

Buone pratiche per la tutela della qualità dell'aria indoor

L'ESPERIENZA DEL TRENO VERDE 2017



AUTORI: Marco Torre*, Angelo Cecinato*, Andrea Minutolo**, Luigi Schibuola***, Massimiliano Scarpa***, Chiara Tambani***, Luca Gugliermetti****, Fabio Nardecchia****, Davide Astiaso Garcia****

COORDINATORE: Lucia Paciucci*

* Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto sull'Inquinamento Atmosferico

** Legambiente Onlus

*** Università luav di Venezia - Unità di ricerca Energia e Città

**** Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE)

EDITO DA CNR-IIA - ISBN: 978-88-6224-014-7



I
-
U
-
A
-
V



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
2	LE CAUSE DELL'INQUINAMENTO INDOOR	4
2.1	CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEGLI EDIFICI (MATERIALI, TECNICHE, USURA, MANUTENZIONE)	5
2.2	IMPIANTI	6
2.2.1	VENTILAZIONE NATURALE: CARATTERISTICHE PRINCIPALI	6
2.2.2	VENTILAZIONE MECCANICA: CARATTERISTICHE PRINCIPALI E DIMENSIONAMENTO	6
2.2.3	RICAMBI E RICIRCOLO DELL'ARIA	7
2.2.3.1	Ricircolo su filtri	8
2.2.4	MANUTENZIONE	10
2.3	PRESENZA E ABITUDINI DEGLI OCCUPANTI	11
3	GLI EFFETTI DELL'INQUINAMENTO INDOOR	12
3.1	EFFETTI TOSSICI	12
3.2	BENESSERE TERMOIGROMETRICO	13
3.3	QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR	21
4	ESPERIENZA DEL TRENOVERDE E CITIZEN SCIENCE	22
4.1	PARAMETRI MONITORATI	23
4.1.1	PARAMETRI CHIMICI	24
4.1.2	PARAMETRI FISICI	25
4.2	METODOLOGIA DI CAMPIONAMENTO E ANALISI	26
4.2.1	PARAMETRI CHIMICI	26
4.2.2	PARAMETRI FISICI	26
4.3	RISULTATI E DISCUSSIONE	28
4.3.1	PARAMETRI CHIMICI	28
4.3.1.1	Idrocarburi volatili	28
4.3.1.2	Polveri superficiali	29
4.3.1.3	Le rilevazioni di HOPES	34
4.3.2	PARAMETRI FISICI	39
4.3.2.1	Misure a Potenza	39
4.3.2.2	Misure a Salerno	40
4.3.2.3	Misure a Foligno	41
4.3.2.4	Misure a Vicenza	42
4.3.2.5	Misure a Milano	43
4.3.2.6	Misure a Treviso	44
4.3.2.7	Misure indoor del particolato nelle scuole	47
5	SIMULAZIONI QUALE STRUMENTO PER LA PROGETTAZIONE CONSAPEVOLE	49

6	PROGETTI REALI	52
7	LINEE GUIDA	58
8	GLOSSARIO	60
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITI UTILI	67

1 Introduzione

La qualità dell'aria ed in particolare la qualità dell'aria all'interno degli edifici, nell'ambito dei temi relativi a salute e benessere della popolazione, assume oggi, importanza sempre più rilevante. I principali problemi legati alla qualità dell'aria Indoor - **IAQ (Indoor Air Quality)** - sono strettamente correlati alla concentrazione e definizione dei principali composti inquinanti presenti negli ambienti confinati. L'irrinunciabile tema del risparmio energetico ha prodotto precauzioni che hanno condotto, oltre a un maggior isolamento degli edifici ed a una diminuzione dei tassi di ventilazione, anche all'utilizzo di nuovi materiali e di nuove apparecchiature, cioè a misure che aumentano le concentrazioni di agenti inquinanti che si formano nei locali.

Nel corso degli ultimi decenni si è difatti assistito a un progressivo deterioramento della qualità dell'aria negli ambienti confinati. Numerosi studi scientifici hanno dimostrato la presenza, nell'aria degli ambienti di vita, di agenti inquinanti a bassa concentrazione di difficile misurazione che possono determinare effetti sulla salute non ancora completamente noti.

