



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale**

**Generazione di Ozono da elettrofiltri per IAQ: ottimizzazione della camera di prova  
e relativa metodologia**

**Ozone generation from IAQ electrofilters: test chamber, and related methodology  
optimization**

Relatrice:

**Prof.ssa Ruello Maria Letizia**

Tesi di Laurea di:

**Gallina Alessio**

**A.A. 2020 / 2021**

# Sommario

Introduzione	2
<b>1. Filtrazione elettrostatica aria indoor</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Generalità filtro elettrostatico</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Funzionamento filtro elettrostatico</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Vantaggi e svantaggi nell'uso di un filtro elettrostatico</b>	<b>6</b>
<b>2. Ozono</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Generazione dell'ozono</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Normativa</b>	<b>12</b>
<b>3. Strumentazione utilizzata per le prove</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Filtro elettrostatico</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Ozono monitor</b>	<b>16</b>
<b>3.2.1 Funzionamento ozono monitor</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Ventola</b>	<b>18</b>
<b>3.4 Collegamento elettrico</b>	<b>18</b>
<b>4. Prove</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Grafici filtro trattato</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Grafici filtro non trattato</b>	<b>24</b>
<b>5. Modifiche del sistema</b>	<b>28</b>
<b>5.1 Modifica ventola</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Modifica tensione del filtro</b>	<b>29</b>
<b>5.3 Modifica sonda automediante</b>	<b>30</b>
<b>6. Documentazione fotografica delle modifiche</b>	<b>31</b>
<b>7. Conclusione</b>	<b>39</b>
Sitografia e bibliografia	40

# Introduzione

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

Oggi giorno è sempre più importante la qualità dell'aria esterna e l'importanza di mantenere la stessa il più possibile pulita e priva di elementi inquinanti, aspetto questo fondamentale nella vita di tutti i giorni tanto che, con notevole frequenza, è spesso presente nei maggiori mezzi di comunicazione sotto forma di dibattiti, tavole rotonde, reportage, ecc..

Tuttavia se è vero che la qualità dell'aria esterna è essenziale per tutti gli esseri viventi per condurre una vita in salute, invece non si parla mai, o sicuramente molto meno, della qualità dell'aria interna o indoor.

Negli ambienti di lavoro e in quelli chiusi, la qualità dell'aria indoor (indoor air quality, IAQ) è importante non solo per assicurare a chi lavora comfort e salute, ma anche ad una ricaduta positiva sulla loro attività.

Infatti le stime scaturite da apposite ricerche indicano che ogni persona adulta trascorre almeno otto ore al giorno in ufficio o comunque in un luogo di lavoro chiuso. Più l'aria interna è salubre, più è alto il benessere personale e maggiori saranno anche le prestazioni e la qualità del lavoro.

Un edificio caratterizzato da un'aria poco salubre ed inquinata che può dar luogo ad un quadro di sintomi definito come Sindrome dell'Edificio Malato (Sick Building Syndrome), nelle persone che vi soggiornano per lungo tempo.

Si comprende quindi perché l'IAQ negli ambienti chiusi è un aspetto cruciale da non sottovalutare se si vuole salvaguardare la salute di chi lavora e frequenta quegli ambienti, tanto più oggi -in piena pandemia- si è chiamati ad affrontare gli effetti delle contaminazioni da Covid 19.

L'inquinamento indoor dipende da fattori inquinanti che possono essere di varia natura: biologica, chimica o fisica.

L'inquinamento può dipendere dalla presenza di virus, funghi o batteri nell'aria (biologici) o da particelle effetto di vernici, stucchi, mura, ma anche da condizionatori, umidificatori, oppure dagli stessi prodotti utilizzati per la pulizia o anche dal fumo di sigaretta (nei luoghi dove permesso) o da deodoranti sintetici per ambienti che sono una fonte concentrata di contaminanti dell'aria.

Pertanto per ottenere una buona IAQ, è importantissimo provvedere, oltre al ricambio periodico dell'aria non più salubre, con ad esempio l'apertura delle finestre, anche una corretta filtrazione in modo da ridurre gli inquinanti nell'aria stessa.

# 1. Filtrazione elettrostatica aria indoor

A tal proposito i sistemi filtranti utilizzati dagli impianti di climatizzazione e ventilazione hanno 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.

Sono molteplici le cause che determinano la presenza di diversi agenti inquinanti nei canali degli impianti di climatizzazione. La principale è certamente la scarsa o inesistente pulizia e manutenzione degli stessi, a cui 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 filtri idonei e la scarsa attenzione alla loro sostituzione, la presenza di condizioni favorevoli in termini di temperatura ed umidità alla proliferazione di organismi di natura batterica, fungina, ecc.

Un rilevante esempio di quanto sopra esposto è la malattia da Legionella, batterio che si annida e prolifera nelle condutture dei sistemi di climatizzazione e che può determinare una grave polmonite che può condurre alla morte. Il batterio è stato così denominato nel 1976, dopo che un'epidemia si era diffusa tra i partecipanti al raduno della Legione Americana al Bellevue Stratford Hotel di Philadelphia determinando la morte di trentaquattro persone.

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

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 chiusi.

In quest'ottica la trattazione studierà il funzionamento degli elettrofiltri, in particolare di uno prodotto dall'Azienda SABIANA S.p.A. con la conseguente produzione di ozono tipicamente associato a questo genere di filtrazione.

## 1.1 Generalità filtro elettrostatico

L'azione esercitata dai filtri elettrostatici sulle polveri adotta il seguente meccanismo di eliminazione che può essere riassunto in due semplice passaggi:

- Conferimento di carica elettrica a particelle e microrganismi trasportati dall'aria: sezione di ionizzazione.
- Cattura di particelle/microrganismi: sezione di captazione.

Il filtro elettrostatico si compone quindi di 2 sezioni separate:

- Sezione ionizzante.
- Sezione di raccolta/precipitazione.

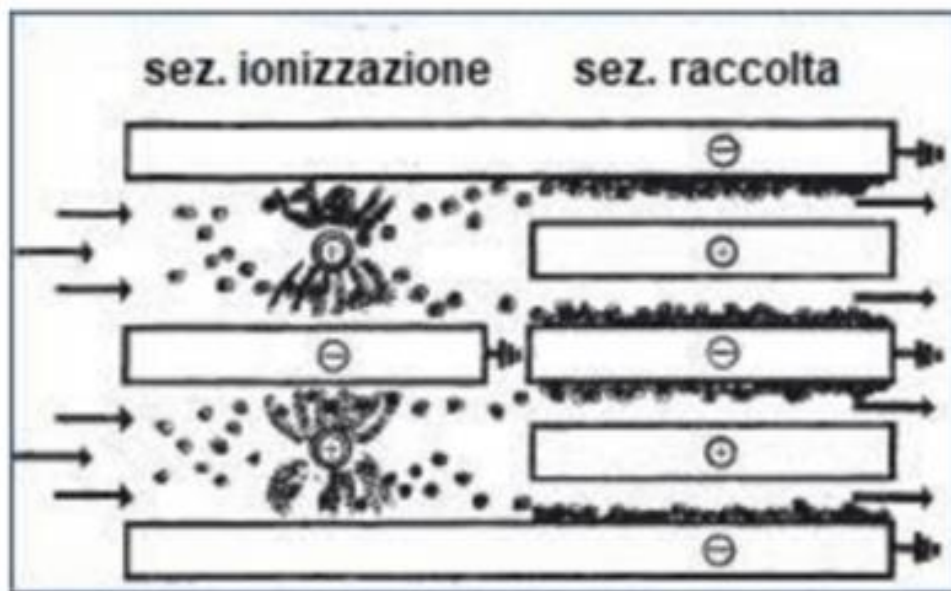


Figura 1 – Schema filtro elettrostatico

## 1.2 Funzionamento filtro elettrostatico

Nella sezione ionizzante l'aria passa attraverso elettrodi che caricano le particelle (inclusi i microrganismi). Quando gli inquinanti così modificati arrivano nella sezione di raccolta, vengono catturati dal campo elettrico generato dalle piastre parallele che li attirano sulla loro superficie. In questo modo particelle e i microrganismi eventualmente presenti vengono bloccati.

Si ha un'elevata efficienza di raccolta delle particelle (>90%), sicuramente utile a contribuire ad una notevole filtrazione e sanificazione dell'aria che però dovrà essere integrata, soprattutto

considerando gli inquinanti gassosi e delle particelle non trattenute, inclusi germi, virus, funghi residui.

Definiamo ora le principali fasi di funzionamento del filtro elettrostatico:

1. Fase di ionizzazione: nella sezione ionizzante, strutturata da elementi in tungsteno attraversati da alta tensione, l'aria contaminata grazie al filtro elettrostatico riceve un'elevata carica elettrica.
2. Fase di raccolta: l'aria così ionizzata supera un insieme di piastre di captazione in cui è presente alta tensione così che le particelle solide contaminanti siano inglobate all'interno delle piastre cariche (la tensione impiegata generalmente è più bassa che nella ionizzazione e la sua utilità dipende dalla struttura della cella di raccolta).
3. Fase di pulizia: le particelle contaminate inquinanti inglobate dalle piastre dovranno essere periodicamente rimosse attraverso una pulizia manuale o automatica delle piastre di captazione.

Il trattamento consiste quindi nell'applicare un'elevata differenza di potenziale tra gli elettrodi di emissione e di raccolta, in modo da creare in prossimità degli elettrodi di emissione un forte campo elettrico.

Il campo elettrico così generato provoca la ionizzazione del gas (vettore delle particelle contaminanti) attorno alla superficie dell'elettrodo di emissione, realizzando "l'effetto corona".

Il flusso di gas che viene fatto passare tra le piastre di raccolta viene ionizzato e quindi gli ioni tenderanno a spostarsi dalla "zona di corona" verso gli elettrodi di raccolta. In questa fase gli ioni così prodotti entreranno in collisione con le particelle di contaminante in sospensione cedendo loro una carica elettrica (ogni particella può essere caricata dall'azione di più ioni, fino a raggiungere elevati livelli di carica).

Le polveri cariche verranno quindi attratte verso gli elettrodi di raccolta dove sono trattenute e successivamente rimosse con il metodo a secco o ad umido.

Da sottolineare che la rimozione dei depositi può essere effettuata anche durante il funzionamento senza dover sospendere la fase di trattamento, impiegando opportuni accorgimenti che evitano la dispersione delle particelle catturate.

