- [5] EPA, << Ground Level Ozone,>> [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution>
- [6] EPA. << An introduction to Indoor Air Quality (IAQ), >> [Online]. Available: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality#health>
- [7] <http://omero.farm.unipi.it/2012/matdidFarm/93/Reattori.pdf>
- [8] [http://people.ding.unisannio.it/continillo/didattica/Formazione\\_PON\\_Bosch/Day3/Reattori%20ideali.pdf](http://people.ding.unisannio.it/continillo/didattica/Formazione_PON_Bosch/Day3/Reattori%20ideali.pdf)
- [9] [https://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre\\_aree/Tecnologia\\_e\\_Sienze\\_applicate/enciclopedia/italiano\\_vol\\_5/351\\_368\\_x6\\_3\\_Reattori\\_x\\_ita.pdf](https://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/italiano_vol_5/351_368_x6_3_Reattori_x_ita.pdf)
- [10] Treccani: <https://www.treccani.it/enciclopedia/ozono>
- [11] [https://it.wikipedia.org/wiki/Precipitatore\\_elettrostatico](https://it.wikipedia.org/wiki/Precipitatore_elettrostatico)
- [12] <https://www.tecnosida.it/filtro-elettrostatico>
- [13] <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/10155dl.htm>

[14] <https://illustrationprize.com/it/542-corona-effect.html>

[15] [https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto\\_corona](https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_corona)

[16] NASA. [Online]. Available: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

[17] <https://www.arpa.marche.it/bollettino-ozono>

[18] Phillip J. Walsh, Charles S. Dudley, Emily D. Copenhaver, ‘‘Indoor Air Quality’’

[19] Luigi Bontempi, (2021) ‘‘ LA QUALITÀ DELL’ARIA INTERNA Problematiche e soluzioni’’, Editrice SABIANA SpA.

## Ringraziamenti

Arrivata alla fine di questo percorso desidero ringraziare in primis il relatore di questo elaborato, la prof.ssa Maria Letizia Ruello, e l'Ing. Chiara Giosuè per la disponibilità, l'attenzione e la fiducia che mi hanno dimostrato durante il tirocinio e l'elaborazione della tesi.

Un doveroso ringraziamento va al tecnico del dipartimento DIISM, Giuseppe di Giovine, che mi ha aiutato a progettare e realizzare l'intera canalizzazione.

Un particolare ringraziamento va a mio padre e mia madre per avermi sempre supportato in questo percorso di studi sia dal punto di vista umano che economico con grandi sacrifici, permettendomi di arrivare fin qui. Ringrazio inoltre mio cugino Roberto, gli zii, le zie e i nonni che mi hanno dimostrato vicinanza e sostegno nei periodi più duri e impegnativi di questo percorso universitario.

Un doveroso ringraziamento va alle mie coinquiline, in particolar modo a Camilla che è stata come una sorella per me, sopportandomi e supportandomi fin dall'inizio di questa avventura.

Inoltre, ringrazio Leonardo, che è stato ed è un punto di riferimento per me e mi ha aiutato a superare alcuni miei limiti e paure, tutti i miei compagni di corso, con i quali ho condiviso l'entusiasmo, ma anche le fatiche che il nostro percorso di studi richiedeva ed infine, non per importanza, tutti i miei amici che in un modo o nell'altro hanno condiviso con me questi anni di gioie e sacrifici.

Grazie di cuore a tutti

Elisa