Gli inquinanti indoor, che possono agire singolarmente o combinati con altri fattori, determinano una diminuzione del comfort ambientale e un rischio per la salute; sono agenti di tipo chimico (composti organici e inorganici), fisico (radiazioni ionizzanti e non ionizzanti) e biologico (microrganismi, muffe, acari). Considerato che gran parte della popolazione trascorre il proprio tempo in ambienti confinati, **l'esposizione all'inquinamento indoor è dominante rispetto a quella outdoor.**

Vengono considerati come sintomi specifici, non gravi, che possono impattare sulla salute e quindi, sui costi sociali del paese: malattie respiratorie trasmissibili, allergie e asma, sintomi della sindrome dell'edificio malato (**SBS**, dall'inglese Sick Building Syndrome).

2 Le cause dell'Inquinamento Indoor

I parametri che entrano in gioco sono essenzialmente riconducibili ai seguenti ambiti:

- caratteristiche costruttive degli edifici, dalla scelta dei materiali alle tecniche di posa nonché dal grado di usura e dal livello di manutenzione degli edifici stessi;
- caratteristiche e tipologia degli impianti di trattamento dell'aria;
- presenza e abitudini degli occupanti gli ambienti indoor: emissioni dirette di CO₂, cottura di cibi, utilizzo di particolari prodotti per la pulizia della casa, agenti patogeni ed eventuali altri fattori biologici legati alla presenza umana.

Le principali fonti interne sono determinate dall'uomo e dalle sue attività, dai materiali da costruzione, dagli arredi e dai sistemi di trattamento dell'aria; fra questi una delle fonti più importanti può essere sicuramente

il fumo di tabacco, oltre ai processi di combustione di combustibili fossili. Altre possibili fonti interne di inquinamento sono i prodotti per la pulizia e la manutenzione della casa, i prodotti antiparassitari, l'uso di colle, adesivi, solventi, oltre all'utilizzo di strumenti di lavoro quali stampanti, plotter, fotocopiatrici.

Gli occupanti degli ambienti sopportano direttamente le conseguenze negative dell'inquinamento in termini di benessere e qualità della vita ed allo stesso tempo, con i loro comportamenti possono essere responsabili dell'inquinamento stesso.

2.1 Caratteristiche costruttive degli edifici (materiali, tecniche, usura, manutenzione)

I prodotti edilizi possono peggiorare le condizioni abitative secondo tre modalità:

- rilasciando direttamente sostanze inquinanti o pericolose (composti organici volatili, radon, polveri, fibre);
- adsorbendo e successivamente rilasciando sostanze presenti nell'aria e provenienti da altre fonti (per esempio da attività umana o dai materiali stessi);
- favorendo l'accumulo di sporco e la crescita di microrganismi.

I materiali e i prodotti utilizzati in edilizia possono emettere composti altamente tossici, composti che possono causare sintomi generali, composti irritanti, composti che causano una inaccettabile qualità dell'aria (odori sgradevoli) e composti con sconosciute proprietà tossiche.

La grande diffusione, avvenuta in modo incontrollato negli ultimi cinquanta anni dell'industria chimica nel settore edilizio, ha portato a un uso generalizzato di materiali sintetici per gli arredi, le tappezzerie, le pavimentazioni e i componenti degli edifici. Tali materiali emettono nell'aria degli edifici sostanze chimiche che possono avere effetti rilevanti sulla salute delle persone o sul livello di comfort. L'emissione di Composti Organici Volatili (VOC) è più alta all'inizio della vita del prodotto e tende a diminuire notevolmente in tempi abbastanza brevi (da una settimana per i prodotti umidi, come vernici e adesivi, a sei mesi per altri composti chimici). Fa eccezione la formaldeide, che tende a presentare rilasci relativamente costanti per molti anni. La concentrazione è funzione del rapporto tra superficie emittente e volume dell'ambiente e dei ricambi orari; la pericolosità è in funzione del/dei tipi di sostanza, delle sinergie con altre sostanze presenti nell'ambiente, della concentrazione e del tempo di esposizione. La crescita di colonie di microrganismi dipende dal tipo di prodotto (naturale o sintetico) dalla percentuale di umidità contenuta, dalla qualità della superficie (porosità), dalle condizioni d'uso (attività svolte, presenza di altri prodotti), dalle condizioni microclimatiche. I prodotti di origine naturale non trattati in superficie, come per esempio il legno massello o le fibre tessili vegetali o animali tendono a predisporre un ottimo habitat per la crescita di colonie di microrganismi.