Le caratteristiche principali dei filtri elettrostatici sono principalmente due:

- 1) L'elevata efficienza di rimozione anche per granulometrie molto fini;
- 2) La possibilità di recuperare i contaminanti in fase solida (tranne nel caso di elettrofiltri ad umido).

La velocità a regime con cui la particella, sotto l'azione della forza elettrica, si dirige verso l'elettrodo di raccolta, velocità di migrazione, è determinata dall'equilibrio tra la forza elettrica e la forza resistente d'attrito dovuta alla viscosità del gas vettore.

Tale velocità  $Wd$  di una particella allo stato stazionario con diametro  $dp$  è il parametro fondamentale di dimensionamento del sistema e si ricava dalla seguente formula:

$$Wd = \frac{D K_0 E^2 dp}{(2 + D)\mu}$$

$D$  = costante dielettrica del mezzo;

$K_0$  = costante dielettrica del vuoto;

$E$  = intensità del campo elettrico che carica e separa le particelle negli impianti a stadio singolo;

$\mu$  = viscosità del mezzo;

$dp$  = diametro della particella.

L'efficienza di rimozione invece la possiamo ricavare dalla formula di Deutsch-Anderson

$$Ed = 1 - \exp\left(-\frac{Wd A}{Q}\right)$$

$Ed$  = efficienza con cui vengono rimosse le particelle di diametro  $dp$ ;

$Wd$  = velocità di migrazione della stessa classe di particelle [m/min];

$A$  = superficie dell'elettrodo di raccolta, [m<sup>2</sup>];

$Q$  = portata del gas da trattare, [m<sup>3</sup>/min].

### 1.3 Vantaggi e svantaggi nell'uso di un filtro elettrostatico

L'uso dei filtri elettrostatici comporta inoltre perdite di carico pressoché inesistenti in termini di incidenza energetica. In questo modo l'impianto presenta non solo una maggior e miglior filtrazione, ma anche vantaggi in termini di sviluppo sostenibile.

Pertanto possiamo classificare così i benefici economici derivanti dall'installazione dei filtri elettrostatici:

- Perdite di carico pressoché inesistenti.
- Ridotti costi energetici (100 Watts/1.000 m<sup>3</sup>/h).
- Intrappolano particelle da 0,01 µm a 100 µm con un'efficienza del 99%.
- Lavorano ad elevate portate d'aria, fino a 1.400 m<sup>3</sup>/s.
- Filtrano ad elevati carichi di particelle, fino a 500 grammi/m<sup>3</sup>.

Abbiamo però anche alcuni aspetti negativi o quantomeno più onerosi e complessi della filtrazione elettrostatica rispetto ad altri sistemi filtranti. Tra questi troviamo:

- Scarsa versatilità dimensionale.
- Costi di acquisto e di installazioni maggiori derivanti dai materiali e dalla tecnologia usata.
- Maggior fabbisogno di spazio a parità di prestazioni filtranti.
- Necessità di impiego di un'alimentazione elettronica.
- Generazione di Ozono.

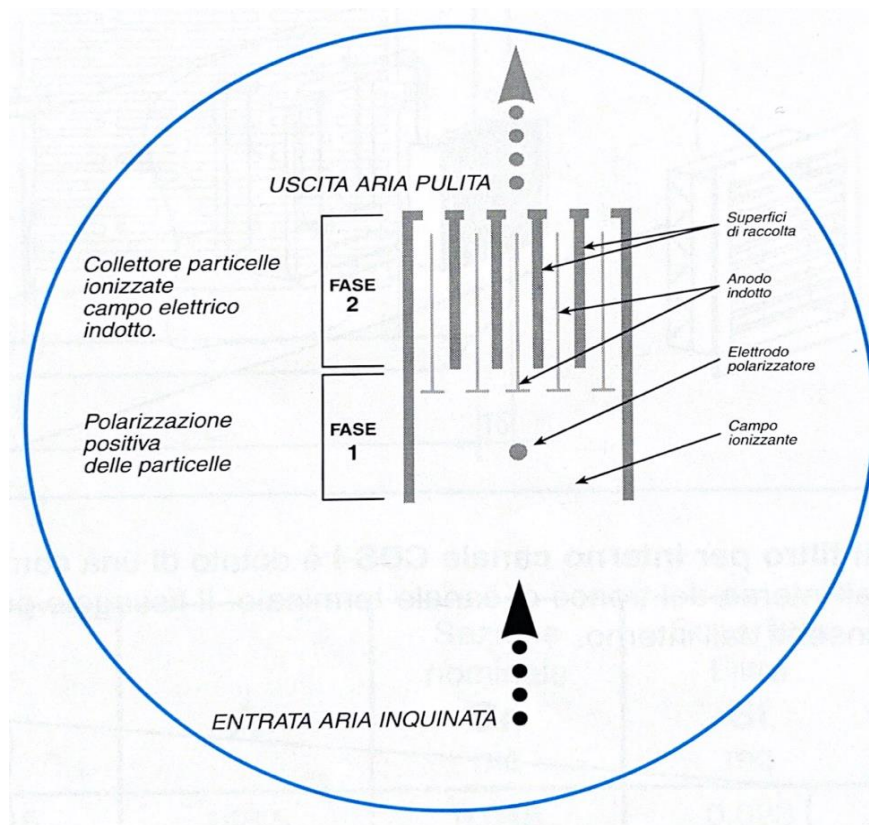


Figura 2 - Schema funzionamento filtro elettrostatico



## 2. Ozono



Figura 3 – Rappresentazione tridimensionale di una molecola di ozono O<sub>3</sub>

L'ozono, o triossigeno, è una forma allotropica dell'ossigeno dalla formula chimica O<sub>3</sub>. È un gas blu composto da molecole instabili con un odore pungente e dotato di grande reattività. Viene prodotto in atmosfera dalla reazione tra ossidi di azoto, composti organici volatili e raggi solari.

Fu Christian Friedrich Schönbein nel 1840 a scoprire questa molecola mentre conduceva degli esperimenti poiché ad un tratto notò un odore pungente, riuscì ad isolare la molecola e la chiamò *ozono*.

Secondo l'evidenza sperimentale della spettroscopia a microonde, l'ozono è una molecola piegata, con una simmetria simile alla molecola dell'acqua. Le distanze di legame sono 127.2 pm, mentre l'angolo O – O – O è 116,78°, il che la rende una molecola polare. La molecola può essere rappresentata come un ibrido di risonanza con due strutture limite, ciascuna con un singolo legame da un lato e doppio legame dall'altro. (Fig. 4)

Ha un odore pungente caratteristico, lo stesso che accompagna talvolta i temporali dovuto proprio all'ozono prodotto dalle scariche elettriche dei fulmini. È un energico ossidante e per gli esseri viventi è altamente velenoso.

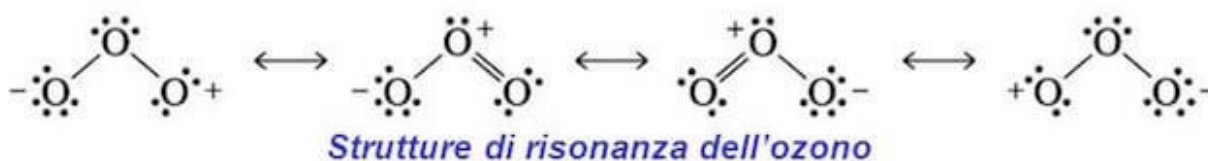
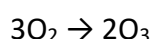


Figura 4 - Struttura di risonanza dell'ozono

L'ozono si genera da molecole di ossigeno biatomico ( $O_2$ ) in prossimità di scariche elettriche, scintille e fulmini, secondo la seguente reazione:



Siccome la reazione è endotermica, essa necessita dell'assorbimento di una certa quantità di energia, pari a circa 69000 calorie/mole, affinché avvenga.

L'ozono è presente negli strati alti dell'atmosfera (stratosfera). In questo caso esso assume un ruolo essenziale per la vita sulla Terra assorbendo la luce ultravioletta (UV) proveniente dal Sole.

Invece l'ozono presente negli strati più bassi dell'atmosfera (troposfera) è causa diretta di danni alla vegetazione, alle costruzioni ed alla salute.

Infatti esso può:

- provocare l'ossidazione dei metalli e la depolimerizzazione e degradazione delle plastiche e delle gomme;
- interferire con la funzione clorofilliana e con la crescita delle piante;
- nuocere alla salute degli animali e degli umani.

L'aumento della concentrazione di ozono costituisce un problema di sanità pubblica in particolare per i gruppi di popolazione maggiormente sensibili per età (infanzia e vecchiaia) le donne in gravidanza, i soggetti affetti da patologie respiratorie e cardiovascolari; questi ultimi possono manifestare sintomi e/o aggravamento della patologia per livelli di ozono anche abbastanza contenuti.

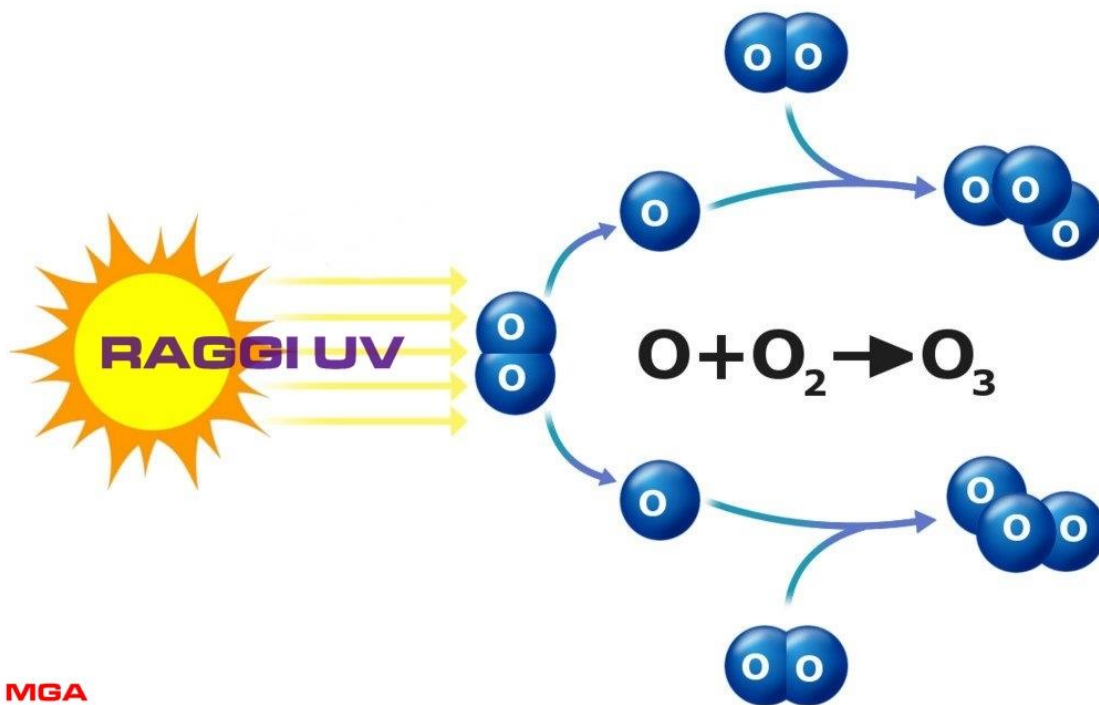
I disturbi principali sono riferiti all'irritazione ed all'infiammazione degli occhi e delle prime vie respiratorie con lacrimazione, tosse, fatica a respirare e affanno. Questi effetti possono essere causati da una breve esposizione a questo gas e cessano quando non si è più esposti ad esso.

