



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in:

Ingegneria Civile e Ambientale

**MISURE DI EFFICIENZA DI MATERIALI E DISPOSITIVI PER LA DEPURAZIONE
DELL'ARIA INTERNA - PROVE A SCALA PILOTA**

**EFFICIENCY MEASURES OF INDOOR AIR PURIFICATION MATERIALS AND DEVICES -
PILOT SCALE TESTS**

Relatore:

Prof.ssa RUELLO MARIA LETIZIA

Tesi di Laurea di:

MARTELLI MARIO

Correlatore:

Prof. DI PERNA COSTANZO

A.A. 2023 /2024

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
2. QUALITÀ DELL'ARIA IN AMBIENTE INDOOR	6
2.1 INQUINANTI DELL'ARIA INDOOR	8
2.2 EFFETTI SULLA SALUTE UMANA DELL'INQUINAMENTO DELL'ARIA INDOOR	10
3. OBIETTIVI	13
4. MATERIALI, STRUMENTAZIONE E SOFTWARE	14
5 PANNELLI OGGETTO DI STUDIO	23
4.1 TEST-ROOM.....	14
4.2 SOFTWARE E SENSORISTICA DELLA TEST ROOM.....	17
4.3 INQUINANTI MODELLO E STRUMENTAZIONE	20
6 METODO DI PROVA	25
7 RISULTATI	28
7.1 RISULTATI DEL CONFRONTO TRA PANNELLI	29
7.2 RISULTATI DEL CONFRONTO TRA INQUINANTI	36
7.3 RISULTATI DELLE PROVE CON L'UNITÀ DI TRATTAMENTO ARIA.....	41
8 CONSIDERAZIONI FINALI	46
BIBLIOGRAFIA	48

1. INTRODUZIONE

L'aria pulita è un requisito fondamentale della vita [1]. L'esposizione agli inquinanti dell'aria rappresenta un rischio per il benessere e la salute dell'uomo e degli ecosistemi [2]. Questo ha portato una forte attenzione, da parte della comunità scientifica, verso l'inquinamento atmosferico dell'aria ambiente (outdoor), cercando attraverso una serie di misure di limitarlo e contenerlo entro determinati margini in modo da non arrecare danno alla salute umana. Meno attenzione è stata data alla qualità dell'aria in ambienti chiusi(indoor).

Le indagini sugli stili di vita della popolazione ci dicono che le persone, nell'arco della giornata, trascorrono la maggior parte del proprio tempo in ambienti chiusi [2]. Questa considerazione ha indotto la comunità scientifica internazionale ad esaminare in maniera più profonda la questione legata alla contaminazione dell'aria in ambienti chiusi.

2. QUALITÀ DELL'ARIA IN AMBIENTE INDOOR

Negli ultimi anni la qualità dell'aria indoor è stata finalmente riconosciuta come obiettivo imprescindibile di una strategia integrata relativa all'inquinamento atmosferico nel suo complesso. Basti pensare che nel 2000 l'Organizzazione Mondiale della Sanità, tramite il documento del "The Right to Healthy Indoor Air", ha riconosciuto una salutare aria indoor come un diritto umano fondamentale [2].

Per ambienti indoor si intendono gli ambienti confinati di vita e di lavoro non industriali (per quelli industriali vige una specifica normativa), ed in particolare, quelli adibiti a dimora, svago, lavoro e trasporto. Secondo questo criterio, l'ambiente indoor comprende:

- le abitazioni;
- gli uffici pubblici e privati;
- le strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, etc.);
- locali destinati ad attività ricreative e/o sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive, etc.);
- mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, etc.).

Si tratta quindi di ambienti nei quali la popolazione trascorre gran parte del proprio tempo subendo, di conseguenza, un prolungato contatto con le potenziali sorgenti di inquinamento. Studi condotti in paesi altamente industrializzati quali gli Stati Uniti, hanno rivelato che la popolazione trascorre una parte molto rilevante del proprio tempo (fino al 90%) [U.S.EPA, 1989] negli ambienti confinati come le abitazioni, edifici pubblici e privati e mezzi di trasporto. Questa alta percentuale, insieme all'evidenza che in tali paesi la popolazione già da tempo vive in ambienti per la maggior parte

climatizzati e quindi termicamente isolati, ha condotto a studi avanzati sulla questione del problema dell'inquinamento dell'aria indoor [2].

2.1 Inquinanti dell'aria indoor

In un ambiente chiuso si possono sviluppare numerosi inquinanti dell'aria che hanno origine da varie sorgenti. Tra le fonti di inquinanti più comuni troviamo il fumo di tabacco, i processi di combustione, i prodotti per la pulizia e la manutenzione della casa, gli antiparassitari, l'uso di colle, adesivi, solventi etc., l'utilizzo di strumenti di lavoro quali stampanti, plotter e fotocopiatrici e prodotti per l'hobbistica (es. colle e vernici).

Le sostanze inquinanti possono essere classificate in agenti chimici, fisici e biologici. Gli inquinanti chimici comprendono una serie di sostanze naturali o artificiali che, presenti nell'aria in forma liquida, solida o gassosa, ne peggiorano la qualità.

I maggiori contaminanti di natura chimica sono:

- monossido di carbonio (CO);
- biossido di azoto (NO₂);
- biossido di zolfo (SO₂);
- composti organici volatili (VOC);
- particolato aerodisperso (PM₁₀, PM_{2.5});
- benzene (C₆H₆) [2].

Per contaminanti biologici s'intende una serie di sostanze di origine biologica che possono incidere negativamente sulla qualità dell'aria sia indoor che outdoor. Le principali fonti di inquinamento microbiologico nei locali sono rappresentate dagli occupanti (persone, animali, piante), dalla polvere (ottimo ricettacolo per i microrganismi), dalle strutture e dai servizi degli edifici. A queste fonti, si aggiungono gli umidificatori e i condizionatori d'aria, dove la

presenza di elevata umidità e l'inadeguata manutenzione facilitano l'insediamento e la moltiplicazione dei contaminanti biologici che poi vengono diffusi nei vari ambienti.

Tra i contaminanti biologici indoor più comuni troviamo:

- i batteri, trasmessi dalle persone e dagli animali ma presenti anche in luoghi con condizioni di temperatura e umidità che ne favoriscono la crescita;
- i virus, trasmessi dalle persone e dagli animali infettati;
- i pollini delle piante, provenienti soprattutto dall'ambiente esterno;
- funghi e muffe che si formano all'interno dei luoghi confinati per problemi d'umidità o che possono penetrare dagli ambienti esterni;
- gli acari, considerati tra le principali cause di allergia ed asma poiché, tramite le loro feci, producono dei potenti allergeni facilmente inalabili [2].

Tra gli agenti fisici si evidenziano:

- campi elettromagnetici;
- radon;
- rumore [2].

2.2 Effetti sulla salute umana dell'inquinamento dell'aria indoor

La qualità dell'aria indoor (IAQ) ha un impatto significativo sulla salute e sulla qualità della vita in generale. L'Organizzazione Mondiale della Sanità stima che l'inquinamento atmosferico domestico (Household air pollution - HAP) sia responsabile di circa 4,3 milioni di morti premature all'anno [3].

Inoltre, per molte persone, i rischi per la salute derivanti dall'esposizione all'inquinamento dell'aria interna possono essere maggiori di quelli legati all'inquinamento esterno. In particolare, una scarsa qualità dell'aria interna può essere dannosa per gruppi vulnerabili come bambini, giovani adulti, anziani o coloro che soffrono di malattie respiratorie e/o cardiovascolari croniche [4].

L'esposizione all'inquinamento dell'aria interna dipende anche dal contesto sociale, economico e culturale in cui ci si trova.

Nei Paesi a reddito medio-basso, quasi tre miliardi di persone fanno affidamento quotidianamente sui combustibili derivanti dalla biomassa per cucinare e riscaldarsi. I combustibili da biomassa, spesso definiti combustibili solidi, includono legno, scarti di colture agricole e carbone. La loro combustione rappresenta una fonte significativa di inquinamento domestico per via della liberazione di molteplici sostanze inquinanti (monossido di carbonio CO, biossido di azoto NO₂, particolato, composti organici tossici, ecc.) [3]. Numerosi sono gli effetti che queste sostanze arrecano alla salute respiratoria:

- basso peso alla nascita e funzione polmonare attenuata;
- infezione respiratoria infantile;
- aumento del rischio di sviluppo di asma, broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO), cancro ai polmoni;

- esacerbazioni di malattie esistenti [3].

È stato dimostrato che i bambini che vivono in edifici che utilizzano combustibili solidi presentano un rischio maggiore di sviluppare infezioni acute delle vie respiratorie inferiori (Acute Lower Respiratory Infections - ALRIs) di 2-3 volte superiore rispetto a quelli che bruciano combustibili puliti. Infatti, l'inquinamento dell'aria indoor aumenta il rischio di infezioni acute delle vie respiratorie inferiori infantile del 78%, che porta ogni anno a un milione di decessi tra i bambini sotto i 5 anni di età [5].

Altre patologie legate all'inquinamento dell'aria indoor sono:

- Sick Building Syndrome (SBS), ovvero sindrome dell'edificio malato;
- Building Related Illness (BRI) [2].

La sindrome dell'edificio malato (SBS) si manifesta con una serie di sintomi non correlati con un agente in particolare. È stato riportato che i sintomi tendono a peggiorare in funzione del tempo di esposizione negli edifici e possono scomparire quando le persone trascorrono più tempo lontano dall'edificio [5].

Secondo l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità), i sintomi della SBS causati dalla IAP (Indoor Air Pollution) possono essere suddivisi in quattro categorie:

- Irritazione delle mucose: irritazione degli occhi, della gola e del naso;
- effetti neurotossici: mal di testa, irritabilità e affaticamento;
- asma e sintomi simili all'asma: costrizione toracica e respiro sibilante;
- irritazione e secchezza della pelle, problemi gastrointestinali (ad esempio diarrea) e altri [5].

Fattori come un basso tasso di ventilazione, l'umidità dell'edificio e un'elevata temperatura ambiente tendono ad aumentare la probabilità di prevalenza della SBS [5].

Il termine BRI viene invece attribuito ad alcune patologie per le quali vi è una diretta correlazione con la permanenza all'interno di un edificio e per le quali si conosce lo specifico agente eziologico che ne è la causa. Tra le più comuni troviamo la legionellosi, la febbre da umidificatore, l'alveolite allergica, l'asma e l'avvelenamento da monossido di carbonio, ma in generale interessano solo un numero limitato di persone [2].

3. OBIETTIVI

Si è visto che i bambini sono più vulnerabili, rispetto agli adulti, ai rischi legati all'inquinamento degli ambienti interni, con maggiori possibilità di sviluppare malattie respiratorie ed allergie a causa di un sistema respiratorio e immunitario non ancora sviluppato. Essi trascorrono gran parte del loro tempo in edifici scolastici di non recente costruzione, la cui progettazione è stata eseguita senza dare particolare attenzione al comfort degli occupanti. In molti casi le strutture sono sprovviste di sistemi di ventilazione meccanica oppure laddove ci fossero sono ormai obsoleti e questo contribuisce ad aumentare l'esposizione degli scolari ad un'aria inquinata. Uno studio sull'impatto dell'inquinamento dell'aria interna e delle sue fonti nell'ambiente scolastico ha mostrato che concentrazioni più elevate di inquinanti dell'aria interna nelle scuole possono essere correlate a vari esiti avversi per la salute, vale a dire sintomi e malattie allergiche e respiratorie. Inoltre, negli scolari è stata osservata anche una diminuzione del rendimento scolastico [6].

A fronte di ciò, l'obiettivo del seguente elaborato è quello di andare a sviluppare una soluzione che apporti delle migliorie, in termini di comfort per gli occupanti, all'interno delle aule scolastiche, puntando ad ottimizzare gli aspetti termici, acustici e, soprattutto, di qualità dell'aria. Più precisamente, si è andati a valutare le prestazioni di pannelli per il controsoffitto di nuova concezione, dal punto di vista dell'IAQ, tramite delle analisi preliminari svolte in laboratorio in una test room, per poi fare un confronto con i pannelli tradizionali in cartongesso. Questo lavoro si inserisce in uno studio più ampio che riguarda lo sviluppo di controsoffitti innovativi che mirano a migliorare non solo la qualità dell'aria interna ma anche gli aspetti legati al comfort termico e acustico delle aule.

4. MATERIALI, STRUMENTAZIONE E SOFTWARE

4.1 Test-room

Per valutare le prestazioni dei pannelli innovativi si è usufruito di una test room (Figura 1), che simulasse una porzione di un'aula scolastica. Questa struttura è stata costruita e messa appunto in uno dei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, sotto la guida del professor Costanzo Di Perna.



Figura 1: Test Room

L'ambiente della stanza è delimitato da quattro pareti verticali e da due superfici orizzontali: pavimento e solaio di copertura. Il lato corto del perimetro misura 3,4 m ed è posto perpendicolarmente alle finestre del laboratorio, mentre quello più lungo misura 4,4 m, per un'area totale della stanza di 14,96 m².

L'altezza tra pavimento e controsoffitto misura 2,7 m per un volume totale dell'ambiente di 40,39 m³. Il pavimento della test room risulta rialzato, rispetto al pavimento del laboratorio, di circa 40 cm, in modo da isolare al meglio la stanza. Lo spessore delle pareti perimetrali è di 0,04 m e sono costituite da un pannello in cartongesso dello spessore di 0,01 m e da un pannello in polistirene dello spessore di 0,03 m per limitare le dispersioni termiche. Per quanto riguarda il pavimento invece, è costituito da pannelli di legno compensato e barriera al vapore in alluminio dello spessore di 0,05 m, mentre la copertura è stata realizzata con pannelli di controsoffitto in cartongesso da 0,60 x 0,60 m, appoggiati su un telaio di alluminio ancorato al soffitto del laboratorio. La pianta (Figura 2) e una sezione (Figura 3) della struttura in questione sono illustrate di seguito [7].