2.2 Impianti

La qualità dell'aria di un ambiente può essere controllata intervenendo sia sulle sorgenti inquinanti che sulla **ventilazione**. Un'appropriata ventilazione, meccanica o naturale, consente infatti, miscelando l'aria interna ad un ambiente e realizzandone così un'indispensabile redistribuzione, di rimuovere e/o diluire i contaminanti generati e di ottenerne la qualità desiderata. Per ogni ambiente occorre determinare la massima concentrazione ammissibile per i diversi contaminanti e prevedere, in base alle attività che vi svolgono, tassi di ventilazione adeguati, commisurati alla quantità di sostanze emesse nell'unità di tempo ed alla loro tossicità, che consentano di mantenerne livelli accettabili di qualità dell'aria.

2.2.1 Ventilazione NATURALE: Caratteristiche principali¹

La ventilazione naturale viene realizzata mediante la realizzazione di opportune aperture sull'involucro edilizio. Quando nell'involucro di un edificio si collocano delle aperture, il differenziale di pressione tra le varie facciate (o tra zone diverse della stessa facciata) generato dal vento e/o dalla differenza di temperatura (e quindi di densità tra esterno e interno) origina un flusso d'aria interno, che può essere usato per la ventilazione. Dal punto di vista normativo la ventilazione dei locali ottenuta tramite l'apertura delle finestre è anche detta: **aerazione (UNI EN 12792:2005)**. L'efficacia maggiore si ottiene se le finestre sono collocate su pareti opposte. In questo caso però non è possibile controllare in maniera puntuale la portata e la qualità dell'aria (eventuali inquinanti presenti) proveniente dall'esterno. Ulteriori problematiche possono essere la rumorosità esterna e le correnti d'aria fredde. Solitamente viene immessa aria calda in estate e aria fredda in inverno, con conseguenti notevoli perdite di energia.

2.2.2 Ventilazione MECCANICA: Caratteristiche principali e dimensionamento

Tralasciando le diverse tipologie costruttive per gli impianti di condizionamento (a sola aria, a sola acqua, misti ad aria/acqua) e concentrando l'attenzione sulla sola tipologia degli impianti ad aria è possibile fare comunque una serie di considerazioni valide per tutti gli impianti. In particolare, negli impianti di climatizzazione "a sola aria", una determinata portata di aria viene immessa nei locali e ne viene estratta dopo che si è portata alle condizioni di comfort. Le esigenze di ventilazione vengono soddisfatte se tutta o una parte dell'aria è presa dall'esterno. In particolare, quindi, gli impianti di ventilazione meccanica sono impianti che consentono di gestire il ricambio dell'aria di un ambiente con l'esterno tramite condotte di ventilazione forzata, collegate con gli ambienti interni. Nella dizione comune tali impianti vengono anche