Invece l'esposizione prolungata per mesi ed anni ad elevati livelli di ozono può provocare effetti irreversibili sulla salute, in particolare sul sistema respiratorio e cardiovascolare, in particolare ripetute esposizioni all'ozono dei bambini in fase di sviluppo possono portare ad una riduzione permanente della funzione polmonare.

Inoltre in parecchi casi la fonte dello  $O_3$  rilevato in ambiente è la stessa aria contenutavi, quella che in pratica viene immessa in ambiente dall'esterno per ventilazione. Infatti l'aria esterna contiene una concentrazione di ozono più elevata rispetto all'aria interna degli ambienti. Tale variazione dipende dalle stagioni, dalla luce solare e dall'inquinamento presente in determinate aree urbane con forte traffico veicolare. Eccezionalmente la fonte interna può essere costituita da alcuni tipi di fotocopiatrici e di filtri per l'aria non correttamente dimensionati, che lavorano secondo principi elettrostatici. Il decadimento dell'ozono negli ambienti è molto rapido. Il periodo di dimezzamento dell' $O_3$ , cioè il tempo necessario affinché il valore della concentrazione iniziale si riduca a metà di quella iniziale, è solitamente meno di trenta minuti. E' comunque non facile imbattersi in valori di concentrazione di ozono alti. Alcune ricerche affermano che una contenuta concentrazione di ozono ( $20-30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in ambiente riduca lo sviluppo di sostanze biologiche potenzialmente nocive alle persone presenti ed inoltre, reagendo con sostanze odorifere di natura organica, ne aumenta notevolmente la soglia olfattiva, diminuendo così l'effetto negativo del cattivo odore percepito.

## 2.1 Generazione dell'ozono

L'ozono atmosferico si forma nella stratosfera, a un'altezza di oltre venti chilometri, per l'azione dei raggi ultravioletti del sole sull'ossigeno dell'aria. L'energia delle radiazioni solari rompe la molecola di ossigeno nei due atomi che la compongono. Ogni atomo d'ossigeno libero, poi, si lega con un'altra molecola di ossigeno non ancora "dissociata" e forma una molecola di ozono (che è quindi composta da tre atomi di ossigeno). La produzione è istantanea e continua. (Fig. 5)



**MGA**

Figura 5 - Formazione ozono atmosferico

A causa del suo tempo di dimezzamento molto breve, l'Ozono viene prodotto sempre in situ da un processo in grado di generarlo, quali:

- 1) Elettrico: Effetto Corona (o Scarica Corona).
- 2) Elettrochimico: Elettrolisi.
- 3) Fotochimico: Radiazione UV.

L'effetto corona è un fenomeno per cui una corrente elettrica fluisce tra un conduttore a potenziale elettrico elevato ed un fluido neutro circostante, generalmente aria.

Questo fenomeno consiste nella ionizzazione dell'aria presente in un sottile strato cilindrico (la "corona", appunto) attorno ad un conduttore elettricamente carico. La causa del fenomeno è l'intenso campo elettrico che in alcuni casi si stabilisce in questa regione. La ionizzazione si determina quando il valore del campo elettrico supera una soglia detta "rigidità dielettrica" dell'aria, e si manifesta con una serie di scariche elettriche, che interessano unicamente la zona ionizzata e sono quindi circoscritte alla corona cilindrica in cui il valore del campo supera la rigidità dielettrica. Il fenomeno è, in piccolo, sostanzialmente equivalente alla generazione di lampi e fulmini, che si verificano proprio quando il campo elettrico dovuto alla differenza di potenziale tra nuvola e nuvola o tra nuvola e terreno supera la rigidità dielettrica. (Fig 6)

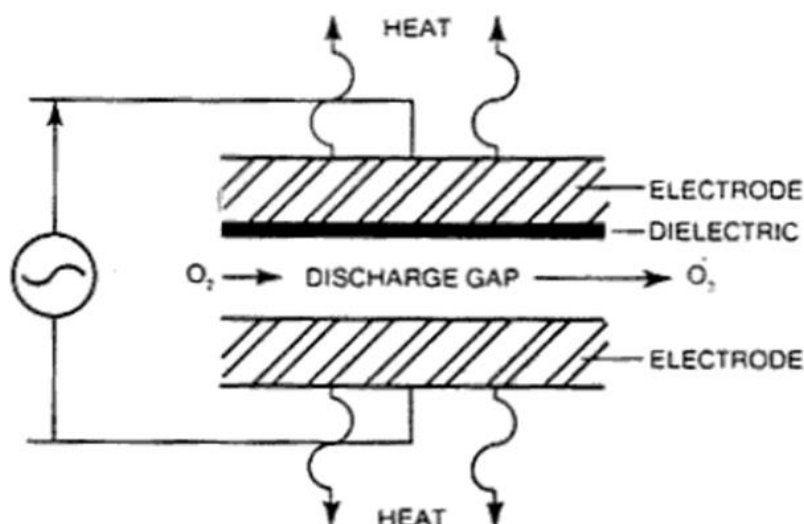


Figura 6 – Schematizzazione effetto corona

## 2.2 Normativa

Il DPCM 28 marzo 1983 ed i decreti del Ministero dell'Ambiente del 15 aprile 1994, del 16 maggio 1996 e del 13 agosto 2010 sono la normativa attualmente in vigore sul controllo dell'ozono troposferico.

Il Decreto Legislativo del 13 agosto 2010, n.155 (recepimento della direttiva europea 2008/50/CE) stabilisce per l'ozono una soglia di allarme ed una di informazione.

Finalità:	Periodo di mediazione:	Soglia:
<b>Informazione</b>	1 ora	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<b>Allarme</b>	1 ora	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Per soglia di informazione si intende il livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per alcuni gruppi particolarmente sensibili della popolazione, ed il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive. Al superamento della soglia di informazione le persone sensibili devono evitare di svolgere attività fisica anche moderata all'aperto, come camminare velocemente, in particolare nelle ore più calde e di maggiore insolazione.

Per soglia di allarme si intende il livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per la popolazione nel suo complesso, ed il cui raggiungimento

impone di adottare provvedimenti immediati. Al superamento della soglia di allarme le persone sensibili devono evitare qualsiasi attività fisica all'aperto, in particolare nelle ore più calde e di maggiore insolazione. Tutta la popolazione deve evitare, in particolare nelle ore più calde e di maggiore insolazione, di svolgere intensa attività fisica all'aperto, come ad esempio correre.

Inoltre possiamo trovare anche le:

#### **Soglie acute per la vegetazione**

Soglia per la protezione della vegetazione: 200 µg/m<sup>3</sup> (media oraria); 65 µg/m<sup>3</sup> (media su 24 ore).

Vista l'importanza del monitoraggio dei valori della concentrazione di ozono in atmosfera, sono stati installati stazioni di misurazione distribuite sul territorio nazionale e raccolti dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nell'ambito delle procedure di scambio di informazioni (Exchange of Information, EoI) previste dalle Decisioni 97/101/CE e 2001/752/CE. L'obiettivo della normativa sull'EoI è quello di fornire un quadro conoscitivo e rappresentativo dello stato della qualità dell'aria, attraverso i dati di concentrazione di ozono, consentendo un confronto tra i Paesi membri della Comunità Europea. L'obiettivo del D.Lgs. 183/2004 e del D.Lgs. 155/2010 è quello di consentire, alle regioni e province autonome, la valutazione e la gestione della qualità dell'aria ambiente con riferimento all'ozono troposferico.

I valori da rispettare e su cui confrontare i valori registrati dalle stazioni sono quelli sopra elencati.

### **3. Strumentazione utilizzata per le prove**

In questo nostro studio del filtro elettrostatico abbiamo usato diversi strumenti che ci hanno permesso di raggiungere i dati ottenuti.

Cercando di creare le condizioni di lavoro il più possibile simili alla realtà, abbiamo costruito un box in legno rivestito internamente di alluminio che simulava una canalizzazione in cui potevano essere collocati i filtri oggetti di studio. Infatti abbiamo messo il filtro all'inizio di questo box ed una ventola alla fine. (Fig. 7 e 8)



Figura 7 - Filtro posizionato all'inizio del box



Figura 8 - Ventola ad aspirazione alla fine del box



### 3.1 Filtro elettrostatico

Il filtro elettrostatico considerato nel nostro 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, industrie e in qualsiasi luogo in cui si vuole migliorare la qualità dell'aria interna. 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 ( $O_3$ ), prodotto inquinante e dannoso se introdotto in ambienti interni con un ridotto ricambio d'aria.

Il filtro da noi utilizzato è quello riportato in figura 9.



Figura 9 - Filtro elettrostatico utilizzato



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

Quest'ultima sezione è facilmente estraibile e permettere una agevole manutenzione.

Il principio di funzionamento del filtro è estremamente semplice: le particelle inquinanti transitano attraverso la prima sezione costituita dagli elettrodi e caricate elettronicamente per via del campo elettrico qui prodotto (ionizzazione). Nella seconda sezione 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 effetto corona.

Infine per come è stato condotto lo studio è importante sottolineare la diversità dei filtri che avevamo a disposizione.

Le prove infatti sono state eseguite con due filtri, che chiameremo:

- filtro trattato – che ha subito un trattamento ad immersione in fase di sperimentazione presso altri laboratori
- filtro non trattato – ossia il filtro disponibile commercialmente.

Nel box avevamo la presenza di un foro laterale in cui veniva introdotto un sondino collegato all'ozono-monitor, lo strumento usato per raccogliere e registrare i valori di concentrazione di  $O_3$ .