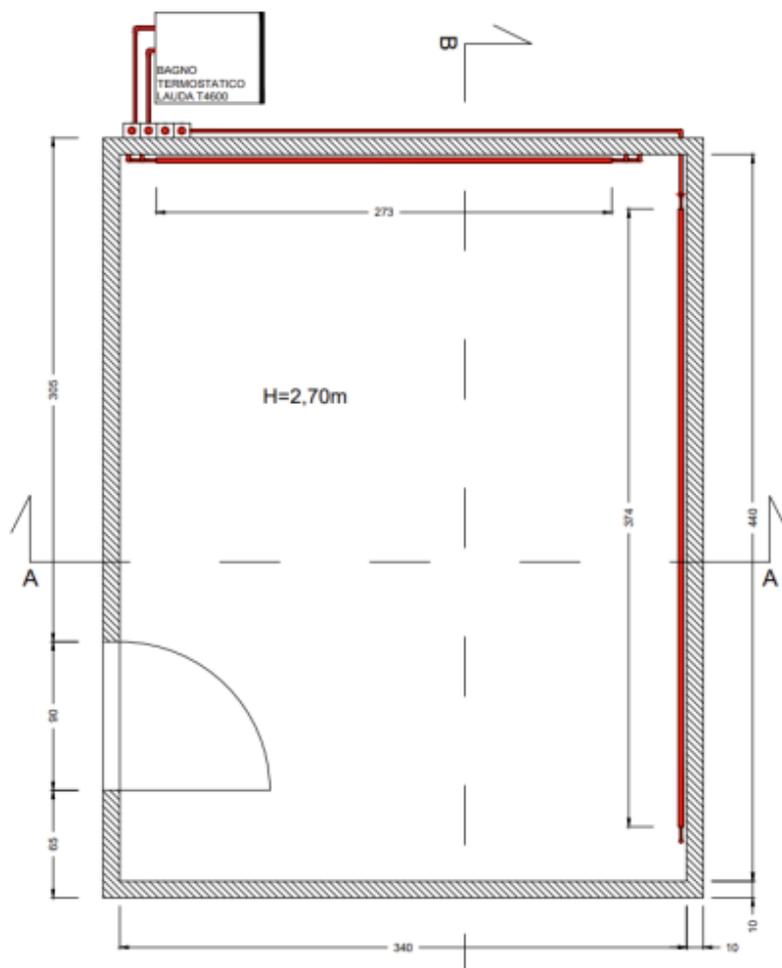


Figura 2: Pianta Test Room

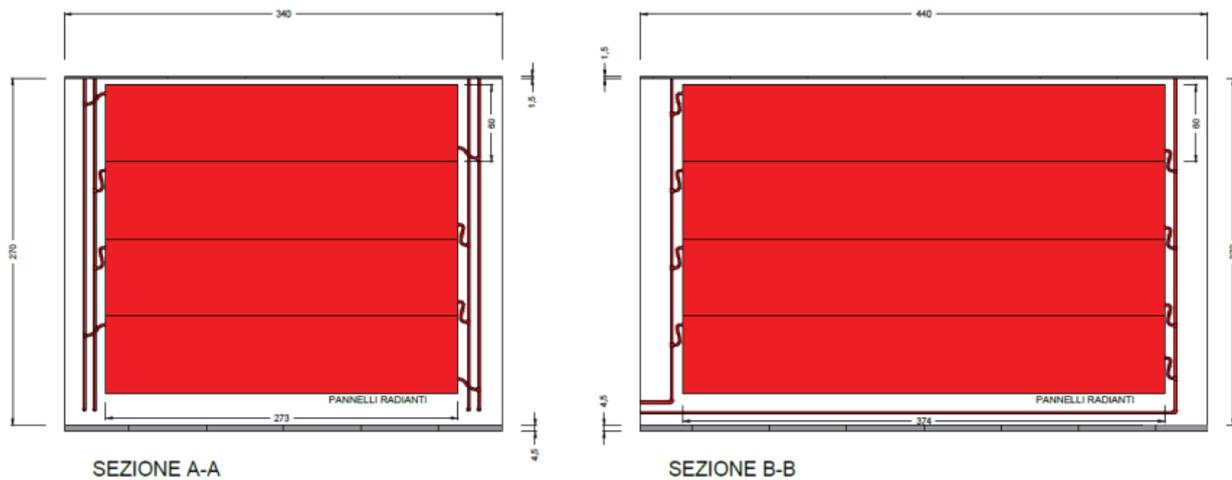


Figura 3: Sezioni Test Room

L'ambiente in questione è dotato anche di un impianto di riscaldamento e di raffreddamento. Si tratta di un impianto a pannelli radianti a parete disposto su due delle quattro pareti verticali della stanza. Per le prove di cui si tratterà nella presente tesi c'era l'esigenza di raffreddare l'ambiente, dato che il periodo era tra settembre e novembre, quindi nei pannelli circolava acqua fredda.

L'acqua circolante viene raffrescata da un refrigeratore/riscaldatore Lauda T4600. Questo sistema ha una potenza di refrigerazione (misurata con etanolo in circolazione) di circa 4 kW, un consumo di 8,5 kW ed una stabilità di $\pm 0,20$ K. Il refrigeratore è in grado di erogare un flusso massimo di 40 l/min, esercita una pressione di 3,2 bar ed utilizza come gas refrigerante l'R 404 a. L'acqua refrigerata viene poi distribuita nei pannelli, quattro posti in parallelo lungo la parete Nord e altri quattro posti in parallelo a due a due sulla parete Ovest. Questa distribuzione avviene attraverso un collettore a tre uscite dove è possibile regolare il flusso attraverso l'apertura e chiusura di una valvola per ciascuna uscita [7].

4.2 Software e sensoristica della test room

La messa appunto della test room ha riguardato anche lo sviluppo di un sistema per la misurazione, più accurata possibile, dei parametri ambientali al suo interno.

Per gestire il complesso di sensori impiegati è stato utilizzato un sistema Home Assistant (Figura 4), un software di domotica che permette di gestire dispositivi smart in una rete di automazione domestica e ne gestisce il traffico e le comunicazioni.

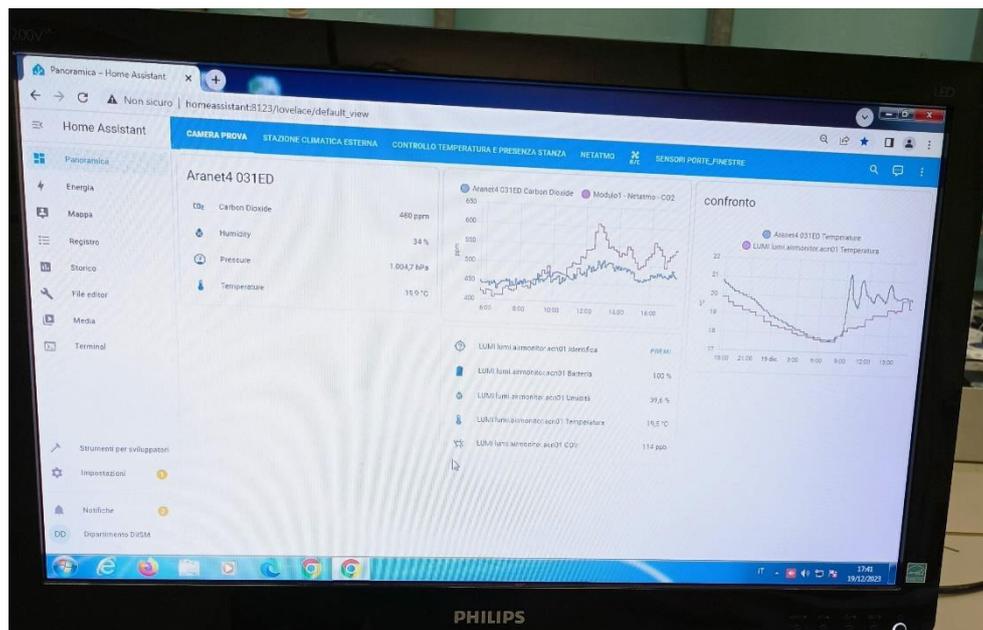


Figura 4: Schermata Home Assistant

Questo è un programma gratuito e open source, ma soprattutto ha un grande vantaggio, non si basa sul cloud ma sulla rete locale. Questo significa che per funzionare non si deve connettere a server remoti, ma tutto rimane nella rete locale, con due implicazioni immediate e importanti: velocità e sicurezza. Essendo locale, vi è la necessità di installarlo su un dispositivo (PC). Per ragioni di comodità, il dispositivo utilizzato è un Raspberry Pi 4. La Raspberry Pi è una piccola scheda madre grande quanto una mini-calcolatrice, con una configurazione principale che prevede una porta LAN Wi-Fi, ingressi USB e HDMI, 1 slot per schede SD e un'uscita audio jack stereo, con una porta

microUSB per l'alimentazione. A seconda del modello sono presenti molti altri connettori, per collegare dispositivi esterni come display LCD e perfino webcam [7].

Per rilevare la temperatura e l'umidità interna della test room è stato usato il sensore Aranet4 Home (Figura 5), ma anche un sensore dell'Aqara (Figura 6), modello AAQS-S01, per un confronto, entrambi installati e configurati su Home Assistant.

L'Aranet4 Home è un sensore wireless alimentato a batteria, che oltre a temperatura e umidità relativa, è progettato per monitorare anche i valori di CO₂ nell'ambiente in cui è posto.

Generalmente, le misurazioni effettuate dai sensori di temperatura si basano su due valori: il primo è la frequenza di campionamento, un valore impostato di fabbrica dalla casa produttrice; il secondo invece è la risoluzione che esso usa durante il periodo di campionamento. La risoluzione di un sensore è definita come la minima variazione della variabile misurata che dà luogo ad una variazione rilevabile dell'uscita [7].

La risoluzione dell'Aranet4 Home è di 0,1°C e mostra un dato ogni cinque minuti, anche se la temperatura rimane costante.

Per quanto riguarda il sensore dell'Aqara, esso è in grado di rilevare la concentrazione e il livello di composti organici volatili (TVOC/VOC) nell'aria, oltre che la temperatura e l'umidità. È alimentato a batteria, che può durare anche più di un anno, e la risoluzione, in termini di temperatura, è di 0,1°C.



Figura 5: Aranet4 Home



Figura 6: Sensore Aqara

Di seguito, nella Tabella 1, sono riportate le caratteristiche tecniche dei dispositivi.

Sensore	Unità di misura	Range operativo	Errore
Aranet4 Home	°C	0° a 50°C	0,3°C
	ppm	0 a 9999	±30 ppm
	% RH	0% a 100%	±3%
Sensore Aqara (modello AAQS-S01)	°C	0° a 50°C	/
	ppb	0 a 2500 ppb	/
	% RH	0% a 100%	/

Tabella 1: Caratteristiche sensori

Nella test room sono state installate e configurate anche delle termocoppie, con il fine di riuscire a rilevare la presenza delle persone all'interno dell'ambiente, in modo da simulare effettivamente un'aula scolastica. Tuttavia, per quanto riguarda le prove di cui tratta la presente tesi, queste non sono state utilizzate.

4.3 Inquinanti modello e strumentazione

Nelle prove che verranno descritte in seguito, sono stati utilizzati due inquinanti dell'aria indoor molto comuni che rientrano nel gruppo dei composti organici volatili COV (o VOC – Volatile Organic Compound).

In base al comma 11, art.268 del DLgs152/2006, vengono definiti COV, qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K (20°C) una pressione di vapore di 0,01 KPa superiore.

Appartengono a questa classe numerosi composti chimici quali idrocarburi alifatici, aromatici e clorurati, aldeidi, terpeni, alcoli, esteri e chetoni. Varie sono le sorgenti di inquinamento di Composti Organici Volatili (COV) nell'aria degli ambienti indoor: gli “occupanti” attraverso la respirazione e la superficie corporea, i prodotti cosmetici o deodoranti, i dispositivi di riscaldamento, i materiali di pulizia e prodotti vari (es. colle, adesivi, solventi, vernici,), abiti trattati recentemente in lavanderie, il fumo di sigaretta e strumenti di lavoro, quali stampanti e fotocopiatrici. Altre importanti fonti di inquinamento sono i materiali da costruzione e gli arredi (es. mobili, moquette, rivestimenti).

Il primo inquinante utilizzato è stato il Metiletilchetone, o MEK. Conosciuto anche come Butanone, si tratta di una sostanza avente formula $\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$, peso molecolare di 72,11 g/mol e densità di 0,805 g/cm³.

A temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore con un odore simile ad un solvente: viene spesso usato come solvente in molte lavorazioni, ad esempio del legno, oppure per la pulizia di strumenti e parti meccaniche.

È stato scelto per la sua minore tossicità rispetto ad altri COV presenti negli ambienti chiusi come ad esempio il benzene e la formaldeide considerati cancerogeni.



Figura 7: Metiletilchetone

Il secondo inquinante utilizzato è stato il Toluene (Figura 8). La formula chimica è C_7H_8 , ha massa molare 92,14 g/mol e una densità di 0,81 g/cm³. Questa sostanza viene utilizzata in vari prodotti come colle, adesivi, vernici, lacche, solventi per unghie, diluenti e in particolare negli inchiostri; infatti, il processo di stampa a rotocalco è una delle fonti di emissione principale di toluene a causa dell'elevata frazione di toluene nell'inchiostro per rotocalco (60–75% in peso) [8]. Questo è il motivo per cui è stato scelto il toluene dato che in ambiente scolastico gli inchiostri e i materiali di stampa sono ampiamente utilizzati.



Figura 8: Toluene

Lo strumento utilizzato per rilevare la quantità di VOC è il sensore S900 (Figura 9), prodotto da Aeroqual. Calibrato con Isobutene, esso presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

- Range: 0-30 ppm;
- Limite minimo di rilevamento: 0,01 ppm;
- Accuratezza: $< \pm 0,02 \text{ ppm} + 10\%$;
- Risoluzione: 0,01 ppm.

Per collegare il sensore S900 al PC (Figura 10) è stato utilizzato un cavo convertitore da RS485 a USB e tramite un software (Figura 11), scaricato dal sito dell'Aeroqual, si è riusciti a trasferire i dati del rilevamento dei VOC direttamente su un foglio Excel.



Figura 9: Sensore S900

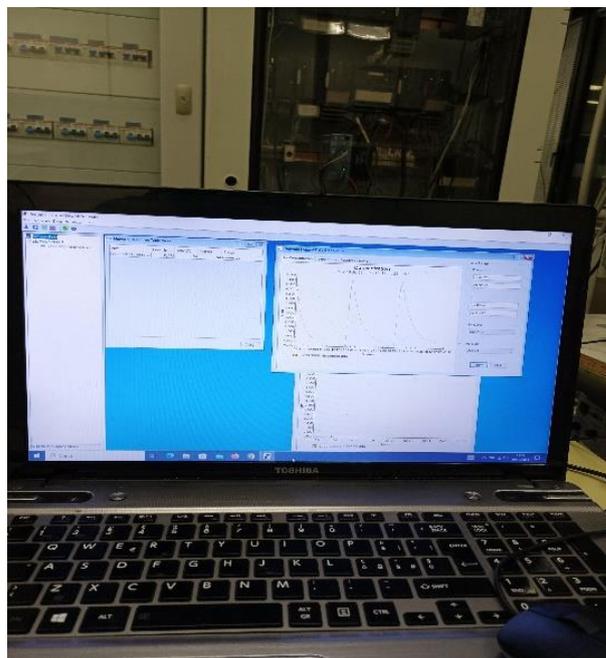


Figura 10: PC e software dell'Aeroqual

5 PANNELLI OGGETTO DI STUDIO

L'oggetto principale di questo studio sono sicuramente i pannelli che costituiscono i controsoffitti nelle scuole, in particolare quelli di nuova concezione sviluppati con lo scopo di migliorare il comfort degli scolari all'interno delle aule.