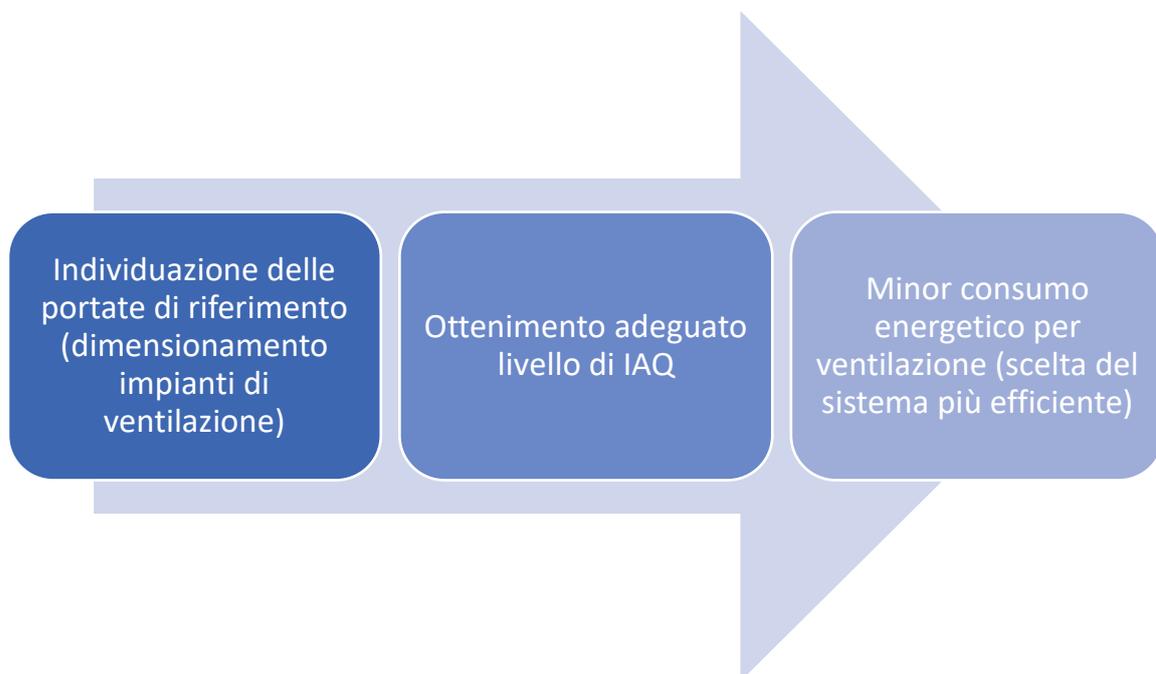
¹ materiale disponibile: *Corso di Energetica degli Edifici, Ventilazione*: Prof. Marco Dell'Isola, Ing. Fernanda Carmen Fuoco

definiti di **ventilazione meccanica controllata (VMC)**. La ventilazione meccanica può essere un sistema completamente indipendente oppure può essere integrata direttamente nell'impianto di condizionamento.

2.2.3 Ricambi e ricircolo dell'aria

Gli ambienti chiusi normalmente abitati da persone (*ambienti indoor*), non sono generalmente stagni, ma comunicano con l'esterno attraverso porte, finestre, fessure dell'involucro edilizio. Naturalmente è presente un determinato numero di ricambi d'aria, o prodotti da sistemi di immissione dell'aria (ventilazione meccanica), o naturalmente (a causa delle infiltrazioni). Quando le infiltrazioni sono forzate (prodotte da un impianto di ricambio d'aria) si possono valutare dalla portata d'aria dell'impianto (in genere se si supera 1 volume/ora di portata di aria di immissione, il ricambio naturale non è significativo). Quando l'impianto non fornisce aria, e si hanno cioè infiltrazioni per circolazione naturale, occorre misurare la portata di aria esterna per verificare che siano rispettate le specifiche di progetto, le quali sono funzione degli occupanti e della destinazione del locale. La valutazione corretta dei ricambi d'aria risulta quindi uno strumento fondamentale per il dimensionamento degli impianti di ventilazione e per l'ottenimento di un adeguato livello di qualità dell'aria interna. La strategia più efficiente è quella che permette di ottimizzare i consumi energetici e allo stesso tempo salvaguardare la salute degli occupanti.

Figura 1. Correlazione tra gli aspetti relativi alla qualità dell'aria interna e gli aspetti energetici



Per la progettazione e il dimensionamento degli impianti si può fare riferimento alla norma **UNI EN 15242:2008** "Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni". La norma descrive in maniera dettagliata il metodo per calcolare le portate d'aria negli edifici da utilizzarsi per applicazioni quali il calcolo dell'energia, il calcolo del carico termico di

riscaldamento e raffrescamento, il benessere estivo e la valutazione della qualità dell'aria degli ambienti interni.

2.2.3.1 Ricircolo su filtri ²

I principali sistemi di abbattimento, presenti oggi sul mercato, sono installati presso impianti di **Ventilazione Meccanica Controllata**. In particolare, con l'utilizzo di sistemi filtranti ad elevata efficienza si assicura il corretto ricambio dell'aria, poiché viene immessa aria nuova e filtrata, permettendo l'espulsione di quella inquinata e garantendo un'ottima protezione anche contro le polveri sottili: PM₁₀ e PM_{2,5}.