## 3.2 Ozono monitor

Il monitor fotometrico di ozono modello 450 UV è un analizzatore estremamente stabile, ideale per applicazioni critiche di processo e sicurezza di basso livello ppm. La sua calibrazione è garantita NIST (National Institute of Standards and Technology) e la compensazione di pressione e temperatura inclusa fornisce un'elevata precisione. Il Modello 450 UV è disponibile come unità a flusso singolo o come unità multicanale in grado di monitorare fino a sei flussi di campioni individuali. Questo modello è stato progettato per avere un funzionamento semplice ma, nello stesso tempo, per offrire prestazioni eccellenti ed elevate affidabilità.

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 prossima a quella d'assorbimento dell'ozono.



Figura 10 - Ozone monitor model 450

### 3.2.1 Funzionamento ozone monitor

La cella d'assorbimento (absorption cell) viene alternatamente riempita di gas ambientale e dal gas ambientale stesso ripulito dall'ozono tramite uno scrubber che è un vero filtro. La concentrazione è ottenuta attraverso il confronto della diversa entità di assorbimento della radiazione ultravioletta fra il campione di gas ambientale e quello "ripulito".

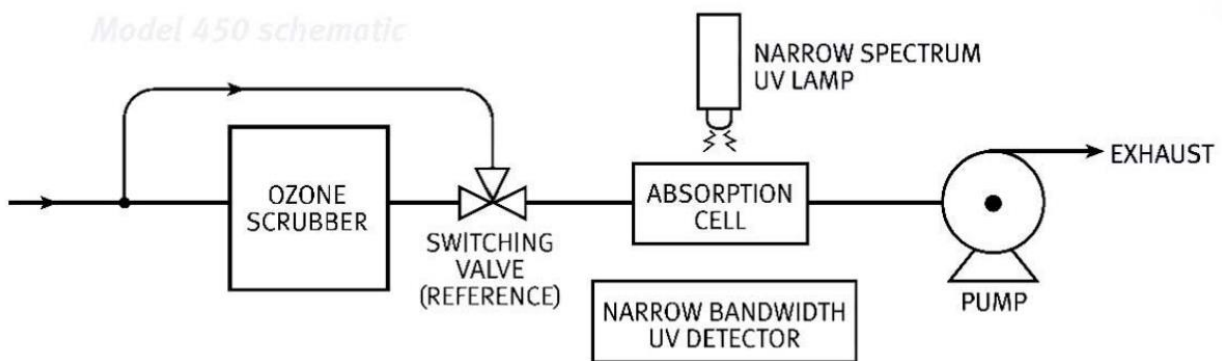


Figura 11 – Schema funzionamento ozone-monitor

### 3.3 Ventola

Nel nostro studio oltre agli strumenti sopra citati abbiamo utilizzato anche una ventola. In particolare si trattava di una ventola aspirante radiale collocata alla fine del box all'estremità opposta rispetto al filtro elettrostatico allo scopo di mimare il flusso d'aria nella canalizzazione in fase operativa del filtro stesso. La ventola poteva essere regolata e tarata da un piccolo dispositivo elettronico dotato di display che permetteva di impostare diversi valori della portata; nelle nostre prove abbiamo analizzato la generazione di ozono con tre diverse portate:

- 70 m<sup>3</sup>/h (portata minima),
- 140 m<sup>3</sup>/h
- 184 m<sup>3</sup>/h (portata massima).

### 3.4 Collegamento elettrico

Infine l'ultimo elemento utilizzato è stato il collegamento elettrico per mettere in funzione il filtro. Questa apparecchiatura di alimentazione dei filtri è inserita in apposita cassetta in ABS contenente 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.



Figura 12 - Cassetta in ABS per accensione filtro

Tutte le prove che abbiamo eseguito sono state effettuate assumendo e registrando anche le condizioni ambientali giornaliere, con un termometro per la temperatura e un igrometro per l'umidità.

## 4 Prove

Le prove eseguite sono state di due tipi: a) a breve termine, b) a lungo termine.

a) Breve termine: in queste prove abbiamo fatto cicli di acquisizioni dell'ordine dei minuti in cui a fine giornata si spegneva il filtro. Un ciclo comprendeva l'analisi di dati per ogni portata, per cui in una giornata registravamo i dati per tutte e 3 le portate della ventola.

b) Lungo termine: sono state le prove su cui si è basato principalmente questo studio. Esse sono state condotte per più giorni consecutivi in cui tutto il nostro sistema di misurazione (filtro e ozono monitor) rimaneva sempre acceso.

Per il filtro trattato le prove a lungo termine sono state eseguite dal 13/09/2021 al 17/09/2021 e sono state così attuate:

- Iniziale acquisizione di dieci minuti della concentrazione di O<sub>3</sub> in ambiente,
- Successiva registrazione della concentrazione di ozono nel box per un'ora con il filtro acceso e con le porte-finestre del laboratorio aperte in cui si osserva immediatamente la differenza della concentrazione di ozono tra quella dell'ambiente e quella dentro il box. Dopo trenta minuti dalla precedente è stata fatta un'ultima rilevazione della concentrazione di ozono dentro il box.
- Dopo trenta minuti dalla precedente è stata fatta un'ultima rilevazione della concentrazione di ozono dentro il box, sempre a porte aperte, per trenta minuti notando che i valori di O<sub>3</sub> erano all'incirca gli stessi dei precedenti, cosa che ci aspettavamo considerando che le condizioni non cambiavano. (Rilevazione con le stesse condizioni di prova precedenti con un tempo di rilevazione inferiore)
- Infine sono stati presi i dati dell'ambiente a fine giornata per altri dieci minuti.

I valori per il filtro trattato per i primi quattro giorni, sono stati assunti nella maniera spiegata.

Per l'ultimo giorno invece sono state apportate delle modifiche alle misurazioni aggiungendo altre acquisizioni volte ad assumere i valori di ozono in ambiente a porte chiuse. In questo tipo di prova il filtro è rimasto acceso cinque giorni consecutivi ma, tra un giorno e l'altro, a fine giornata, quando le porte-finestre del laboratorio sono state chiuse notando che la concentrazione di ozono in ambiente diminuiva gradualmente. Il giorno successivo l'acquisizione della concentrazione di ozono in ambiente a porte chiuse per sette minuti ha fornito valori di ozono bassi, suggerendo l'ipotesi circa la forte capacità delle ampie superfici interne al laboratorio di degradare l'ozono generato dall'elettrofiltro e di fornire un ambiente di fondo molto più pulito dell'ambiente esterno rispetto a questo gas.

Sono quindi state eseguite delle prove per confermare questa ipotesi.

Il quinto giorno dopo la misurazione in ambiente per sette minuti a porte-finestre chiuse si spostava il sondino all'interno del box acquisendo la misura per altri sette minuti sempre a porte chiuse. Successivamente le porte del laboratorio sono state aperte misurando la concentrazione in ambiente e dentro il box per un'ora e per mezz'ora.

Le acquisizioni fatte il quinto giorno per il filtro trattato sono state ripetute per tutti e cinque i giorni per il filtro non trattato.

Dopo queste due settimane di prove a lungo termine non si è osservato un andamento dei valori significativamente differente tra i due filtri.

Infatti possiamo notare che nelle acquisizioni più lunghe (un'ora) gli andamenti e i valori di  $O_3$  erano simili per entrambi i filtri, così come il primo giorno per entrambi i filtri i valori di  $O_3$  sono maggiori mentre si riducevano nei giorni successivi.

Dopo queste settimane di prove l'andamento più variabile che si è riscontrato è stata la concentrazione di ozono con le porte aperte, probabilmente da mettere in relazione alla variabilità delle condizioni ambientali. Infatti dal punto di vista meteorologico il tempo in cui si sono eseguite le prove è stato alcuni giorni più nuvoloso altri meno nuvoloso con addirittura alcuni giorni di pioggia mentre la concentrazione di ozono in ambiente a porte-finestre chiuse (cioè le acquisizioni registrate appena arrivati nel laboratorio ad inizio giornata) hanno dato valori e andamenti molto simili, questo proprio perché con le porte-finestre chiuse dentro il luogo delle prove si avevano condizioni ambientali molto simili e riproducibili.

## 4.1 Grafici filtro trattato

Nella figura 13 è riportato il grafico che rappresenta il valore di concentrazione di ozono in ambiente. Osservando l'andamento delle curve si nota che esse presentano una notevole differenza tra loro e si evidenzia come tale parametro sia caratterizzato da una difficile riproducibilità.

Tale diverso andamento era dovuto alle differenti condizioni meteorologiche (nuvoloso, sereno, ecc..) che, variando di giorno in giorno, influenzavano notevolmente il tasso di umidità e temperatura.

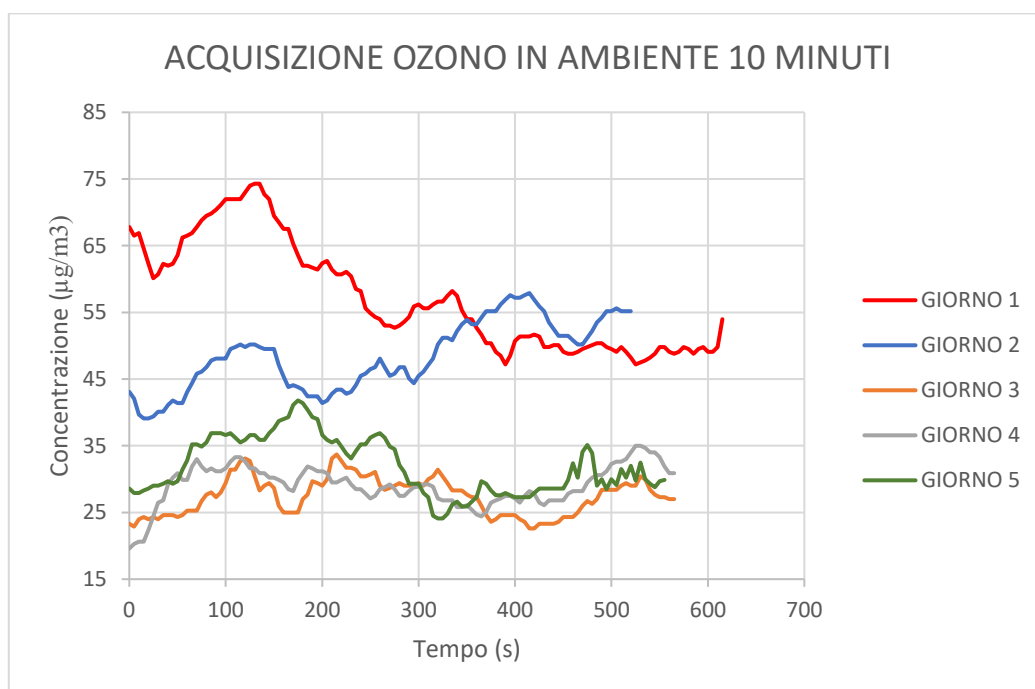


Figura 13 – Acquisizione valori concentrazione di ozono in ambiente 10 minuti

La figura 14 invece rappresenta il grafico dei valori di ozono dentro il box per un'ora, l'acquisizione più lunga fatta in questo studio. In questo caso possiamo notare come le curve hanno andamenti molto simili tra loro differenziandosi solo per i valori più alti nei primi giorni. Riducendosi poi i valori di ozono nei giorni successivi le curve tendono ad avere un andamento simile tanto da essere in alcuni punti sovrapposte.