Ad oggi, nella maggior parte dei locali scolastici si trovano pannelli (Figura 11) realizzati in fibre minerali, di dimensioni 600x600x12mm, sorretti da un telaio in alluminio. Hanno un indice di riflessione luminosa di circa l'88% e un indice di assorbimento acustico α_w di circa 0,55 calcolato secondo EN ISO 11654 [7].



Figura 11: Controsoffitto comune

I pannelli di nuova concezione, utilizzati nelle prove, sono realizzati con un tessuto in mediafiltrante in polistirene e carboni attivi (Figura 13) utilizzato per l'abbattimento di gas e particelle inquinanti. La particolarità di questi materiali sta nella capacità di abbattere gli inquinanti presenti nell'aria grazie al fenomeno dell'adsorbimento, che avviene tra il tessuto a carboni attivi e il particolato presente nell'aria. Questo comporta anche un'importante azione neutralizzante sui virus e batteri a contatto con la tecnologia applicata [7]. Il pannello è dotato di certificazione Indoor Air Comfort® che ne convalida le bassissime emissioni di VOC (volatile organic compound) in ottica

di un'elevata qualità dell'aria nell'ambiente interno nel rispetto dei principali protocolli internazionali, tra cui French VOC Regulation, Italian CAM Edilizia, BREEAM International e LEED. Inoltre, ha una "Classe di rilascio di formaldeide E1" secondo norma UNI EN 13964, ed è costituito da materiali riciclati per più del 60% del suo peso ed è riciclabile a fine vita [7].

Oltre a contribuire al miglioramento della qualità dell'aria attraverso il tessuto superficiale, i nuovi pannelli presentano anche specifiche prestazioni acustiche. Analizzando la struttura principale, infatti, sono costituiti da un pannello fonoassorbente monofacciale, avente dimensioni di 600x600x35mm, costituito da un pannello in fibra di poliestere termoformato a densità variabile, indicato per la riduzione del riverbero in ambienti interni. La facciata a vista è a sezione convessa, rivestita da tessuto in poliestere autoestinguente Trevira Cs. Il pannello mostrato in Figura 12 ha un coefficiente di fonoassorbimento α_w pari a 0,9 in accordo con la norma UNI EN SO 11654, ottenuto da test eseguiti in camera riverberante secondo norma UNI EN ISO 354 [7].



Figura 12: Controsoffitto con pannelli innovativi



Figura 13: Particolare del tessuto in carboni attivi

6 METODO DI PROVA

Le prove, per il confronto tra pannelli classici e quelli di nuova concezione, sono state eseguite seguendo delle procedure già sperimentate in precedenza da colleghi che hanno lavorato allo stesso progetto.

Preliminarmente c'è stata una fase di regolazione della temperatura e dell'umidità della test-room: tramite i pannelli radianti, posti sulle pareti della stanza, si va a raffreddare l'ambiente per raggiungere una temperatura di 20°C e tramite un deumidificatore si porta l'umidità intorno al 50%.

Una volta raggiunte le condizioni ambientali richieste, monitorate tramite il sensore Aranet4 Home, posto circa al centro della stanza, si prosegue con l'immissione dell'inquinante.

Si preleva 1 ml di inquinante, che sia Metiletilchetone o Toluene, con una siringa (la siringa usata è in vetro "Diamant Glass" al boro silicato con testa in acciaio inox, da 3CC) e si versa su un vetrino da orologio (Figura 14).

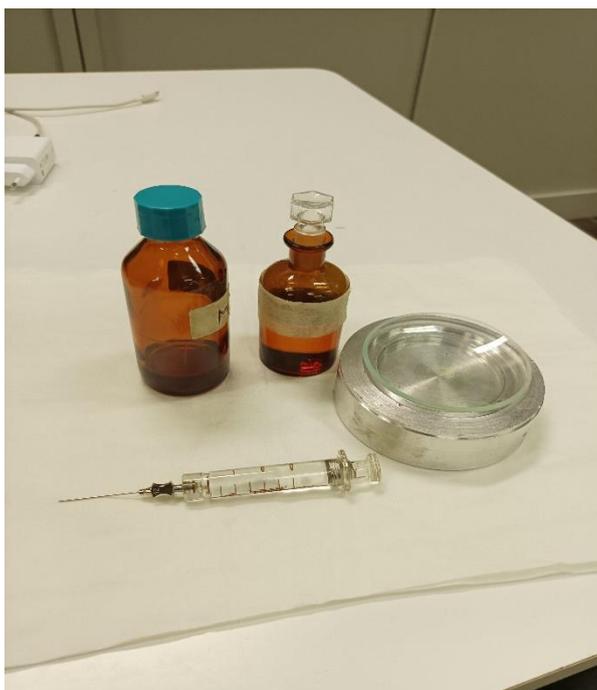


Figura 14: Prelievo dell'inquinante

Si entra nella test-room e si pone il vetrino con l'inquinante nell'angolo tra la parete Sud e quella Est, davanti a una sorgente di ventilazione (Figura 15).

Si accende la sorgente di ventilazione, che ha la funzione di movimentazione d'aria e diffusione dell'inquinante all'interno della stanza affinché ci sia una distribuzione più omogenea possibile. Come sorgente è stata usata una stufetta scaldabagno con solo funzione di ventilazione, senza l'accensione delle resistenze termiche.



Figura 15: Immissione inquinante nella stanza

Si esce dalla stanza e si apre, sul computer, il software “Aeroqual Sensor Network Software” attivando la registrazione dei ppm rilevati dal sensore S900, posto nel centro della camera.

Nei minuti iniziali della prova si avrà un picco dei ppm a seguito del quale si avrà un decadimento della quantità di inquinante. La prova si può considerare conclusa quando l'inquinante sarà completamente evaporato e il valore dei ppm risulterà intorno ai 0,5-0,6 ppm.

In alcune prove è stata utilizzata anche un un'unità di trattamento aria (UTA) con lo scopo di verificare se il decadimento dell'inquinante risultasse più rapido rispetto a quello che avviene con i soli pannelli innovativi.

L'UTA utilizzata (Figura 16) è costituita da una tubazione di ripresa e una di mandata entrambe collegate alla test-room, e da un filtro a tasche di tela (Figura 18) con il quale si è cercato anche di simulare un filtro ai carboni attivi applicando un tessuto in carbone attivo sul davanti (Figura 19). Questa unità viene attivata e disattivata tramite PC (Figura 17), dove è installato un software SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) che permette di gestire la portata d'aria erogata.

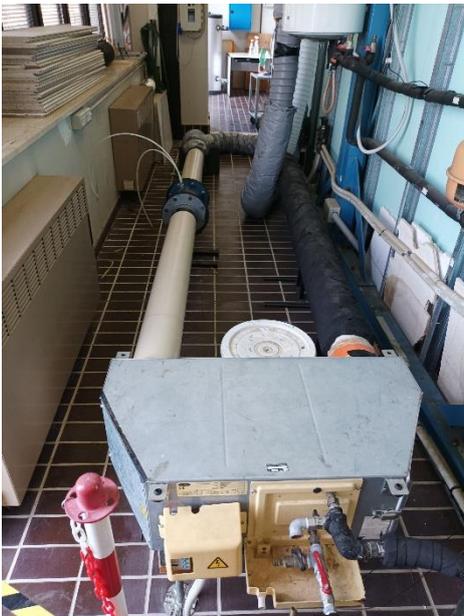


Figura 16: Unità Trattamento Aria

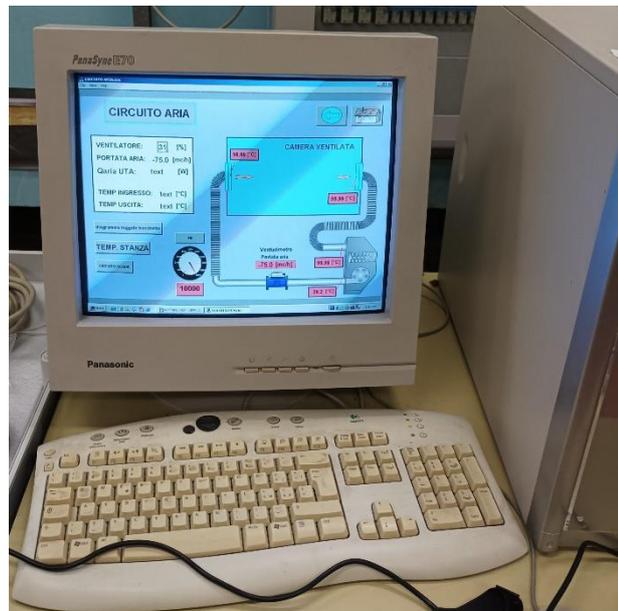


Figura 17: PC con software SCADA



Figura 18: Filtro a tasche originale



Figura 19: Filtro a tasche con davanti tessuto in carbone attivo

7 RISULTATI

In questa sezione verranno riportati i risultati delle prove descritte nel capitolo precedente. Il fine è quello di valutare la capacità dei pannelli innovativi, descritti in precedenza, nell'adsorbire VOC rispetto ai pannelli classici per controsoffitti.

Il confronto tra queste due tipologie riguarderà il decadimento dell'inquinante nel tempo di prova, più veloce sarà e maggiore sarà l'efficacia dei pannelli ad adsorbire il composto organico, guardando anche il valore massimo registrato, ovvero il picco durante la prova, che più è basso e maggiore è l'adsorbimento di sostanza da parte dei pannelli.

L'uso di due inquinanti differenti, il Metiletilchetone (MEK) e il Toluene, permette anche di fare una comparazione per valutare la diversa persistenza delle due sostanze nell'ambiente chiuso.

Infine, sono state eseguite delle prove azionando un'unità di trattamento aria (UTA) con due filtri diversi per vedere se la filtrazione favorisse il decadimento più rapido dell'inquinante.

7.1 Risultati del confronto tra pannelli

I valori dei ppm sono stati registrati, come detto in precedenza, dal software “Aeroqual Sensor Network Software” che, a fine prova, permette di trasferire questi dati su un foglio Excel. A questo punto, si è andati ad analizzare questi valori sottoforma di grafici, i quali, attraverso delle curve, raffigurano l’andamento dell’inquinante nei minuti della prova.

Il primo grafico (Grafico 1), di seguito riportato, mostra le prove effettuate utilizzando il MEK, come inquinante, e i pannelli innovativi. Sono state eseguite più prove per andare a verificarne la riproducibilità e anche per affinare il metodo di prova.

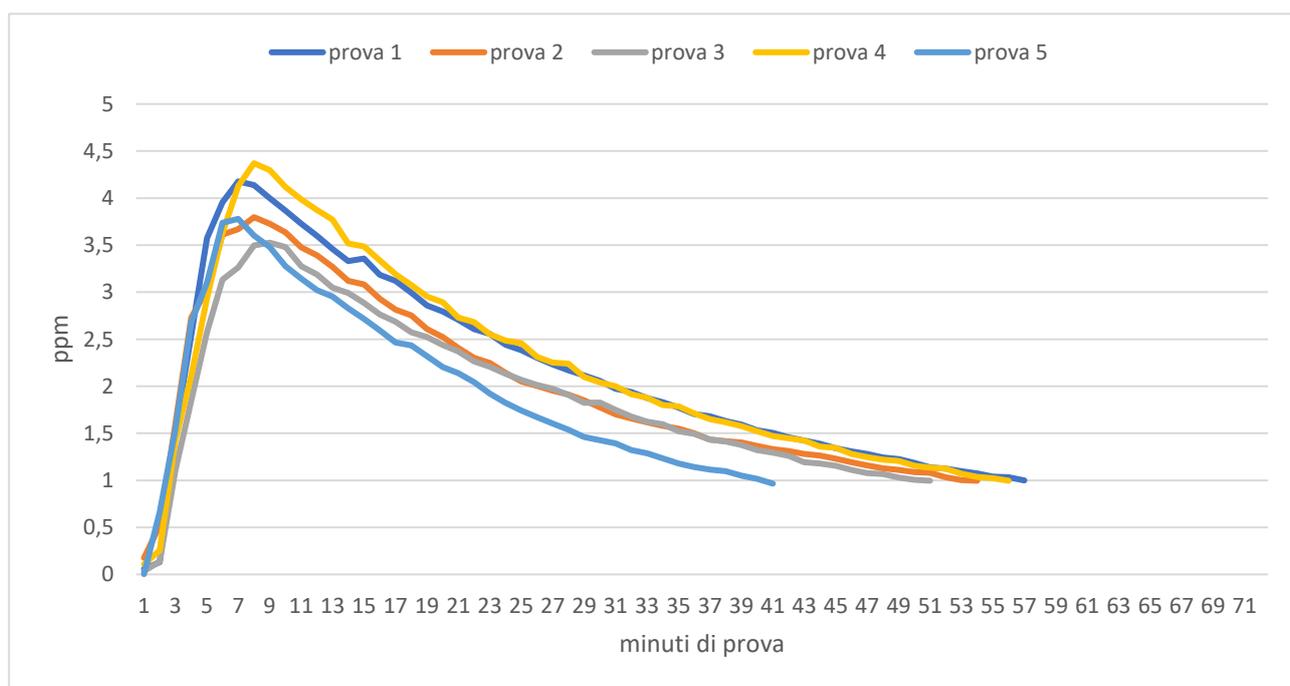


Grafico 1

Dal grafico si nota che il picco dell’inquinante si raggiunge dopo circa 7-9 minuti e che il range in ppm varia tra i 3,5 e 4,5 ppm. Le velocità di decadimento si somigliano, in quanto si raggiunge il valore di 1 ppm entro 52-57 minuti, fatta eccezione per la “prova 5” dove questo valore viene raggiunto in 41 minuti.

Nel Grafico 1.1 si riportano le rette di tendenza del primo tratto che segue il picco, più precisamente sono stati presi i minuti dal 7 al 18.

Nella Tabella 2 si riportano i coefficienti angolari che mostrano la pendenza di questi tratti.