La filtrazione dell'aria svolge quindi un ruolo essenziale nel controllo e mantenimento di livelli di contaminazione accettabili, in quanto è proprio attraverso i filtri che si riesce ad abbattere e controllare il quantitativo di contaminante (particellare e microbiologica) presente nell'aria che viene immessa nei locali. Una prima possibile scelta è quella di posizionare il sistema di filtrazione esclusivamente sulle prese d'aria esterne (**Outside Air Treatment**), questo soprattutto nel caso di ambienti outdoor particolarmente inquinati quali ad esempio ambienti cittadini o vicino strade ad elevato traffico e per tutti quei sistemi in cui il controllo delle concentrazioni indoor viene effettuato soprattutto per diluizione tramite portata d'aria esterna che deve quindi risultare il meno possibile inquinata. L'installazione dei filtri può essere anche utilizzata per creare zone di bypass all'interno del sistema dei condotti di aereazione (**Partial Supply Air Treatment**), questo è valido nei sistemi in cui sono note le concentrazioni inquinanti indoor e outdoor e il livello di riduzione delle concentrazioni inquinanti richiesto è comunque modesto e facilmente gestibile. I risultati migliori si ottengono nei sistemi in cui la riduzione della portata d'aria esterna viene affiancata dall'installazione di opportuni sistemi di filtrazione sugli eventuali punti di ricircolo e sopra opportuni sistemi di bypass (**Full Supply Air Treatment**), è però il sistema che richiede il maggior costo per l'installazione dei dispositivi richiesti e per il volume necessario all'installazione stessa. Le principali caratteristiche del filtro sono: la frazione arrestata del particolato inquinante (efficienza), perdite di carico del flusso d'aria durante l'attraversamento, e l'intervallo di tempo tra una manutenzione (sostituzione o pulizia dei filtri) e l'altra.

Vi sono 3 tipi di filtri:

- **filtri meccanici**: arrestano polveri tra 0,5 e 1 µm. Sono dei materassini di materiale fibroso attraversati da aria alla velocità tra 1 m/s e 4 m/s. Il costo è contenuto e la perdita di carico è bassa, ma aumenta in modo rilevante con l'intasamento;
- **filtri elettrostatici**: utilizzati per particelle tra 0,001 µm e 0,5 µm. Il campo elettrico (circa 12 kV) ionizza l'aria e la superficie del particolato contenuto in essa. Le particelle aderiscono ad una piastra carica di segno opposto in un campo elettrostatico;

² *Impianti di climatizzazione e condizionamento*. Cinzia Buratti, 2015: "Qualità dell'aria interna e sistemi di filtrazione"

- **filtri chimici:** per eliminare particolari gas o vapori, ad esempio i filtri a carbone attivo. Questi filtri sono caratterizzati da processi di adsorbimento.

La filtrazione meccanica dell'aria si basa su diversi meccanismi fisici che possono avvenire singolarmente o accoppiati tra loro, la scelta delle diverse tipologie di filtro è oggi regolata da più normative (UNI EN 10339, EN 779, UNI EN 1822) le quali permettono di definire con precisione le caratteristiche del filtro in relazione alla propria classe di efficienza ed impiego. I filtri sono quindi classificati dalle varie normative in base alla loro **EFFICIENZA**, ossia la misura della capacità di rimuovere le particelle trasportate dalla corrente d'aria che attraversa il filtro stesso. Senza entrare nel merito della descrizione delle diverse caratteristiche si possono individuare le tre seguenti macro-categorie o gruppi (secondo la norma **UNI 779:2012** "Filtri d'aria antipolvere per ventilazione generale - determinazione della prestazione di filtrazione"):

- **filtri grossolani (G)** detti anche pre-filtri;
- **filtri medi (M);**
- **filtri fini (F).**

In particolare, la normativa **UNI EN 1822-1** "Filtri per aria ad alta efficienza (EPA, HEPA, ULPA) - Parte 1: classificazione, prove di prestazione, marcatura" si applica ai filtri per l'aria ad alta ed altissima efficienza e a bassissima penetrazione (EPA, HEPA, ULPA) utilizzati nel campo della ventilazione e del condizionamento dell'aria, come pure i processi tecnologici quali la tecnologia delle camere bianche o dell'industria farmaceutica.