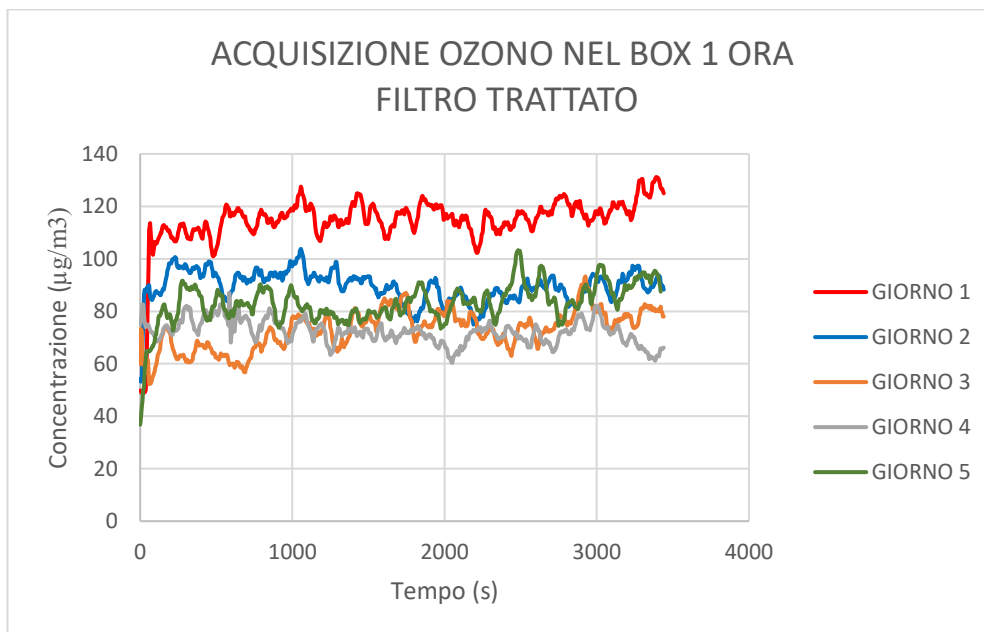


Figura 14 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box 1 ora

Il grafico della figura 15 conferma le considerazioni fatte in precedenza e cioè che i primi giorni ci sono valori più alti e che gli andamenti delle curve sono più o meno simili cosa che non si può dire invece per i valori di ozono, che risentono molto dell'influenza ambientale esterna al laboratorio.

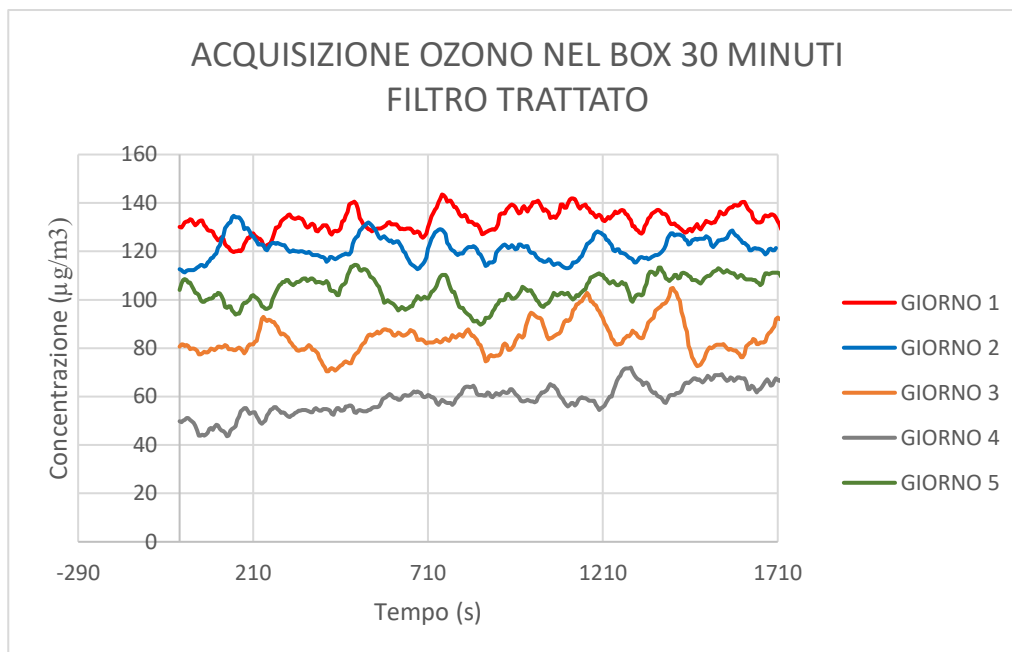


Figura 15 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box 30 minuti

Nelle figure 16 e 17 sono riportati i grafici ottenuti registrando le concentrazioni di ozono dopo che era stato deciso di apportare, nell'ultimo giorno delle prove a lungo termine per questo filtro, l'aggiunta delle porte chiuse sia per l'ambiente che per il box. Questa modalità sarà poi ripresa anche per il filtro non trattato.

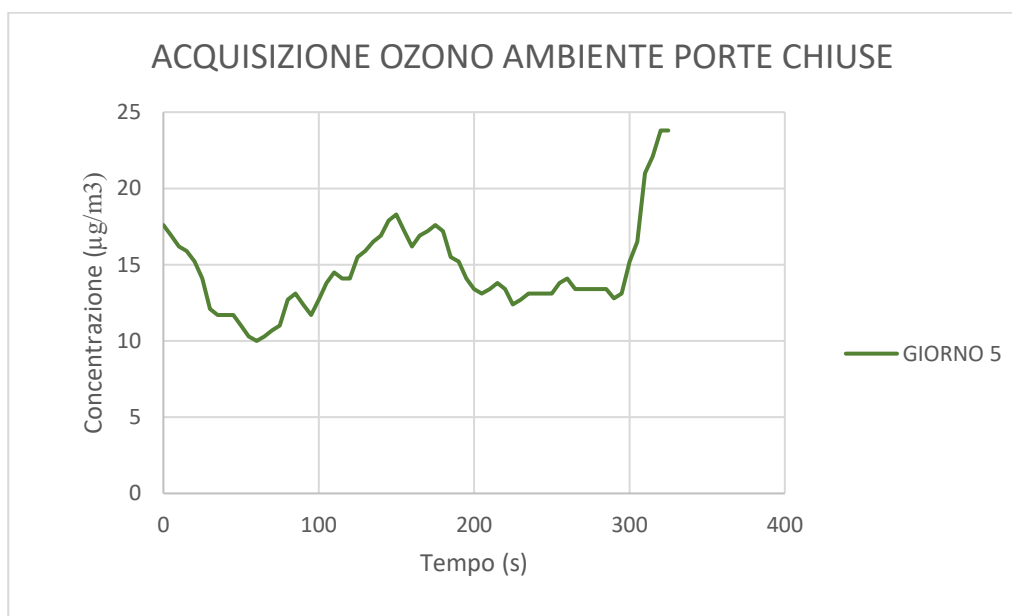


Figura 16 – Acquisizione valori concentrazione di ozono porte chiuse



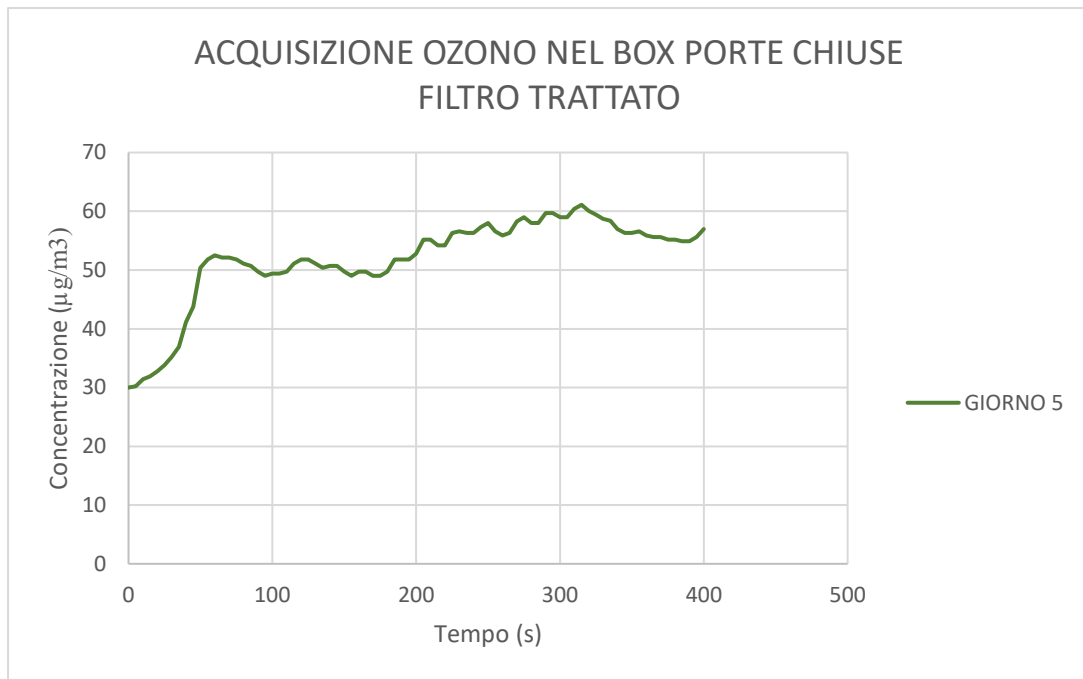


Figura 17 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box porte aperte

## 4.2 Grafici filtro non trattato

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici ottenuti per il filtro non trattato. Abbiamo riportato le stesse misurazioni compiute l'ultimo giorno del filtro trattato per tutti e cinque i giorni di prove. In questi grafici abbiamo sottolineato e voluto sottolineare due aspetti: 1) I valori dell'ambiente prendendo valori dell'ambiente più specifici (inizio giornata e fine giornata). 2) La differenza di concentrazione di ozono nel passaggio tra apertura e chiusura delle porte. Questo perché abbiamo notato che con le porte aperte, soprattutto quando c'era corrente d'aria e il valore di ozono aumentava in rapporto ad una maggiore quantità di ossigeno che entrava nell'elettrofiltro e che determinava una conseguente maggiore produzione di  $O_3$ .