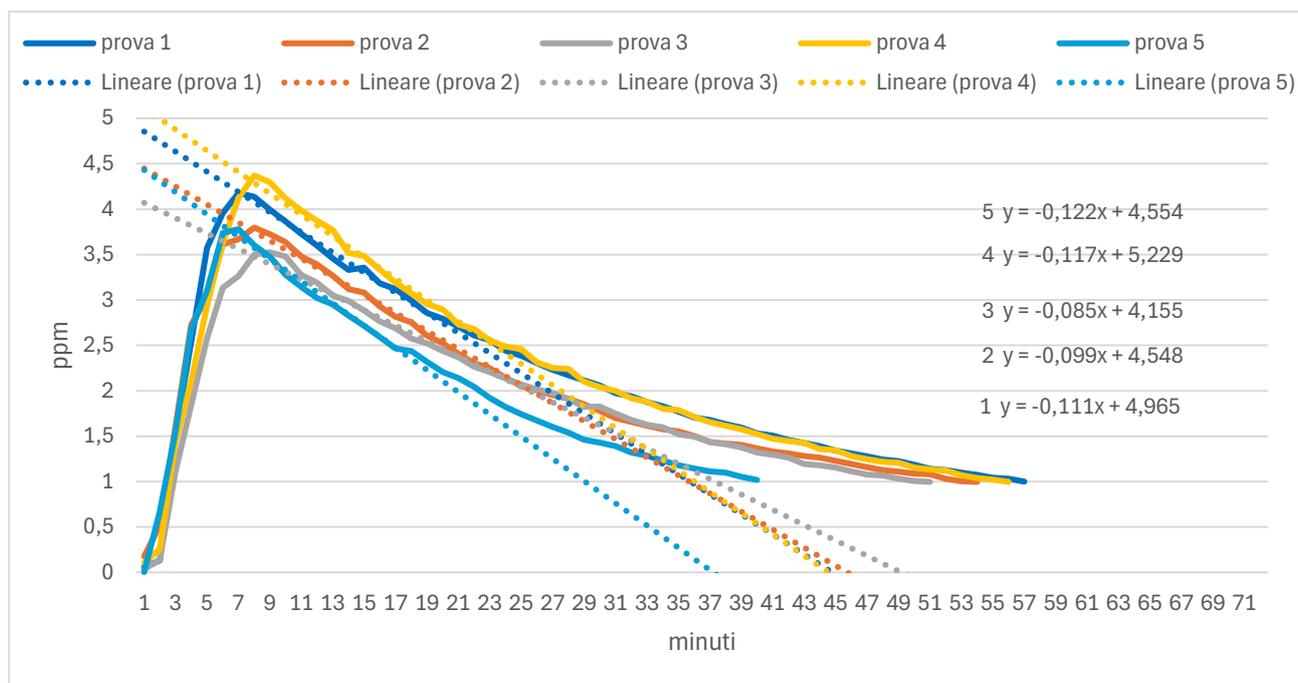


Grafico 1.1

PROVE	COEFFICIENTI ANGOLARI
Prova 1	-0,111
Prova 2	-0,099
Prova 3	-0,085
Prova 4	-0,117
Prova 5	-0,122

Tabella 2

Come si può notare il tratto della “prova 5” risulta più pendente.

Per poter fare il confronto tra pannelli sono state utilizzate delle prove eseguite da dei colleghi che hanno svolto le suddette con i pannelli classici, installati nella test-room. Nei grafici seguenti (Grafico 2, Grafico 3, Grafico 4), quindi, è presente il confronto tra le due tipologie di pannelli utilizzando il MEK come inquinante.

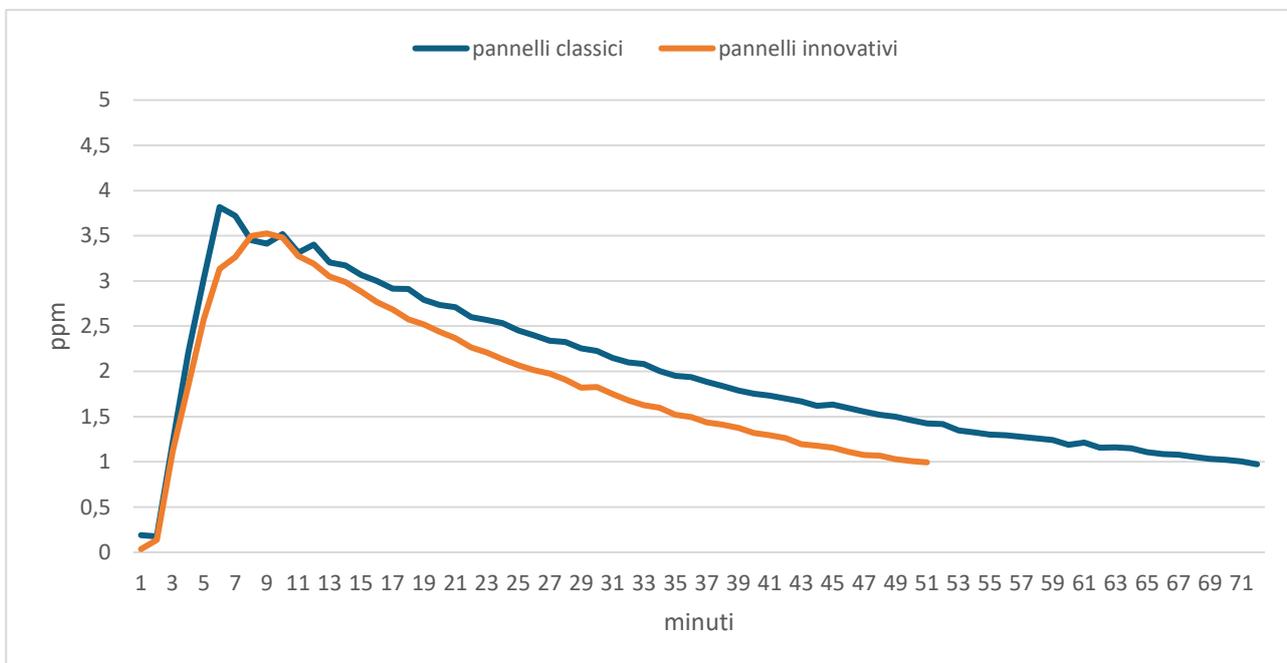


Grafico 2

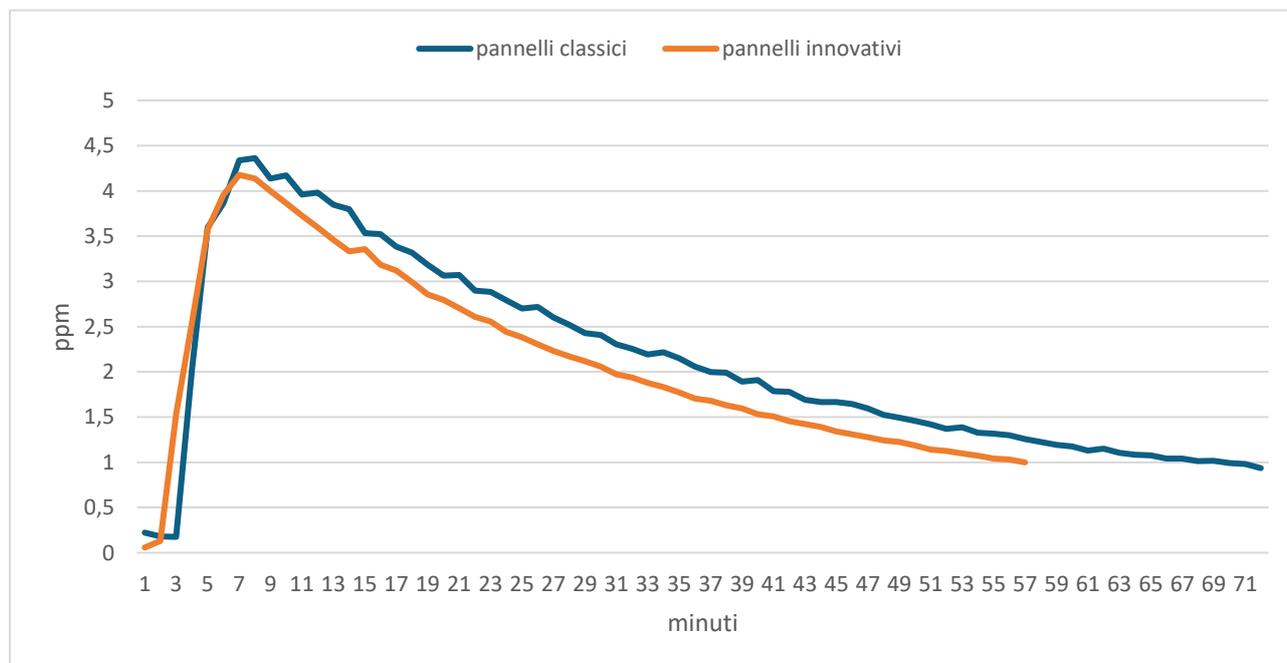


Grafico 3

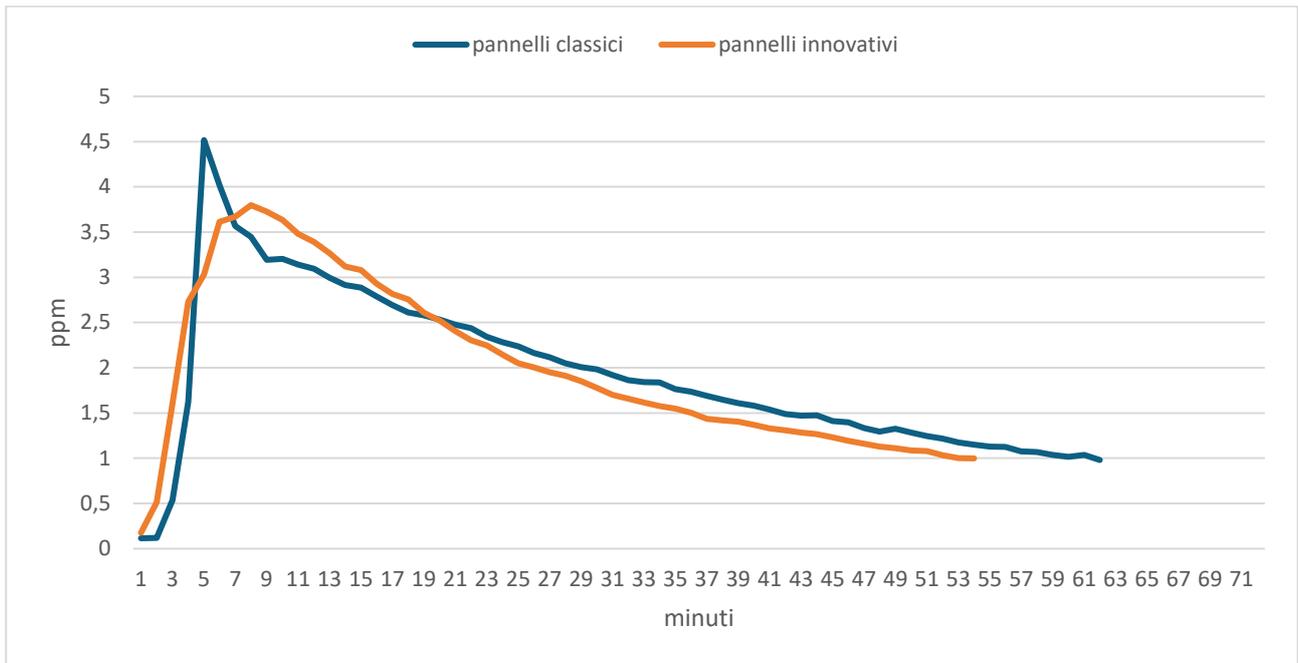


Grafico 4

Si può notare dai grafici, sopra riportati, che le prove con i pannelli innovativi hanno effettivamente delle differenze rispetto a quelle con i pannelli classici.

La prima che si può notare riguarda il picco dei ppm: esso viene raggiunto con un tempo maggiore nei pannelli innovativi rispetto ai pannelli classici.

Di seguito si riportano gli ingrandimenti effettuati sui picchi per andare ad evidenziare proprio questo aspetto (Grafico 2.1, Grafico 3.1, Grafico 4.1).