Il metodo per separare i principali componenti inquinanti dalla corrente gassosa basato sull'adsorbimento promuove la formazione di legami fisici tra i composti da rimuovere e un solido "attivo" nei loro confronti. Per massimizzare l'efficienza del processo di adsorbimento, vengono utilizzati solidi microporosi che offrono la massima superficie di adsorbimento per unità di peso.

Il processo di adsorbimento è esotermico ma nelle applicazioni comuni riguardanti gli impianti HVAC a basse concentrazioni diventa praticamente isoterma, è inoltre reversibile, per cui è possibile che molecole legate alla superficie dei pori possano sfuggire da questi ultimi e diffondere nuovamente all'interno del flusso gassoso. I principali dispositivi di rimozione basati sul principio dell'adsorbimento che trovano applicazione negli impianti HVAC sono:

Tabella 1. Dispositivi per la rimozione di gas e/o vapori (adsorbimento)

Materiali adsorbenti	Vapori o gas catturati
Carbone attivo	Vapori organici, ozono, gas acidi (H ₂ S)
Alluminia attivata	Composti organici
Silica gel	Acqua, e composti organici polari
Setacci molecolari (ad esempio: zeoliti)	CO ₂ , composti a base di iodio

Come principale materiale adsorbente è utilizzato diffusamente il carbone attivo, prevalentemente di origine vegetale, che opportunamente lavorato e trattato assume forme di granuli, scaglie o cilindretti, questi ultimi aventi dimensioni di qualche millimetro. I filtri e i sistemi costituiti da un adsorbitore a carboni attivi vengono impiegati nel settore industriale su impianti di processo e di risanamento dell'ambiente di lavoro per la tutela della qualità dell'aria, per esempio, nei settori: rimozione/recupero solventi o miscele di solventi; depurazione dell'aria da processi produttivi; disoleazione di aria compressa; deodorazione di aria esausta e gas di sfiato; rimozione di sostanze nocive negli impianti di condizionamento. Il carbone è contenuto in pannelli, tasche, cartucce o semplicemente inserito in contenitori di calcolate dimensioni formanti il letto di attraversamento (*adsorber bed*) del fluido gassoso contenente l'inquinante da adsorbire. La capacità di adsorbimento viene espressa in peso percentuale ovvero in kg di contaminante organico adsorbito per 100 kg di carbone attivo impiegato. Tale capacità è compresa tra valori minimi di 1% fino a valori massimi del 30%. L'efficienza dei filtri a carbone attivo è condizionata da una serie di parametri quali il peso molecolare e la concentrazione degli inquinanti, la temperatura, l'umidità, la pressione e la presenza di particolato nel flusso da trattare. La presenza di particolato, andando a ridurre le microporosità del carbone, ne riduce l'efficienza di adsorbimento pertanto esso va catturato a monte con opportuni filtri (vedi schema d'installazione). A temperature e umidità relative contenute gli adsorbitori a carbone attivo offrono le migliori prestazioni, per questo è consigliabile lavorare con temperature inferiori a 50 °C e umidità relativa non superiore al 70% ed ovviamente con velocità di passaggio del fluido gassoso attraverso il letto di carbone e con tempo di contatto rigorosamente calcolati.

2.2.4 Manutenzione

Gli aspetti relativi alla manutenzione del sistema di climatizzazione vengono spesso disattesi provocando inevitabilmente un impatto negativo sulla qualità dell'aria indoor. Ogni componente dell'impianto, dalle griglie ai filtri, dalle canalizzazioni ai diffusori fino ad arrivare alle batterie di riscaldamento e raffreddamento, è soggetto ad azioni di degrado, generando una sorta di effetto domino tale da rendere gli elementi stessi sorgenti di inquinamento e di diffusione e amplificazione di contaminanti. Gli alti livelli di umidità, ad esempio, possono provocare con il tempo acqua stagnante ed incrostazioni lungo le canalizzazioni e nei diversi componenti dei condizionatori, con conseguente sviluppo di microrganismi e muffe. Al fine del mantenimento di una qualità dell'aria salubre, gli interventi manutentivi dovranno essere accuratamente programmati ed effettuati, assicurando valori termoigrometrici sempre adeguati e un sufficiente ricambio d'aria (fonte: **AICARR**, "Linee Guida sulla manutenzione degli impianti di climatizzazione").