In figura 18 c'è il grafico in cui sono riportati i dati relativi alle acquisizioni della concentrazione dell'ozono in ambiente a porte chiuse. Si evidenzia come i valori siano molto simili tranne che nel primo giorno (come avevamo già riscontrato nel filtro trattato) in cui sono più alti. Nei giorni successivi si osserva invece un andamento delle curve molto simile in rapporto a valori molto bassi di ozono.

Le basse concentrazioni di ozono rilevate sono probabilmente da mettere in relazione al fatto che le misurazioni venivano eseguite la mattina appena arrivati nel laboratorio, dopo che per ventiquattro ore si erano tenute le porte chiuse e quindi si aveva poca presenza di ossigeno.

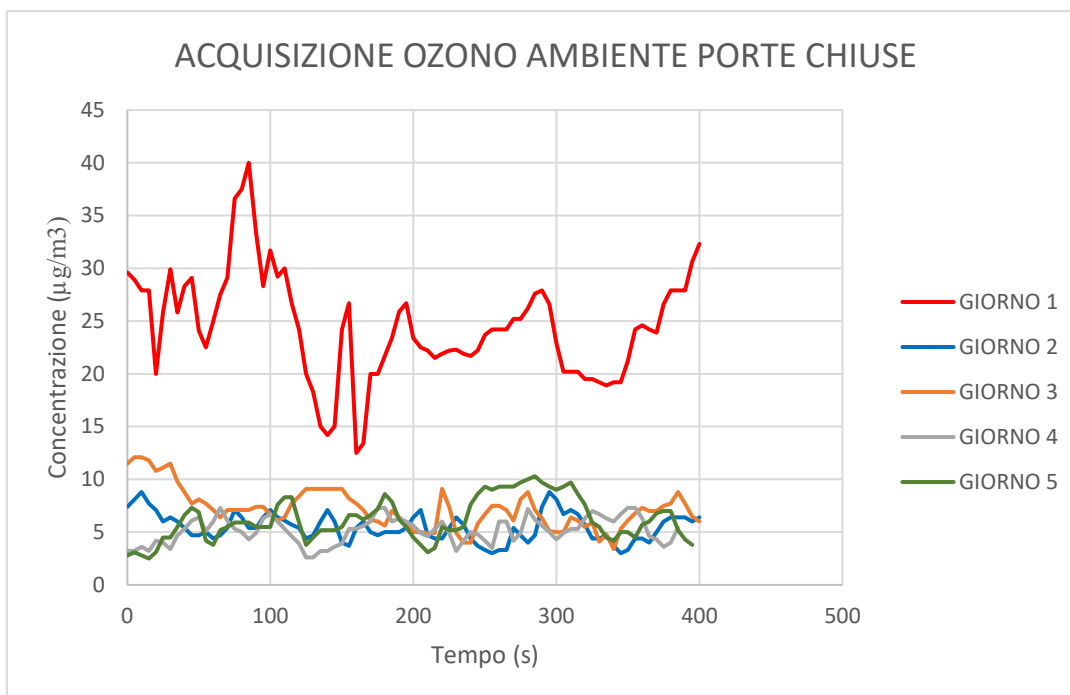


Figura 18 – Acquisizione valori concentrazione di ozono in ambiente porte chiuse

Le curve del grafico in figura 19 rappresentano i valori di  $O_3$  dentro il box a porte chiuse. Ovviamente in questa registrazione i valori sono maggiori di quelli ambientali perché il sondino collegato all'ozono monitor era stato inserito dentro il box dove il filtro acceso.

In questo caso come in tutti gli altri, i valori erano più alti il primo giorno.

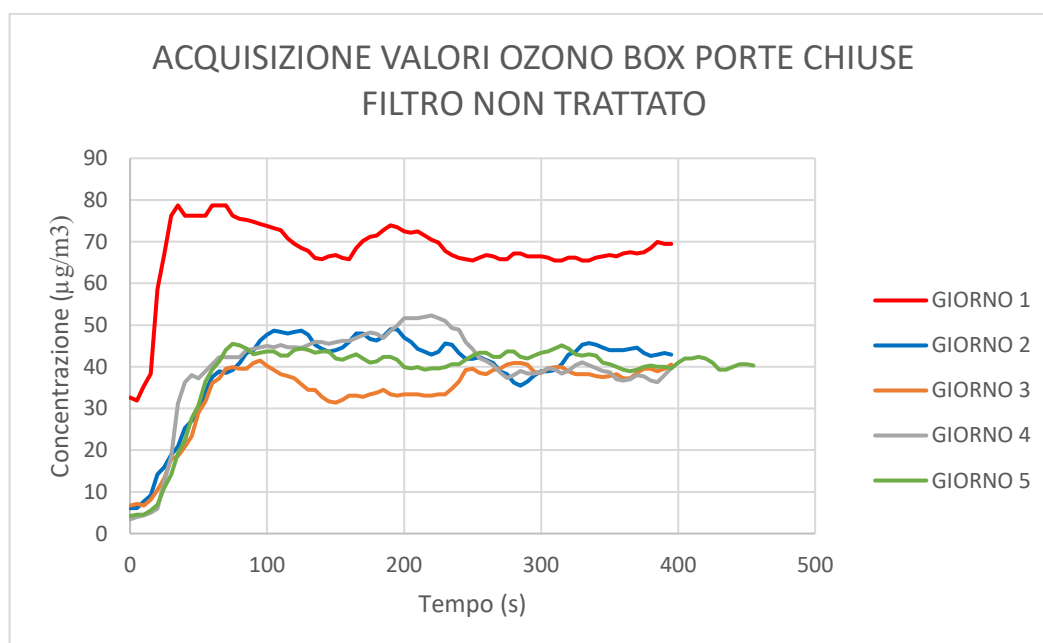


Figura 19 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box porte chiuse

Nei grafici riportati nelle figure seguenti è possibile analizzare il cambiamento dei valori della concentrazione dell'ozono nell'ambiente e nel box a porte aperte rispetto a quelli corrispondenti a porte chiuse prima considerati.

Con le porte aperte ci aspettavamo valori più alti (maggior flusso d'aria). Infatti è stato generalmente così tranne che nel quarto giorno in cui essendo il tempo nuvoloso, quasi con pioggia, abbiamo riscontrato valori più bassi in quanto l'ozono in ambiente è prodotto dai raggi solari.

Si nota anche che gli andamenti dei valori siano i meno riproducibili di tutti questo proprio perché la concentrazione di ozono in ambiente è fortemente influenzato dalle condizioni metereologiche.

(Fig 20)

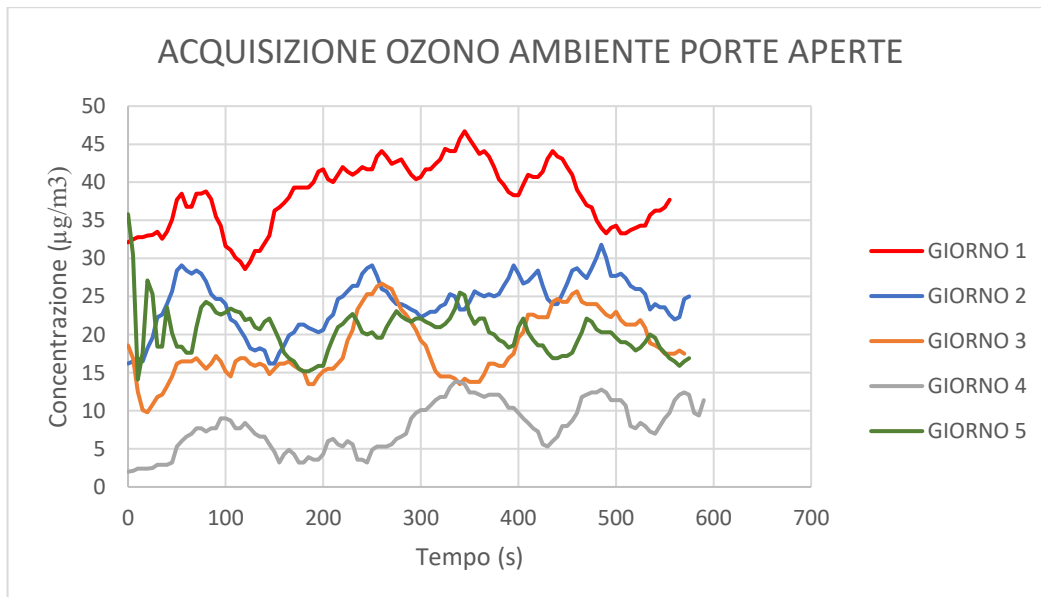


Figura 20 – Acquisizione valori concentrazione di ozono in ambiente con porte aperte

La figura 21 rappresenta il grafico in cui sono riportati i valori della concentrazione di ozono nel box a porte aperte che è stata di circa un'ora. In questo caso si avranno i valori più alti di tutto lo studio del filtro non trattato infatti, mentre nel grafico dell'acquisizione di ozono nel box a porte chiuse si aveva una media di 40 ppm, nell'acquisizione di ozono nel box a porte aperte si registrava una media di 60/70 ppm.

L'uguaglianza dell'andamento dei valori determina curve e risultati riproducibili.