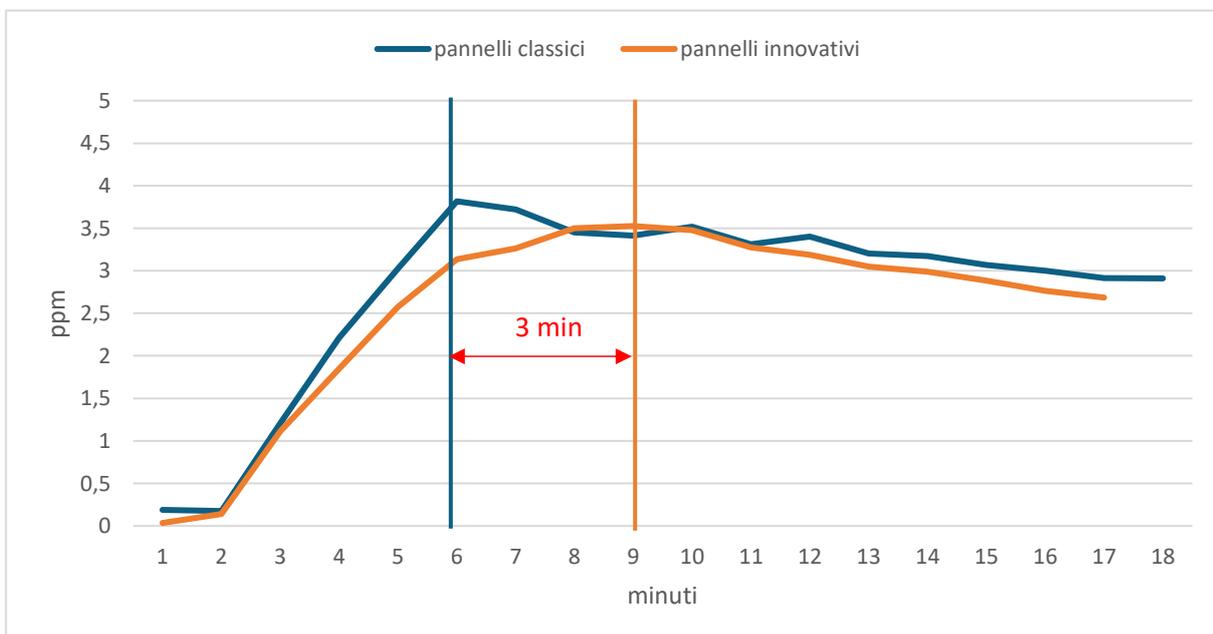


Grafico 2.1

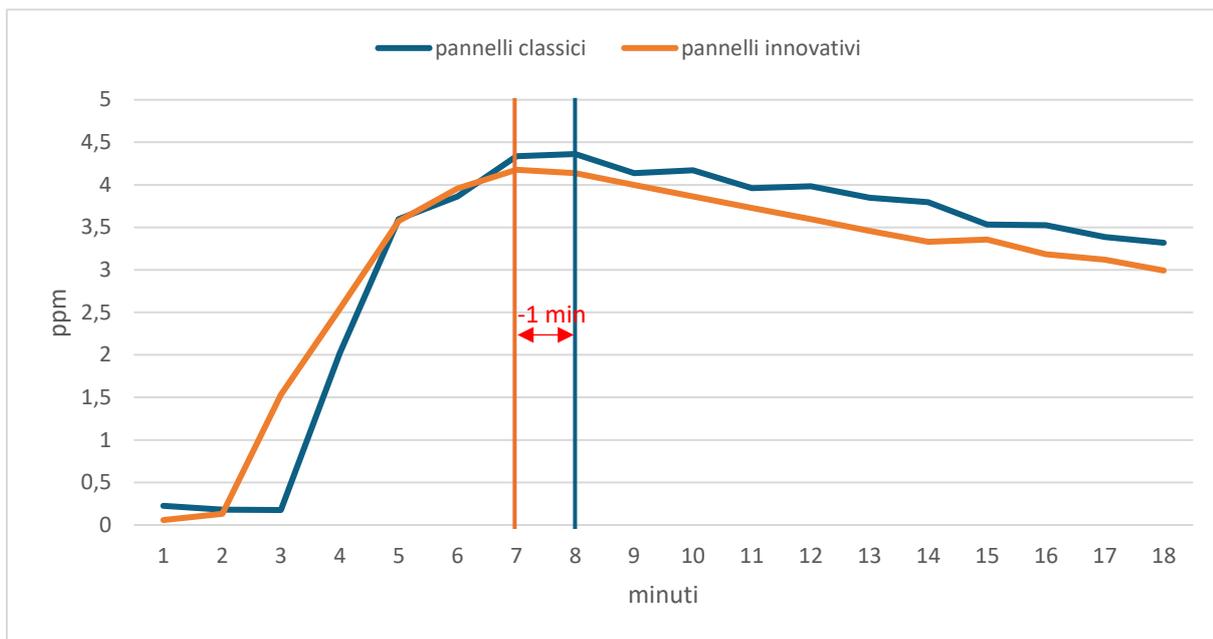


Grafico 3.1

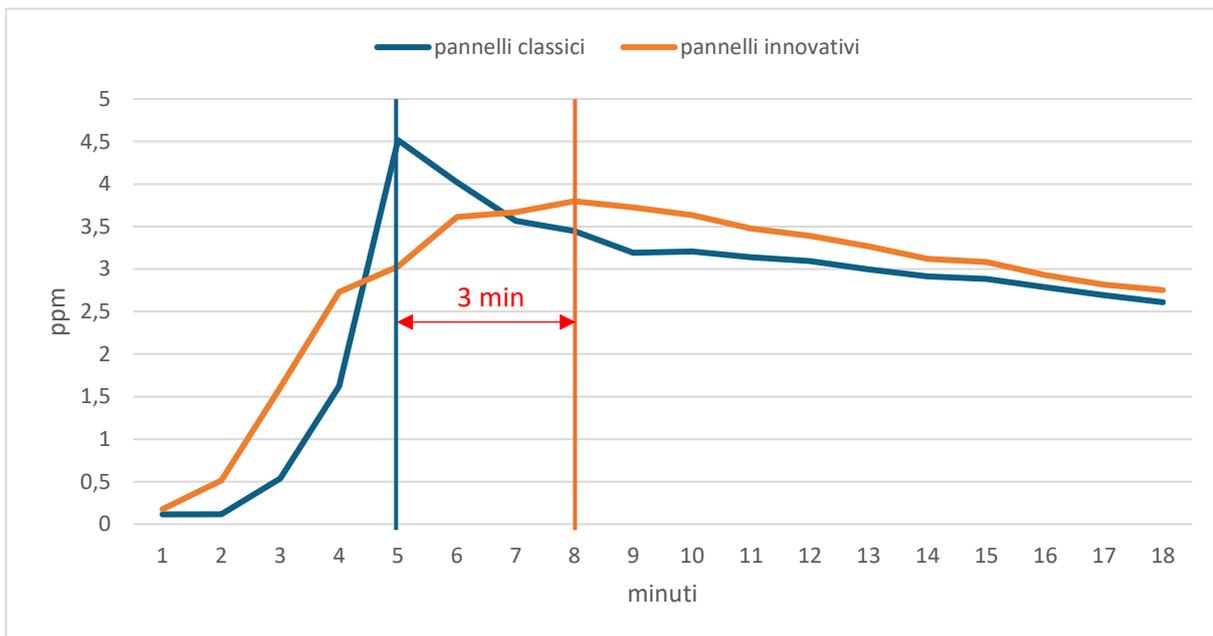


Grafico 4.1

Ad eccezione del Grafico 3.1, dove il picco viene raggiunto un minuto prima dai pannelli innovativi, negli altri casi è raggiunto prima dai pannelli classici.

Inoltre, si può notare che il valore, in ppm, del picco è sempre minore nei pannelli innovativi rispetto ai classici, con differenze anche di circa 1 ppm.

Per quanto riguarda il decadimento dell'inquinante, si è andati ad analizzare le rette di tendenza dei tratti dal settimo al diciottesimo minuto, ovvero il tratto iniziale di discesa della curva.

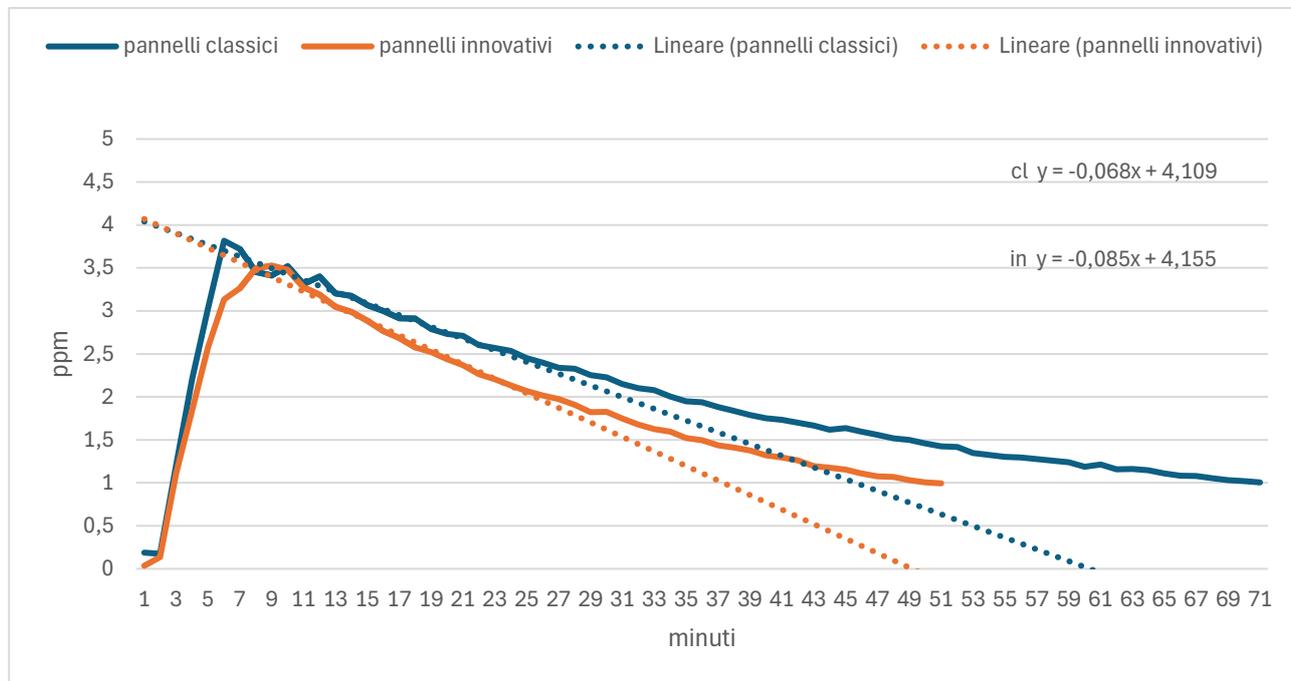


Grafico 2.2

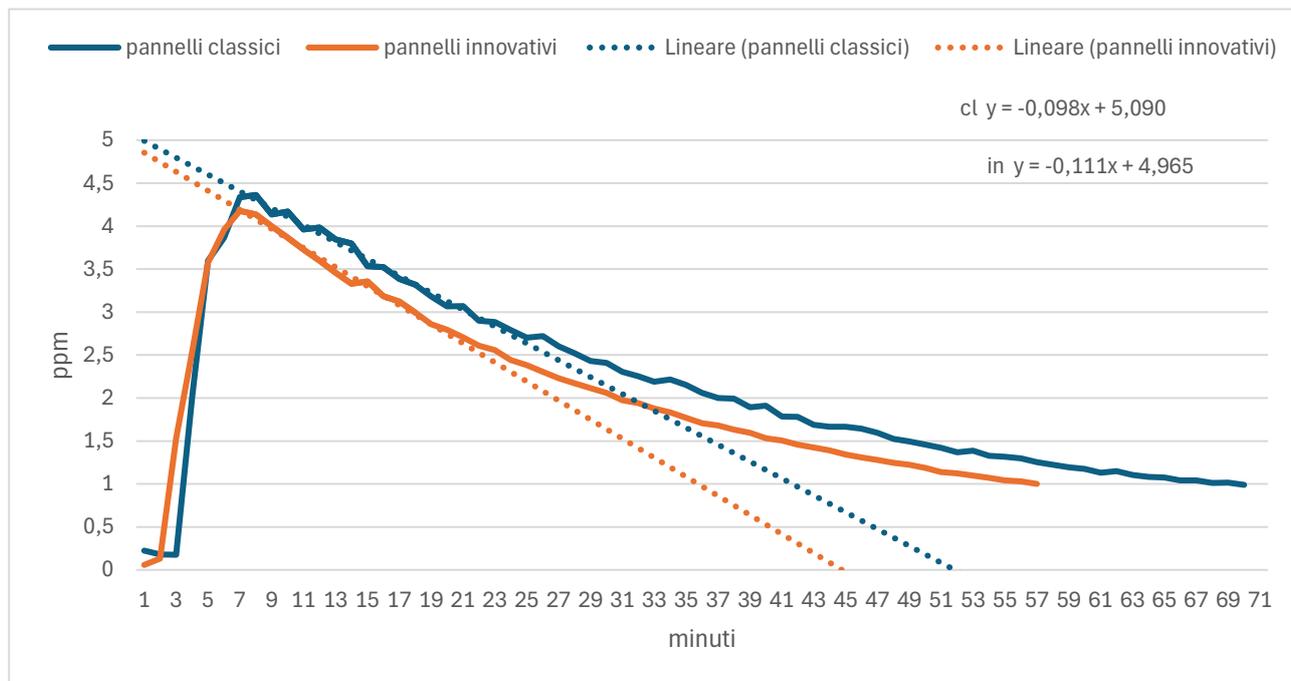


Grafico 3.2

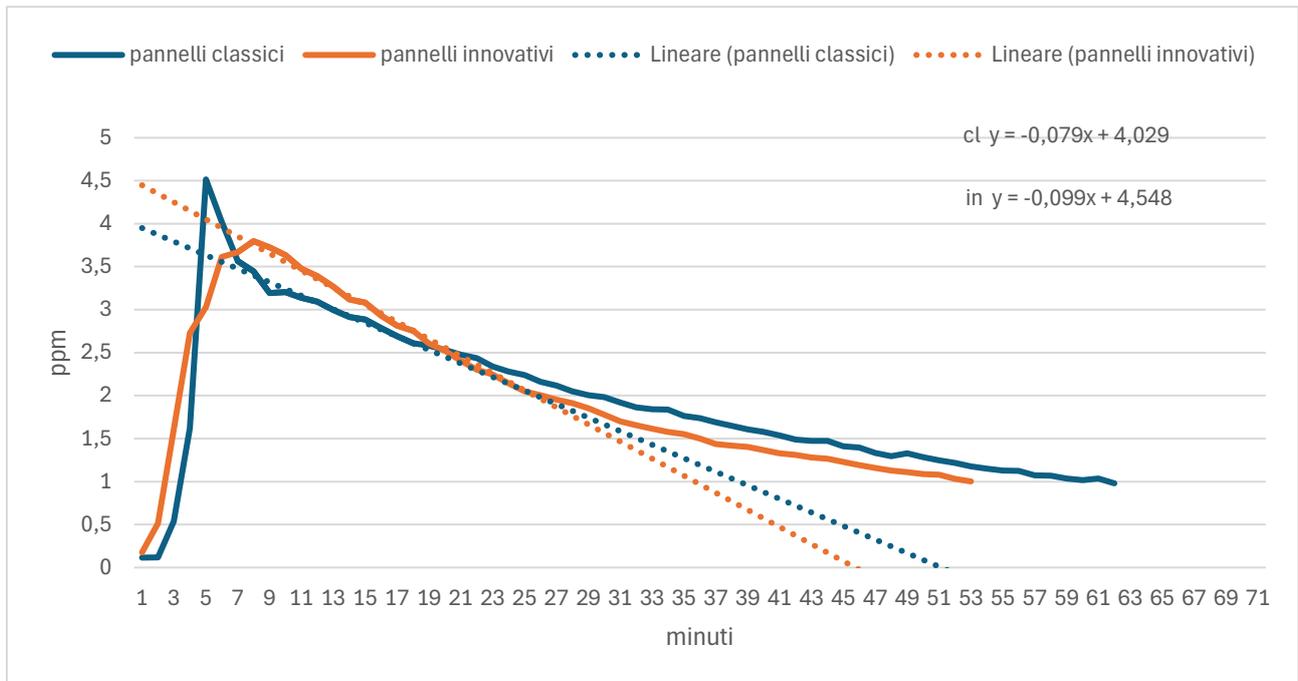


Grafico 4.4

COEFFICIENTI ANGOLARI	
PANNELLI CLASSICI	PANNELLI INNOVATIVI
-0,068	-0,085
-0,098	-0,111
-0,079	-0,099

Tabella 3

La Tabella 3, dei coefficienti angolari, mostra come, nei tratti analizzati, si ha una maggiore pendenza nel caso dei pannelli innovativi. Da questo si deduce che il decadimento è più rapido con i pannelli innovativi rispetto a quelli classici.