I **bioeffluenti umani** sono dei composti chimici che vengono emessi dal corpo. Rappresentano un insieme eterogeneo di composti organici e inorganici, emessi sotto forma di gas o particelle, sia con la respirazione, che con la sudorazione, o la traspirazione per effetto del metabolismo e quindi in quantità correlata all'attività dell'individuo.

Fra di essi vi sono: vapore d'acqua, anidride carbonica, esteri, alcoli, aldeidi, metano, composti solforati, acidi grassi. I bioeffluenti non hanno azione tossica, ma **l'aumentare della loro concentrazione**, in locali affollati, crea un senso di sgradevolezza e fastidio.

Quale indice di tale fastidio, è stata assunta la **concentrazione di CO₂** che sempre accompagna l'attività metabolica, essendo, essenzialmente, un sottoprodotto della respirazione. La CO₂ viene quindi utilizzata per valutare le prestazioni degli impianti di trattamento dell'aria e per individuare il grado di diluizione degli inquinanti negli ambienti molto frequentati; in questo senso rappresenta un indicatore della qualità dell'aria. Nella normativa nazionale per gli ambienti indoor ad uso residenziale non sono presenti limiti e/o standard per quanto riguarda i livelli di concentrazione di CO₂, pertanto si può riferire a valori di riferimento presenti nella normativa di altri paesi o per analogia ad altri standard quali ad esempio quelli relativi all'aria ambiente, o a valori reperiti nella letteratura scientifica.

Molte attività degli occupanti contribuiscono a inquinare l'aria degli ambienti chiusi. Uno dei fattori principali è il **fumo di tabacco passivo (ETS)**, oltre ai processi di combustione di petrolio, gas, cherosene, carbone e legno. Gli occupanti contribuiscono inoltre alla qualità dell'aria e alle condizioni di benessere termoigrometrico anche attraverso la respirazione e la superficie corporea, i prodotti cosmetici o deodoranti utilizzati, i dispositivi di riscaldamento, i materiali di pulizia e prodotti vari (colle, adesivi, solventi, vernici), gli abiti trattati recentemente in lavanderie, strumenti di lavoro, quali stampanti e fotocopiatrici.

3 Gli effetti dell'Inquinamento Indoor

L'**esposizione umana ad inquinanti indoor** è difficilmente quantificabile essendo legata a variabili specifiche di ogni microambiente e di ogni soggetto ed essendo inoltre estremamente variabile il livello di inquinamento nelle abitazioni in funzione delle sorgenti presenti nell'edificio, della ventilazione e delle abitudini degli occupanti. Capita inoltre che numerosi effetti si manifestino grazie ad una contemporanea presenza di stress, pressioni lavorative, discomfort di origine stagionale, senza contare che la risposta degli individui ad una stessa esposizione ad un inquinante ambientale può comunque variare a seconda di varie condizioni individuali intrinseche (come sesso, età, grado di reattività delle vie respiratorie).

3.1 Effetti tossici

Gli inquinanti possono suddividersi essenzialmente in tre macro categorie: **chimici** (monossido di carbonio, biossido di azoto, biossido di zolfo, benzene, ozono, particolato aerodisperso), prodotti principalmente dalle attività umane come impianti industriali o mezzi di trasporto; **biologici** (batteri, pollini, muffe, acari e gas metabolici); **fisici** (amianto e radon). Provengono in parte dall'esterno (inquinamento atmosferico outdoor, pollini), ma molti sono prodotti da fonti interne. Nella tabella riportata sono riportate le principali fonti interne di inquinamento rappresentate da: occupanti (uomo, animali), polvere (microrganismi), strutture, materiali edili, arredi, impianti (condizionatori, umidificatori, impianti idraulici) e aria esterna.