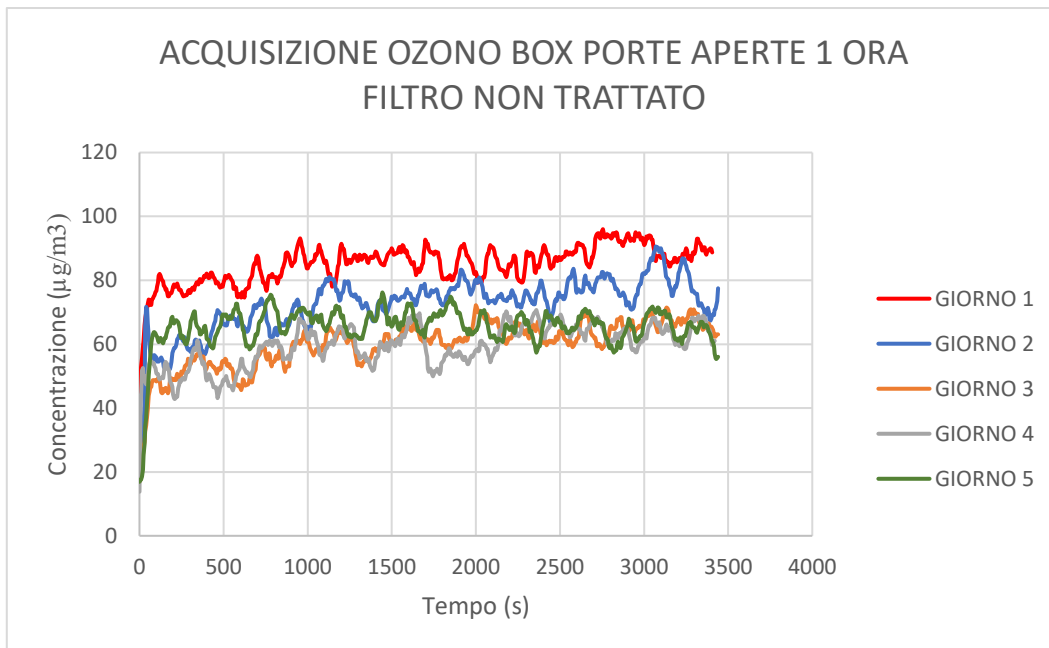


Figura 21 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box con porte aperte per 1 ora

Nella figura 22 il grafico rappresenta i valori di ozono nel box con le porte del laboratorio tenute aperte per trenta minuti. In questo caso come nel filtro trattato, abbiamo aspettato trenta minuti circa dall'acquisizione precedente (di un'ora). I valori della concentrazione di ozono e l'andamento delle curve siano sempre molto simili tra loro.

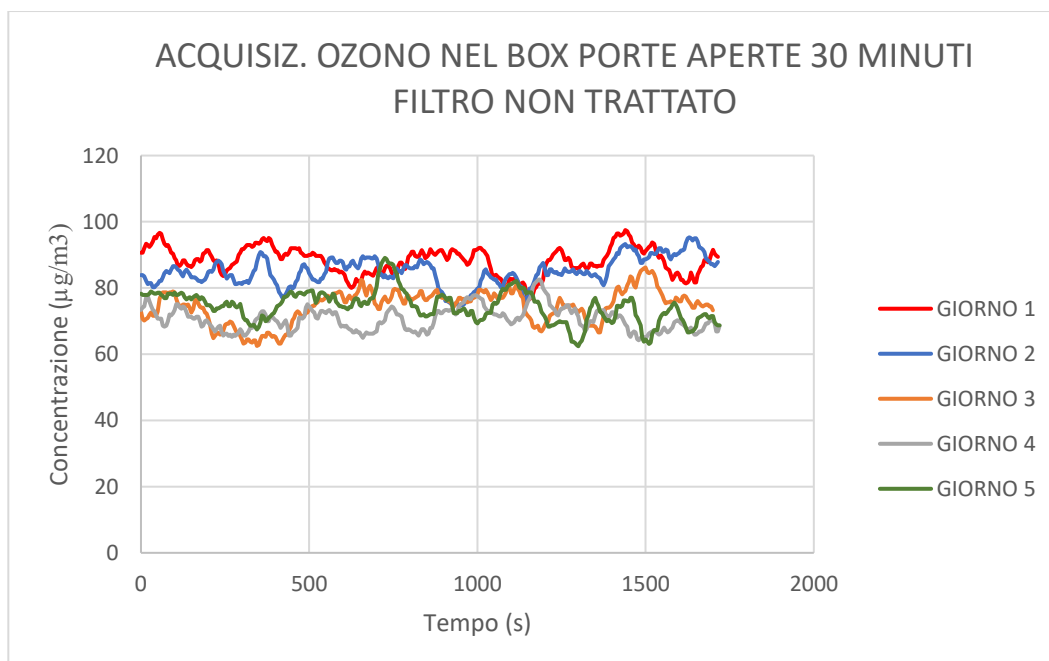


Figura 22 – Acquisizione valori concentrazione di ozono nel box con porte aperte per trenta minuti

Nella figura 23 il grafico riporta le curve con i valori di O<sub>3</sub> a fine giornata. Anche questi valori sono stati registrati con le porte del capannone aperte e questo spiega l'andamento variabile delle curve perché a porte aperte il valore di ozono è molto influenzato dalle condizioni ambientali.

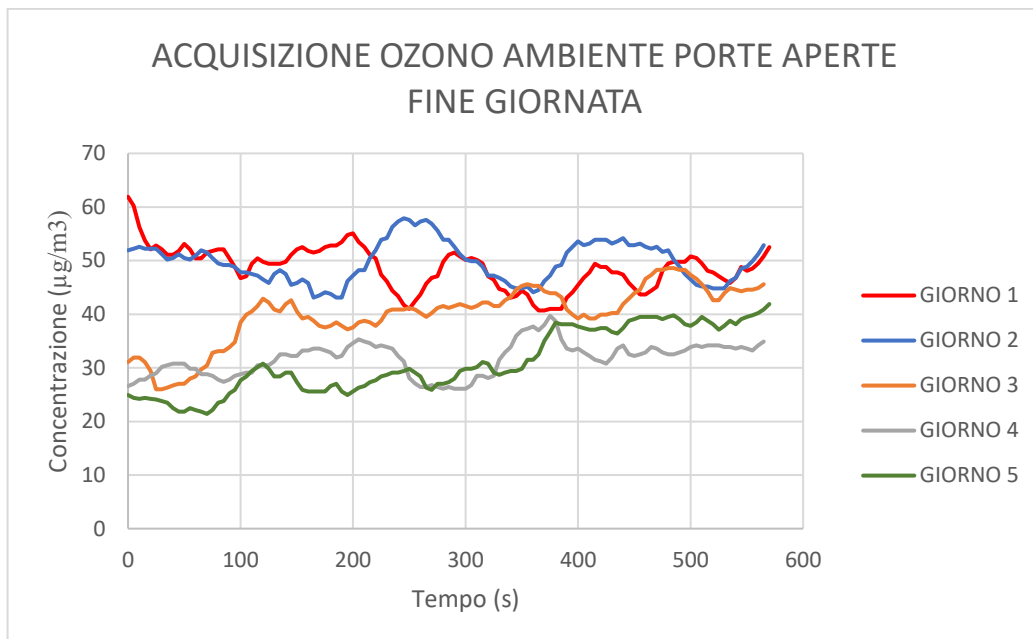


Figura 23 – Acquisizione valori concentrazione di ozono in ambiente con porte aperte fine giornata

## 5. Modifiche del sistema

Successivamente al periodo di prove effettuato e dopo la visita e valutazione dall'Azienda SABIANA S.p.A. si è convenuto di apportare alcune modifiche per migliorare il sistema di testing.

Le principali modifiche effettuate sono state tre:

- la prima riguardante la **ventola** e quindi la **portata**,
- la seconda la **tensione** applicata nel momento di accensione del filtro
- la terza l'aggiunta di una **sonda** automeggiante.

### 5.1 Modifica ventola

La prima modifica è stata la più lunga da portare a termine. Si è trattato infatti di sostituire la ventola ad aspirazione radiale (Fig 24 e 25) con una ventola ad aspirazione assiale (Fig 26 e 27) dotata anche di una minore portata. Questa modifica è scaturita dalla constatazione che con la ventola radiale la portata minima che potevamo applicare era di 70 m<sup>3</sup>/h, dunque troppo portata troppo alta per apprezzare il salto della concentrazione dell'ozono una volta acceso il filtro poiché la ventola, per l'elevata portata, diluiva troppo l'aria all'interno del box.

La consapevolezza di ciò è stata raggiunta studiando i risultati ottenuti dalle prove fatte sia a breve che a lungo termine nelle quali si è notata una differenza di ozono non apprezzabile tra filtro trattato e quello non trattato.

Si è inoltre capito che questo salto ottenuto dall'accensione e spegnimento del filtro è sempre meno apprezzabile all'aumento della portata. Questi aspetti sono stati da noi osservati studiando soprattutto le prove a breve termine durante le quali abbiamo analizzato la produzione di ozono per tre portate crescenti: 70 m<sup>3</sup>/h, 140m<sup>3</sup>/h e 184 m<sup>3</sup>/h.

Per sostituire la ventola radiale con quella assiale si è artigianalmente creato una struttura tale per cui la ventola si adattasse bene al sistema già esistente e quindi una volta trovata la soluzione con una tavola di un materiale simile alla plastica (Fig 28), si è potuta misurare la portata effettiva della nuova ventola tramite misure di velocità di flusso.

Questo passaggio è stato eseguito con l'aiuto di:

- a) un variac (Fig 31), uno strumento che permette di aumentare e diminuire l'alimentazione della ventola e dunque la sua velocità e portata;
- b) un anemometro (Fig 32) cioè un misuratore di velocità dell'aria in grado di calcolare la portata in base al diametro.

Per poter misurare la velocità effettiva è stato inoltre necessario posizionare un tubo tra la ventola assiale e l'anemometro (Fig 33 e 34). Il tubo ha diametro uguale all'anemometro (9 cm) e lunghezza pari a 10 diametri. Tali proporzioni consentono una corretta misurazione della velocità senza interferenze da parte delle turbolenze della ventola e in corrispondenza si è misurata la sua portata effettiva utilizzando l'anemometro.

## 5.2 Modifica tensione del filtro

La seconda modifica ha consentito di aggiungere un voltmetro per misurare e controllare la tensione elettrica nell'accensione del filtro.

Per fare ciò si sono messe in atto, in termini di sicurezza, tutte le precauzioni necessarie a confinare all'interno della scatola di alimentazione del filtro la 'punta' del voltmetro, al fine di evitare scosse elettriche toccando inavvertitamente alcuni componenti. (Fig 35 e 36)

Abbiamo perciò aggiunto un rivestimento di plastica in modo avvolge la punta all'interno della scatola elettrica, per poter isolare le zone critiche in cui passava la corrente elettrica.

## 5.3 Modifica sonda automediante

L'ultima modifica è stata quella della sonda automediante in acciaio che è stata introdotta per poter avere una posizione stabile e coerente della sonda che misura l'ozono.