7.2 Risultati del confronto tra inquinanti

Le prove sono state eseguite, oltre che con il MEK, anche con un altro composto che fa parte sempre della famiglia dei VOC (Volatile Organic Compounds): il Toluene.

Il seguente grafico (Grafico 6) mostra le prove effettuate con il Toluene. Come nel caso del MEK, sono state eseguite più prove per andarne a verificare la riproducibilità.

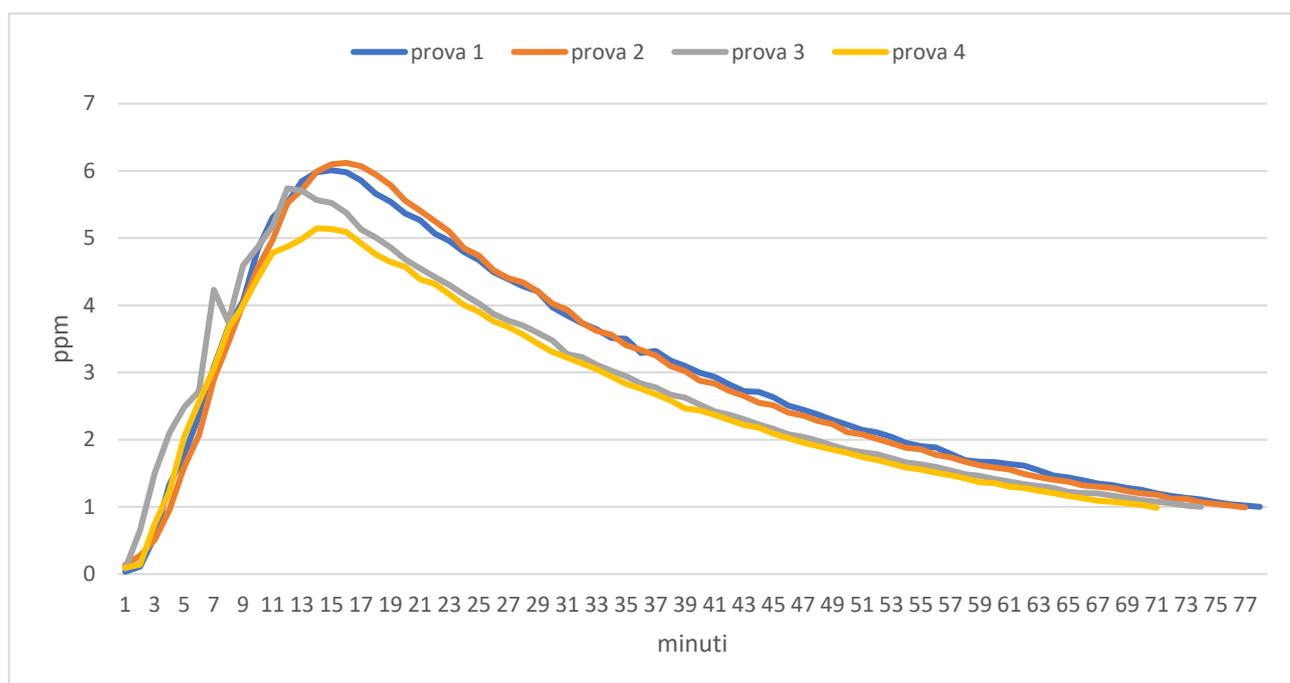


Grafico 5

Il picco dell'inquinante viene raggiunto dopo 13-16 minuti, con un valore che varia da un minimo di 5 ppm a un massimo di 6,1 ppm. Il valore di 1 ppm, preso come riferimento, viene raggiunto tra i 71 e i 77 minuti.

Nel Grafico 5.1 si riportano le rette di tendenza lineari del tratto compreso tra i 16 e i 28 minuti da cui abbiamo, tramite i coefficienti angolari (Tabella 4), le pendenze e quindi le velocità di decadimento. Si nota come la “prova 2” abbiamo una pendenza maggiore delle altre invece la “prova 4” è quella che ha la pendenza minore mentre la “prova 1” e la “prova 3” hanno pendenze pressoché similari.

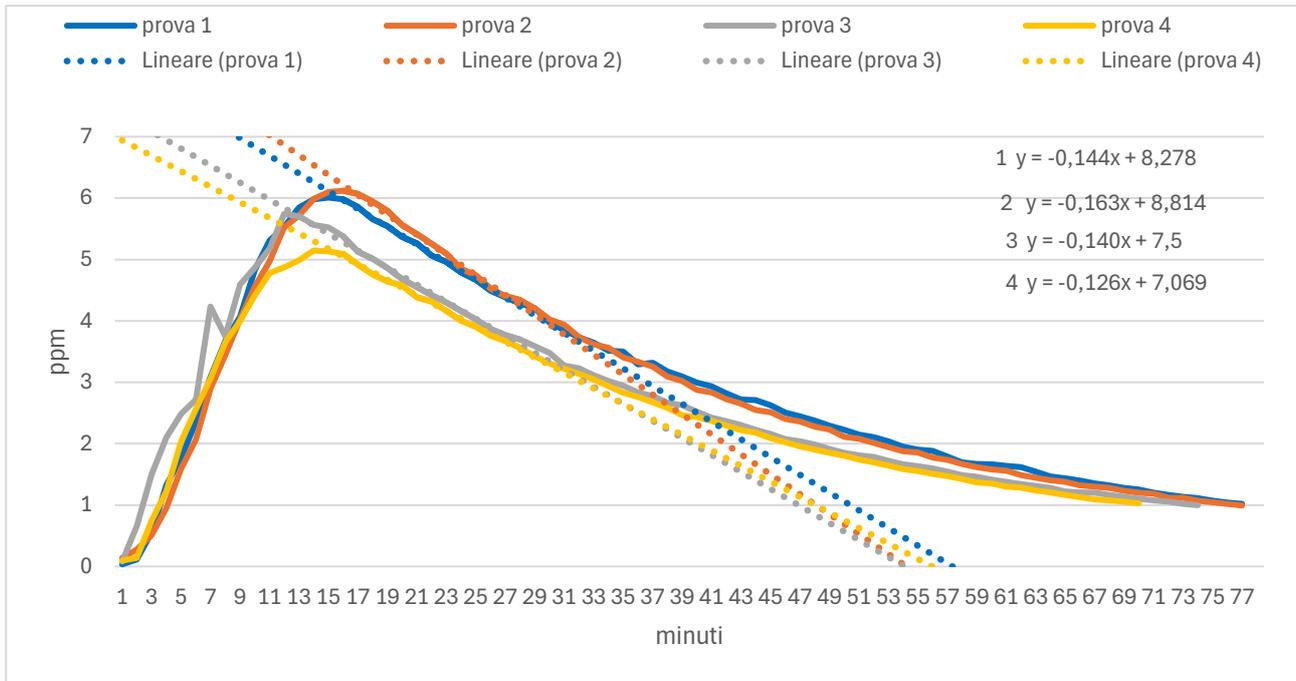


Grafico 5.1

PROVE	COEFFICIENTI ANGOLARI
Prova 1	-0.144
Prova 2	-0,163
Prova 3	-0,140
Prova 4	-0,126

Tabella 4

Per il Toluene non è stato possibile fare il confronto tra i pannelli classici e quelli innovativi, dato che si hanno solo prove dove sono stati utilizzati i pannelli innovativi. È però possibile fare una comparazione, a parità di pannelli, tra le due tipologie di inquinanti per valutare il diverso decadimento e quindi la loro diversa persistenza durante i minuti di prova.

Nel Grafico 6, Grafico 7, Grafico 8, Grafico 9, sono riportate alcune prove con il MEK messe in relazione con le prove con il Toluene.