Quando durante le prove misuravamo l'ozono, nel box o nell'ambiente, il valore era registrato da un sondino di plastica attaccato all'ozone-monitor. Per misurare l'ozono nel box il sondino veniva inserito in un foro presente nella parete del box ma il suo affondamento non era mai uguale a quello precedente poiché la punta poteva essere inclinata verso destra o verso sinistra, in base a come veniva inserito.

Considerando questo aspetto si è quindi introdotto un tubo in acciaio in corrispondenza del foro del box in modo tale che lo attraversasse in tutta la sua lunghezza e all'interno del tubo veniva inserita la sonda in plastica. Ovviamente il diametro della sonda era poco più piccolo di quello del tubo così da essere quasi fissata.

Inoltre sono stati fatti diversi fori nel tubo di acciaio in modo tale che il sondino potesse captare le concentrazioni di ozono all'interno del box. (Fig 37 e 38)

## 6. Documentazione fotografica delle modifiche



Figura 24 – Ventola radiale avvolta dalla gabbia protettiva. La ventola radiale garantisce una portata minima di  $70 \text{ m}^3/\text{h}$  potendo arrivare ad una portata massima di  $184 \text{ m}^3/\text{h}$  e può essere regolata con un sistema incorporato alla ventola.



Figura 25 - Ventola radiale ad aspirazione vista frontalmente





Figura 26 – Ventola assiale usata nel nuovo sistema che garantisce una portata minore



Figura 27 - Ventola assiale vista frontalmente

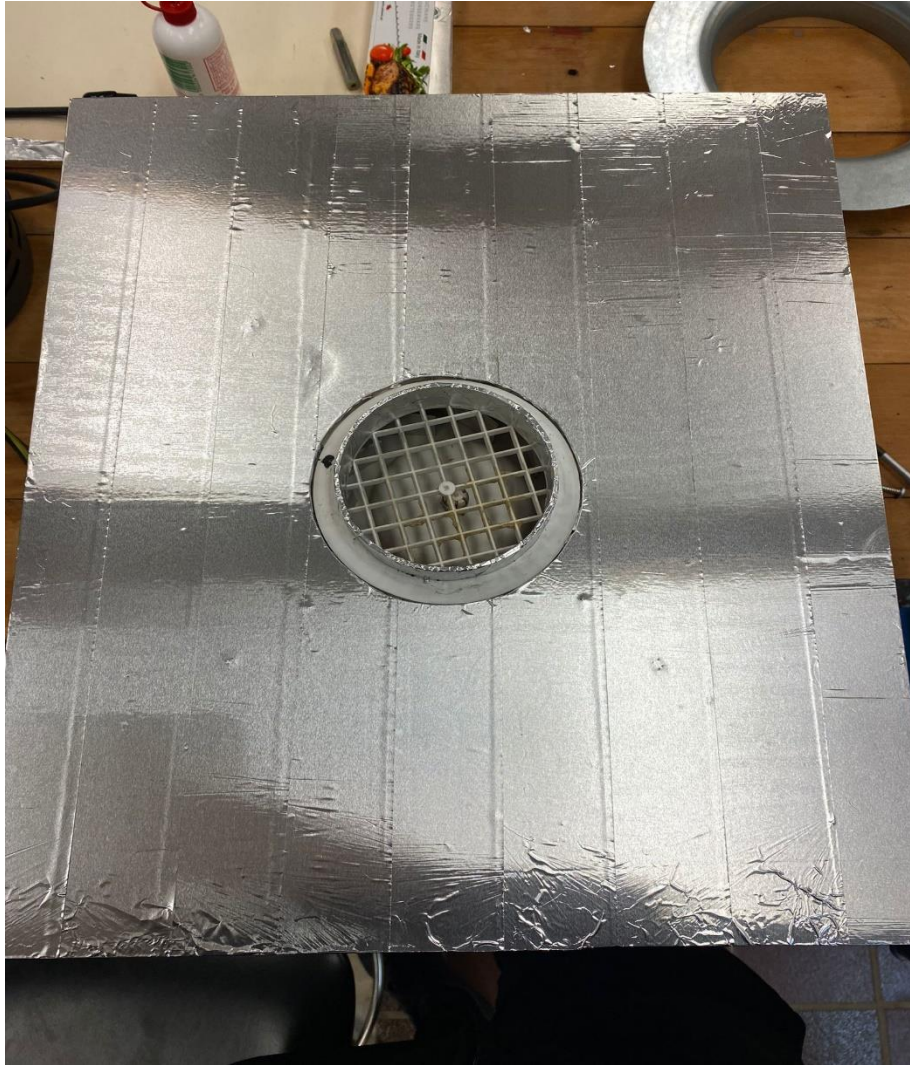


Figura 28 – Per integrare la nuova ventola si è utilizzata una tavola di un materiale simile alla plastica rivestendola di alluminio per evitare che l'ozono interferisse con la tavola; che è stata poi forata in modo tale che la ventola entrasse all'interno del foro.



Figure 29 e 30 – Ventola assiale inserita nel nuovo sistema





Figura 31 – Variac utilizzato per variare la portata gradualmente



Figura 32 – Anemometro con il quale man mano che la portata aumenta consente di leggere i valori corrispondenti alla variazione di alimentazione del variac



Figura 33 – Tubo in pvc attaccato alla ventola usato per la misurazione



Figura 34 - Anemometro attaccato alla fine del tubo

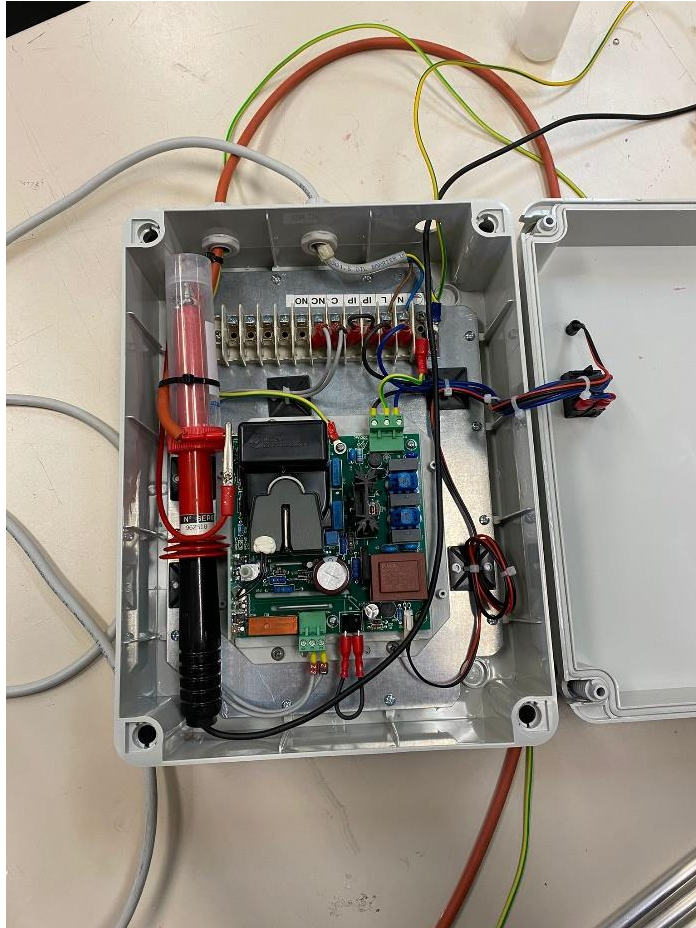


Figura 35 - Punta del voltmetro dentro la scatola del filtro



Figura 36 – Voltmetro





Figura 37 - Tubo di acciaio forato



Figura 38 - Tubo all'interno del box

## 7. Conclusione

In questo studio si è voluto analizzare come lavorassero i due filtri a lungo termine in relazione alla portata della ventola. Possiamo concludere dicendo che le prove hanno evidenziato come la produzione di ozono dei due filtri sia simile. Questo risultato non ci ha soddisfatto a pieno poiché ci aspettavamo che il filtro trattato producesse ozono con concentrazioni minori rispetto a quello non trattato.

Per raggiungere il fine del nostro lavoro è stato necessario cambiare la ventola diminuendone la sua portata e questo per apprezzare maggiormente il salto dei valori di concentrazione di ozono nella fase di accendimento e spegnimento del filtro in cui si ha una minore diluizione di aria determinata dalla ventola.

Questo è ciò che abbiamo ipotizzato e che si proverà a verificare successivamente nella continuazione del progetto con l'Azienda SABIANA S.p.A.

Con queste variazioni tutto il sistema è stato modificato tanto che i dati di eventuali studi successivi non potranno essere comparati con quelli di questa trattazione ottenuti senza le terze modifiche sopra indicate e questo soprattutto per la grande differenza della portata della ventola.



## Sitografia e bibliografia

- [1] [http://www.ozone-engineering.com/api\\_model450.html](http://www.ozone-engineering.com/api_model450.html)
- [2] <https://www.sabiana.it/it/media/newsletters/crystall-filter>
- [3] <https://www.sabiana.it/it/products/crystall-duct-system>
- [4] <https://miglioriclassifica.eu/generatore-di-ozono/>
- [5] <https://www.ariasicura.it/qualita-dellaria-indoor-5-fattori-chiave/>
- [6] <https://www.unoenergyis.it/filtri-elettrostatici-dove-quando-e-perche-applicarli/#:~:text=Il%20filtro%20elettrostatico%20permette%20di,flusso%20privo%20di%20agenti%20contam>
- [7] [https://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_opuscoliPoster\\_283\\_ulterioriallegati\\_ulterioreallegato\\_8\\_alleg.pdf](https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_8_alleg.pdf)
- [8] <http://wpage.unina.it/antcaval/pdf/filesitei/lez%2010.pdf>
- [9] <http://www3.arpa.marche.it/doc/htm/ozono.htm>
- [10] <https://www.oxidationtech.com/downloads/manuals/API-450-Brochure.pdf>
- [11] <http://www.arpab.it/aria/normativa/D.P.C.M.28marzo1983.pdf>
- [12] [https://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_paginaRelazione\\_1438\\_listaFile\\_itemName\\_3\\_file.pdf](https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_paginaRelazione_1438_listaFile_itemName_3_file.pdf)
- [13] <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/550217>
- [14] <https://www.mite.gov.it/pagina/normativa>
- [15] <https://www.treccani.it/enciclopedia/ozono/>
- [16] [https://www.treccani.it/enciclopedia/ozono-atmosferico\\_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/ozono-atmosferico_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/)
- [17] [Luigi Bontempi, "La qualità dell'aria interna"](#)