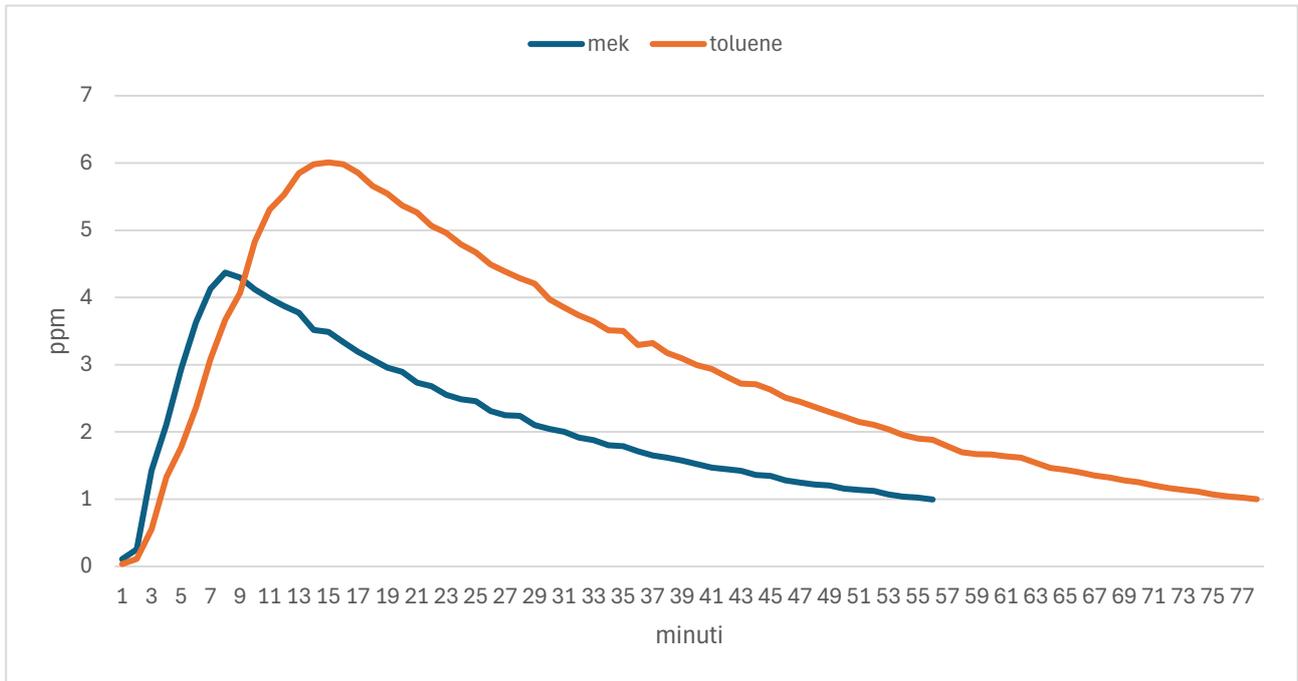


Grafico 6

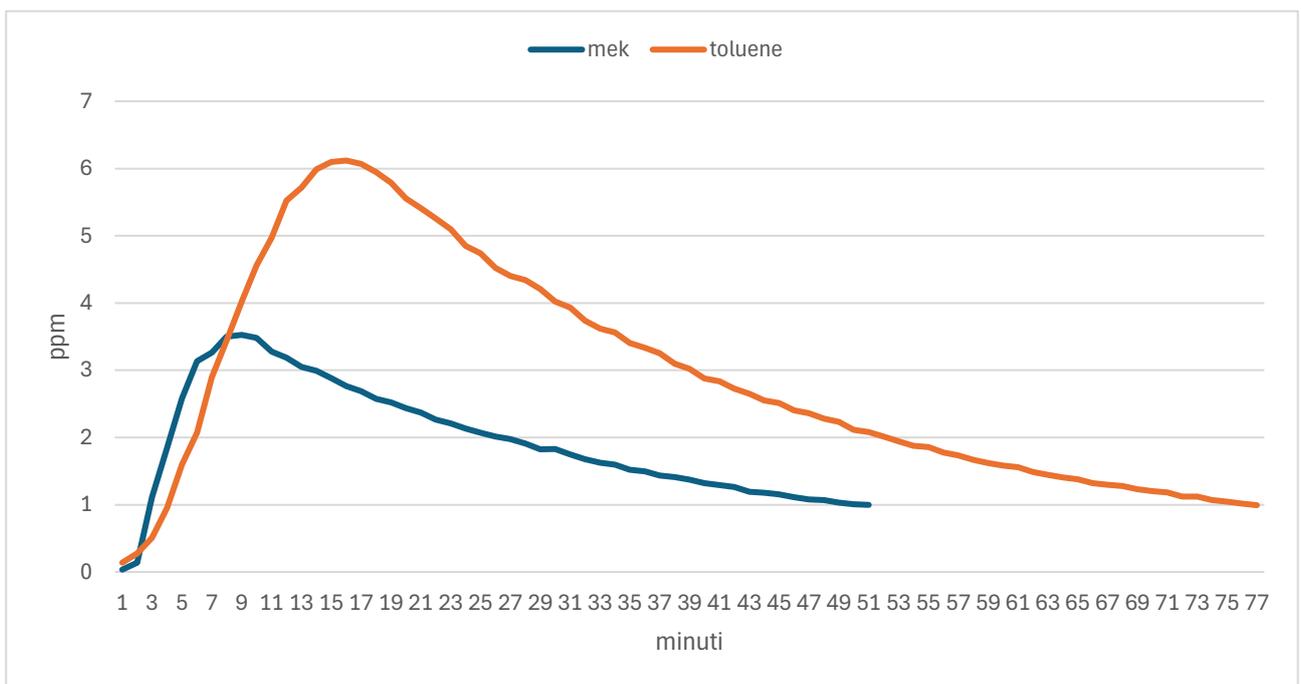


Grafico 7

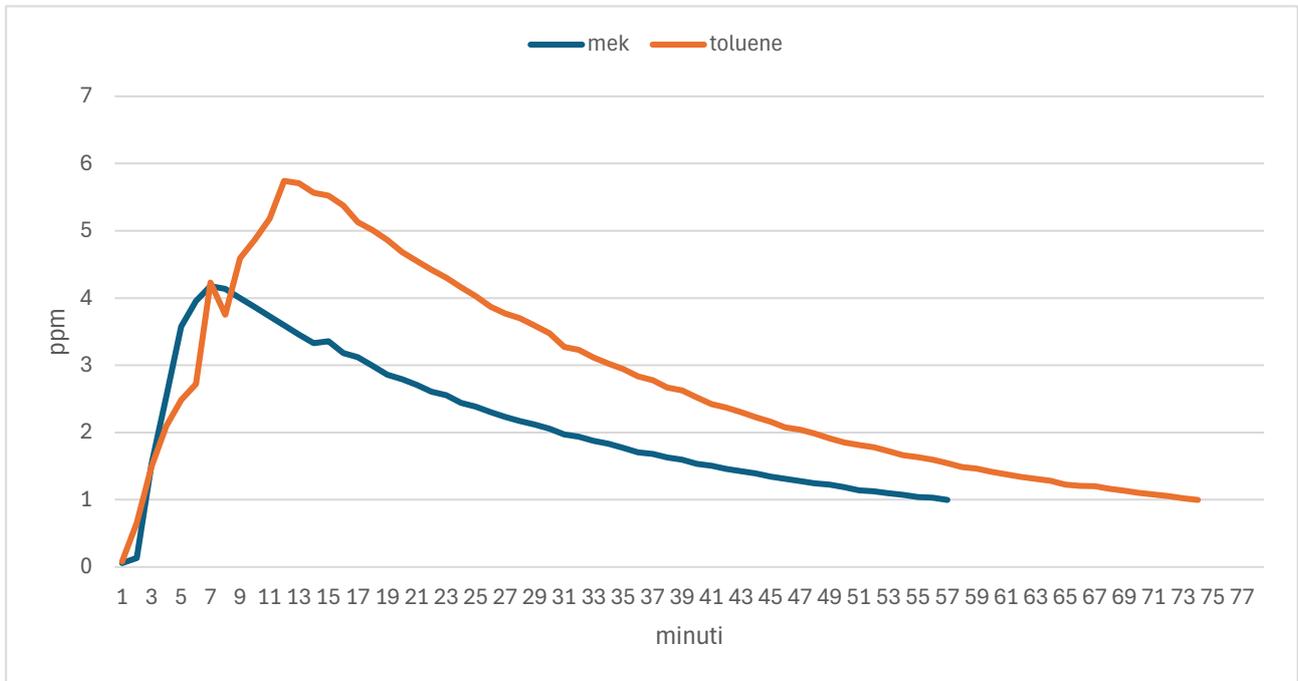


Grafico 8

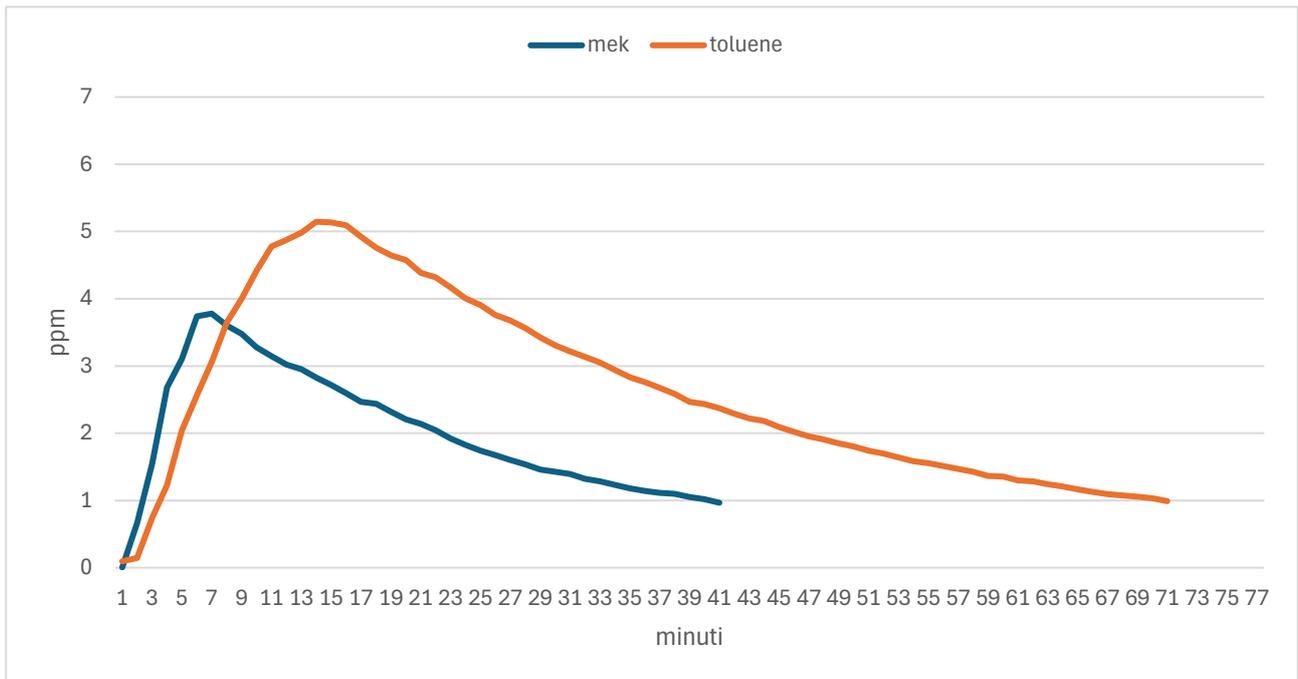


Grafico 9

Dai grafici, qui sopra riportati, si nota come, a parità di quantitativo di inquinante (1 ml), a parità di pannelli (pannelli innovativi) e a parità di condizioni ambientali nella test-room (20°C e 50% di umidità relativa), nelle prove con il Toluene il picco in ppm è maggiore rispetto a quelle con il MEK. Questo fa sì che la persistenza del Toluene sia più lunga; infatti, raggiunge il valore di 1 ppm con una differenza di circa 20 minuti

rispetto al MEK, ma guardando le due curve quella del Toluene risulta avere una maggiore pendenza.

7.3 Risultati delle prove con l'unità di trattamento aria

Un'altra situazione analizzata è quella che riguarda l'utilizzo nelle prove di un'unità di trattamento aria (UTA). La metodica di prova è stata la stessa, con la sola differenza che l'aria all'interno della stanza viene presa, attraverso la tubazione di ripresa, e fatta circolare nel circuito dell'unità di trattamento. Dopo essere passata attraverso un filtro, presente all'interno, l'aria viene rimandata nella stanza, attraverso la tubazione di mandata.

Si sono utilizzati due filtri:

- il primo è il filtro originale presente nell'UTA: un filtro di tela a tasche di dimensioni 40 x 24 x 5,3cm;
- il secondo è sempre il filtro originale a cui è stato applicato, sul davanti, un tessuto ai carboni attivi per simulare un filtro ai carboni attivi.

I primi grafici, che si riportano, illustrano il confronto tra le prove senza l'impiego dell'unità di trattamento aria e quelle dove si è utilizzata.

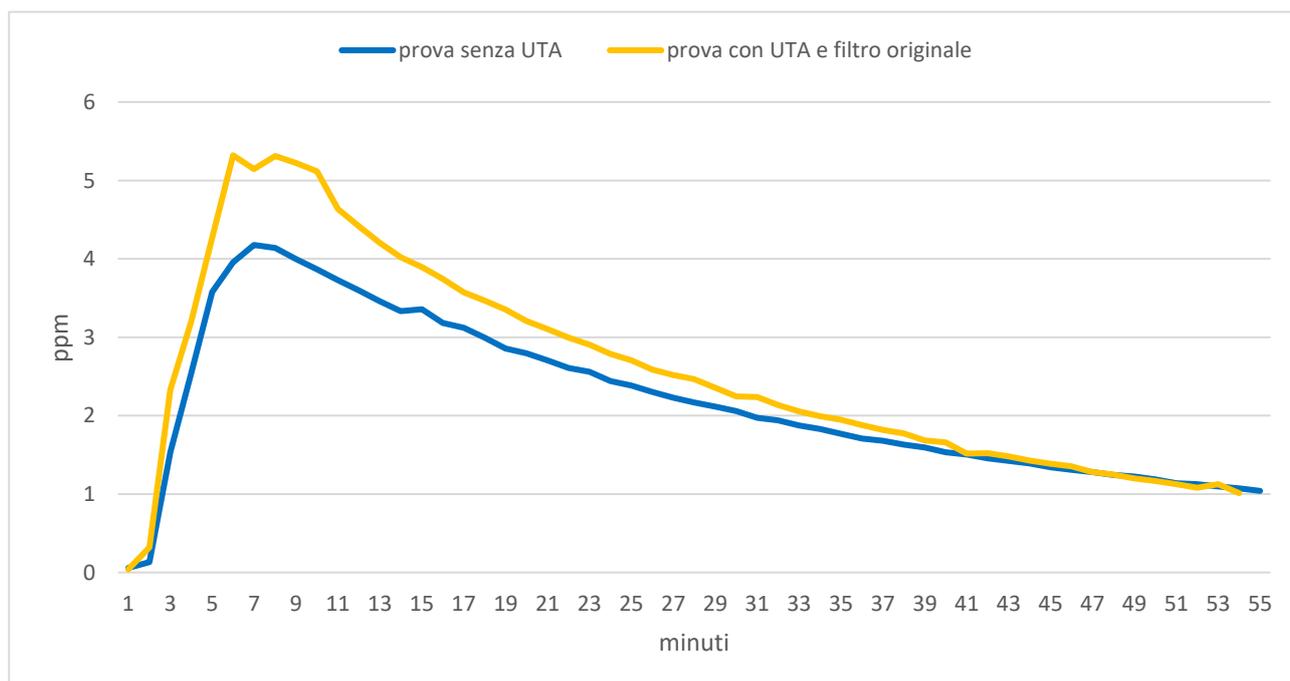


Grafico 10

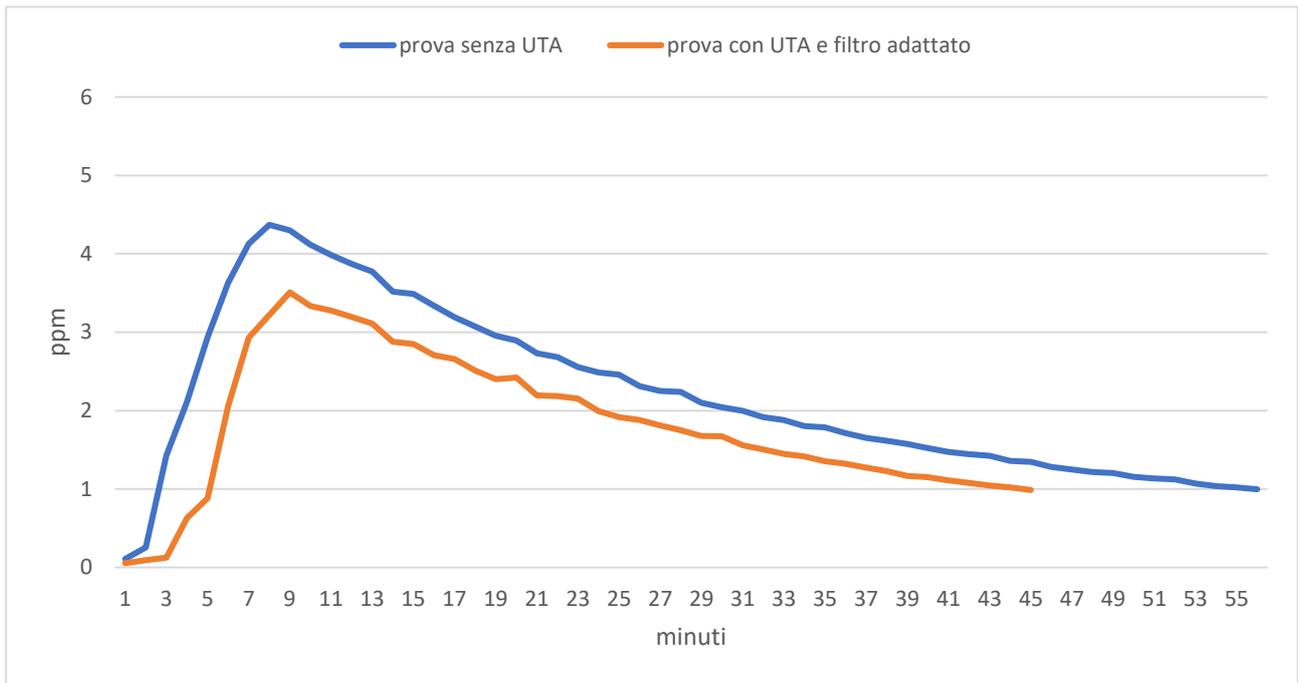


Grafico 11

Nel Grafico 10 e Grafico 11 l'inquinante impiegato è il MEK: nel primo grafico il filtro utilizzato nella prova con l'UTA è quello originale, mentre nel secondo è quello "adattato".

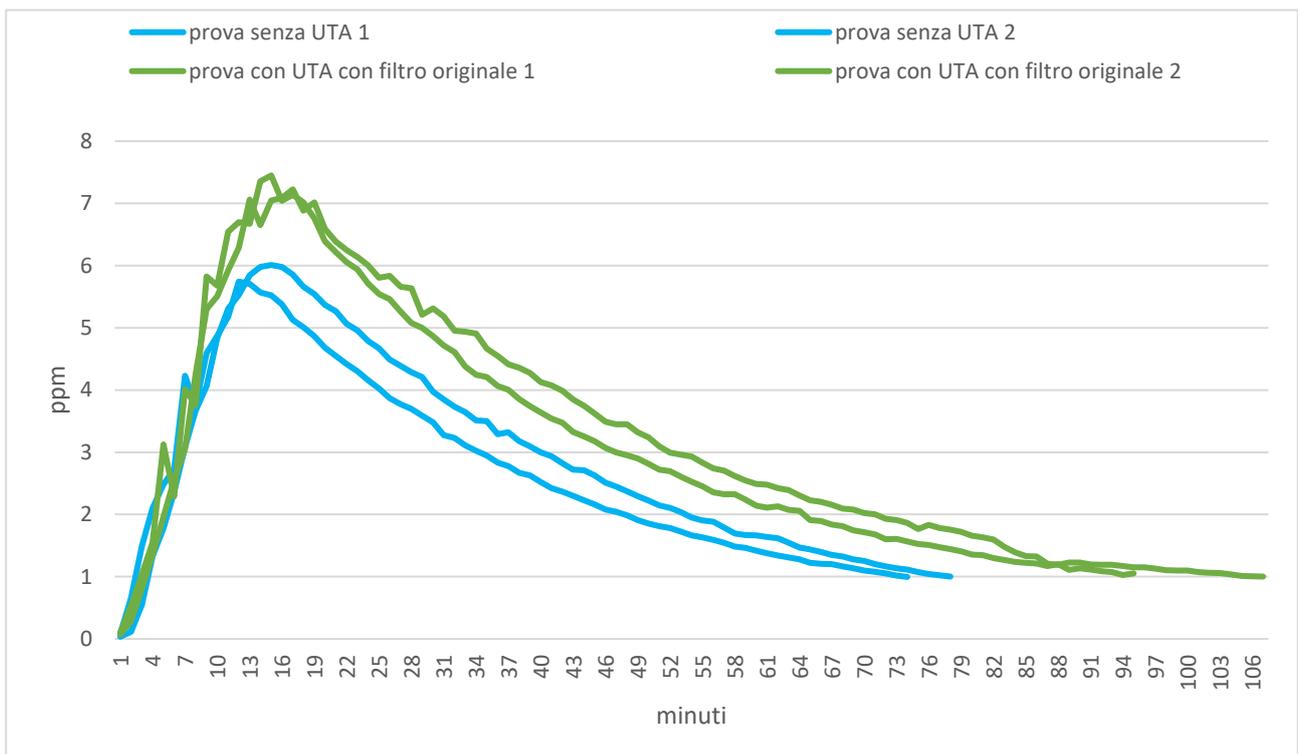


Grafico 12

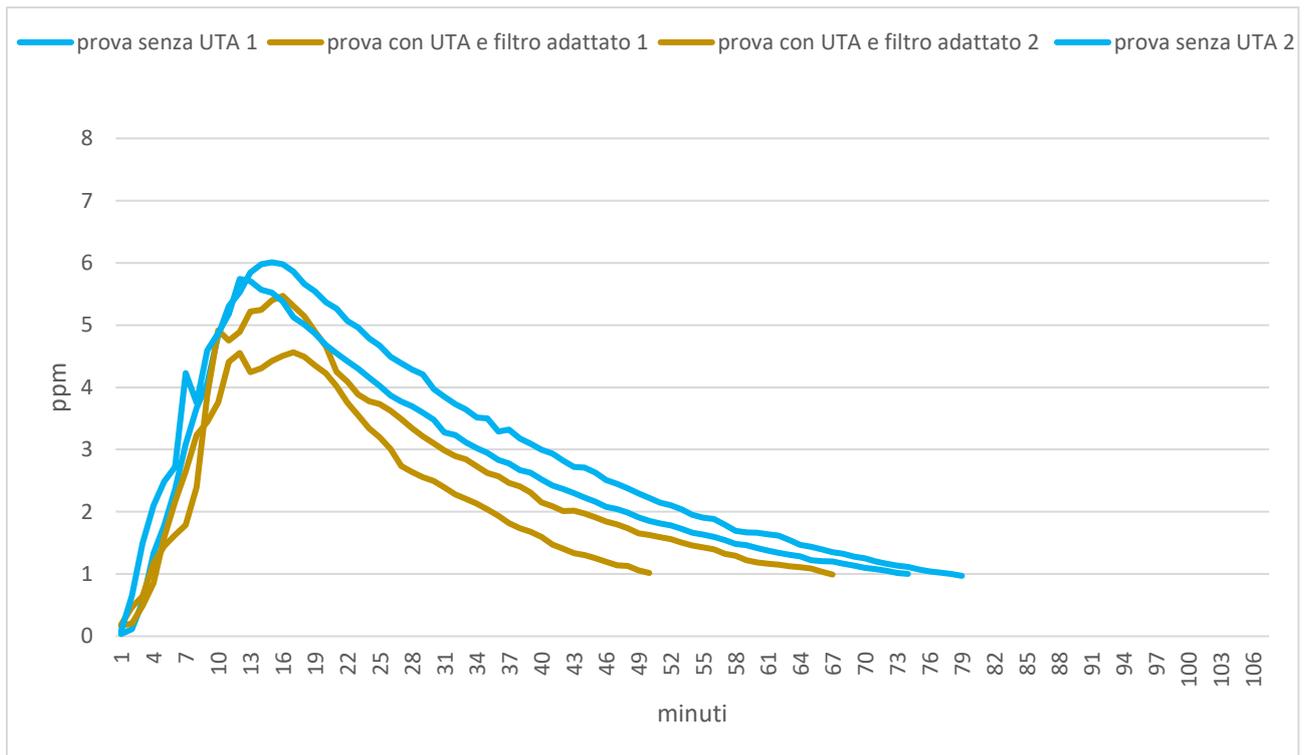


Grafico 13

Nel Grafico 12 e Grafico 13 l'inquinante impiegato, invece, è il Toluene.

Le prove dove è stata utilizzata l'UTA con il filtro originale mostrano picchi di inquinante più alti e un decadimento che risulta essere più lento, soprattutto nel caso del Toluene, rispetto alla situazione in cui non viene usata l'UTA. In teoria, una sezione di filtrazione dovrebbe aiutare ad abbattere gli inquinanti, ma dato che il filtro originale risultava abbastanza datato, il materiale, di cui è costituito, potrebbe essere andato incontro a un deterioramento che non permette più di espletare la sua funzione di filtrazione.

Al contrario, nel caso delle prove dove è stato utilizzato il filtro adattato, i picchi sono più bassi e il decadimento dell'inquinante più rapido rispetto a quelle in cui non è stata impiegata l'UTA.

A seguire si riportano i grafici del confronto tra i due filtri differenti utilizzati nell'UTA. Nel Grafico 14 riportiamo le prove di confronto effettuate con il MEK mentre nel Grafico 15 quelle effettuate con il Toluene.

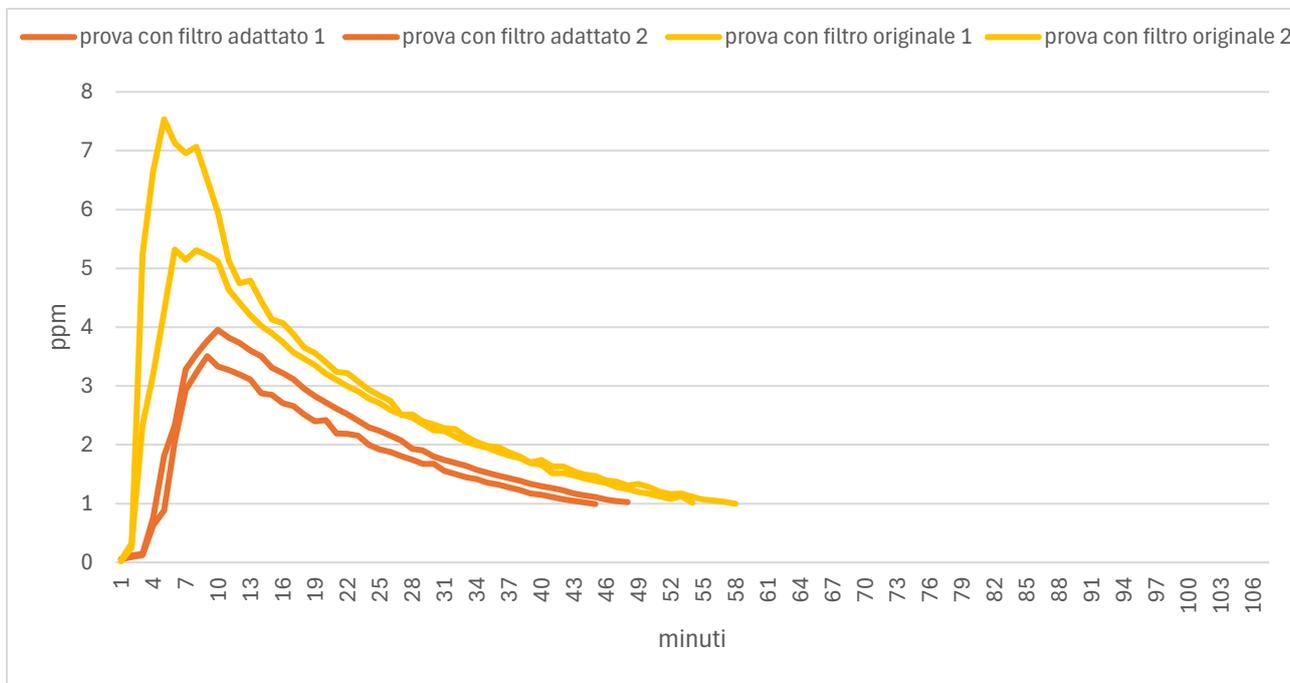


Grafico 14

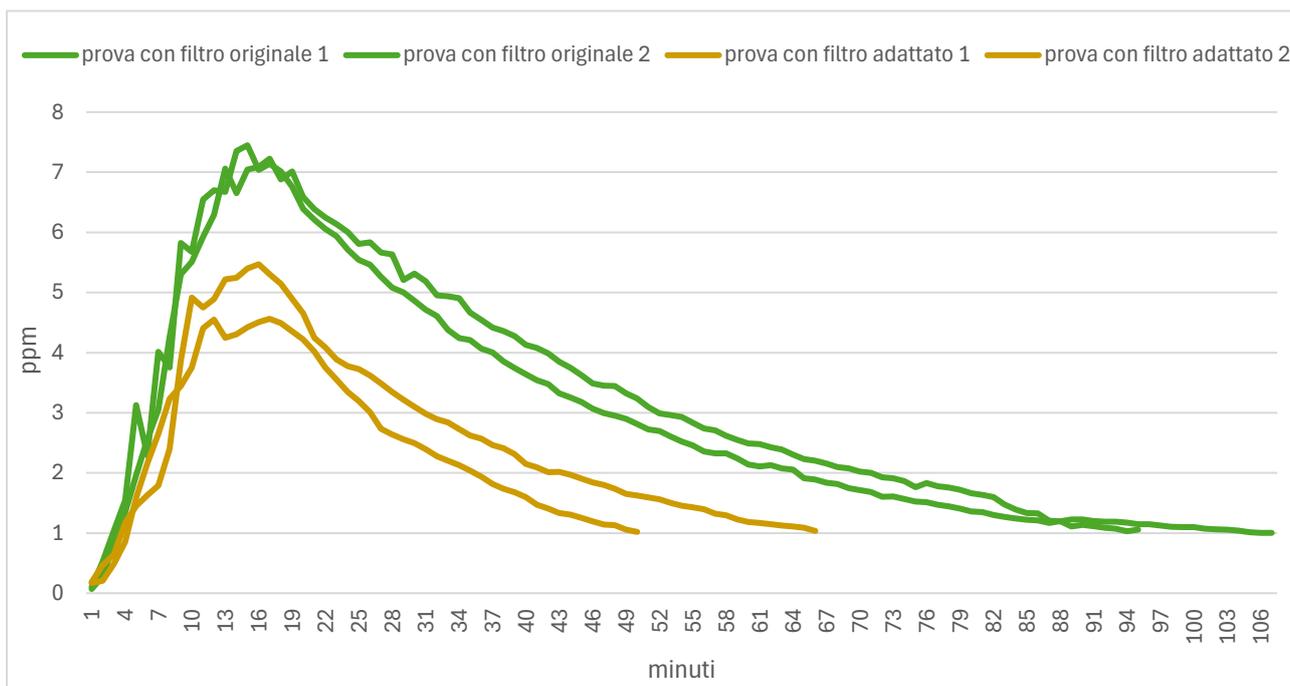


Grafico 15

Da entrambi i grafici si evince che nelle prove dove è stato impiegato il filtro adattato si hanno picchi, in ppm, minori rispetto a quelle dove è stato usato il filtro originale ed il decadimento risulta più rapido. Quindi si può affermare, che nelle situazioni in cui è stato utilizzato il filtro adattato, c'è un'efficienza maggiore nell'abbattimento degli inquinanti utilizzati.

8 CONSIDERAZIONI FINALI

Il miglioramento del comfort per gli occupanti di un ambiente indoor, in termini di qualità dell'aria, è il tema centrale di questo elaborato. L'obiettivo principale era quello di valutare le prestazioni di pannelli di nuova concezione, per i controsoffitti, in termini di adsorbimento dei composti organici volatili, confrontandoli con i classici pannelli in cartongesso.

Dalle prove di confronto, si è riscontrato che i pannelli innovativi hanno una maggior efficienza nell'adsorbimento dei VOC (Volatile Organic Compound): si è visto che il picco di inquinante risultava più basso, quindi più contenuto e che il decadimento risultava più rapido. Questo denota il fatto che questi pannelli, nel momento in cui vengono installati in un ambiente come può essere quello scolastico, andranno ad apportare un miglioramento della qualità dell'aria interna che sicuramente andrà a beneficio della salute degli occupanti, che nel caso di una scuola sono bambini o ragazzi, soggetti più vulnerabili all'esposizione a inquinanti dell'aria interna.

Si è inoltre visto che, combinando i pannelli innovativi con l'accensione di un'unità di trattamento aria, al cui interno è presente una sezione di filtrazione, l'azione di abbattimento dei VOC risulta maggiore.

Tutte queste prove eseguite in laboratorio andranno sicuramente ripetute in un ambiente "reale" dove le variabili da tener conto sono maggiori di un ambiente controllato.

Si ritiene comunque di dire che, la continua ricerca di soluzioni che apportino un miglioramento del comfort per gli occupanti e la corretta progettazione di un ambiente indoor sono fondamentali per garantire una maggiore qualità della vita dell'essere umano e uno sviluppo sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] World Health Organization, WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010.
- [2] ISPRA, INQUINAMENTO INDOOR: aspetti generali e casi studio in Italia. Rapporti 117/2010, ISPRA, 2010.
- [3] M. M. ,. T. S. M. M. C. M. M. M. Sarath Raju, «Indoor Air Pollution and Respiratory Health,» *Clin Chest Med*, vol. 4, n. 41, pp. 825-843, 2020.
- [4] A. C. e. T. Martellini, «Indoor Air Quality and Health,» *Int J Environ Res Public Health*, vol. 14, n. 1286, 2017.
- [5] D. P. Y.-C. L. Vinh Van Tran, «Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality,» *Intern. J. Environ. Res. Public Health*, 2020.
- [6] C. N. M. J. C. B. G. C. e. a. Ramen Munir Baloch, «Indoor air pollution, physical and comfort parameters related to schoolchildren's health: Data from the European SINPHONIE study,» *Science of the Total Environment*, vol. 739, 2020.
- [7] S. Filippo, «SVILUPPO DI UN SISTEMA SMART DI CONTROSOFFITTO PER COMFORT MULTIDOMINIO:OTTIMIZZAZIONE DELL'INDOOR AIR QUALITY».
- [8] R. J. E. D. a. S. H. Tobias Walser, «Indoor Exposure to Toluene from Printed Matter Matters: Complementary Views from Life Cycle Assessment and Risk Assessment,» *Environmental Science & Technology*, vol. 1, n. 48, p. 689–697, 2014.

[9] M. S. G. V. I. A.-M. Marion Hulin, «Respiratory health and indoor air pollutants based on quantitative exposure assessments,» *European Respiratory Journal* , vol. 40, n. 4, pp. 1033-1045, 2012.