Tabella 2. Principali agenti indoor e potenziali fonti interne

FONTI	INQUINANTI
Processi di combustione a gas o carbone per riscaldare e/o cucinare, camini e stufe a legna, gas di scarico veicoli	Prodotti di combustione (CO, NO _x , SO ₂ , particolato)
Materiali da costruzione e isolanti	Amianto, fibre vetrose artificiali, particolato, radon; agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Materiali di rivestimento e moquette	Formaldeide, acrilati, COV e agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Arredi	Formaldeide, COV e agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Liquidi e prodotti per la pulizia	Alcoli, fenoli, COV
Fotocopiatrici	Ozono (O ₃), polvere di toner, idrocarburi volatili (COV)
Fumo di sigaretta	Idrocarburi policiclici, COV e formaldeide, CO, particolato fine
Impianti di condizionamento	CO ₂ e COV (per scarso numero di ricambi orari o eccesso di riciclo); agenti biologici (per mancanza di pulizia/manutenzione)
Polvere	Agenti biologici (allergeni indoor, acari)
Individui	CO ₂ e agenti biologici (batteri, virus, ecc.)
Animali	Allergeni indoor (peli, ecc.)
Sorgenti naturali (lave, tufi, graniti, ecc.)	Radon

Le conseguenze dell'esposizione agli inquinanti indoor sono distinguibili in:

- ***Effetti immediati:*** rivelabili cioè dopo una singola esposizione o dopo esposizioni ripetute. Includono: irritazione degli occhi, del naso e della gola, nausea, emicranie, capogiri, l'affaticamento. Tali effetti immediati sono solitamente di breve durata e comunque curabili. Primo semplice trattamento è l'allontanamento dalla fonte d'inquinamento, se identificabile.

Gli inquinanti dell'aria agiscono prevalentemente sull'apparato respiratorio che è la prima via di contatto e di assorbimento. Alcuni inquinanti chimici possono agire come irritanti primari delle vie aeree, altri, dotati di elevato potere ossidante (ozono o ossidi di azoto), possono determinare un abbassamento della soglia di reattività bronchiale aspecifica, attraverso l'induzione di un processo infiammatorio. Sia le sostanze chimiche che quelle biologiche sono in grado di interagire con il sistema immunitario esasperandone o sopprimendone la risposta. Nel primo caso si possono riscontrare patologie allergiche, quali asma, rinite e alveolite allergica estrinseca causate soprattutto dai fattori biologici ad alto peso molecolare, ma anche da agenti chimici, che si comportano come antigeni. Nel secondo caso (immuno-depressione) la conseguenza può essere una aumentata suscettibilità ad agenti infettivi o una ridotta sorveglianza antitumorale; va tuttavia sottolineato che, *alla luce delle conoscenze attuali*, benché molte sostanze possano essere chiamate in causa al riguardo, i dosaggi necessari sono molto superiori a quelli riscontrabili nelle abituali condizioni di vita.

- ***Effetti a lungo termine:*** possono rilevarsi o dopo un lungo e ripetitivo periodo di esposizione, o dopo alcuni anni rispetto a quando l'esposizione è avvenuta. Questi effetti, che includono alcune patologie respiratorie, malattie cardiache e cancro, possono essere severamente debilitanti o mortali.

È dunque importante provare a migliorare la qualità dell'interno dell'aria negli edifici, anche se i sintomi non sono notevoli. Mentre le sostanze inquinanti trovate comunemente in aria dell'interno sono responsabili di molti effetti nocivi, vi è una considerevole incertezza circa le concentrazioni o i periodi di esposizione necessari a produrre i problemi di salute specifici. Gli individui inoltre reagiscono molto diversamente alla esposizione delle sostanze inquinanti. Non vi è dubbio che la qualità dell'aria confinata debba essere considerata un vero problema di sanità pubblica, in quanto determina un impatto sulla popolazione in termini non solo di effetti sanitari, costi diretti per l'assistenza medica, ma di ordine economico generale.

3.2 Benessere termoigrometrico

Il comfort microclimatico è fondamentale in tutti gli ambienti di lavoro e nei luoghi aperti al pubblico. Per ottenere situazioni di **benessere microclimatico**, occorre garantire condizioni accettabili sia dal punto di vista delle grandezze termoigrometriche, che caratterizzano il microclima, sia del livello di illuminazione, sia della qualità dell'aria. La valutazione di tale stato per lo più soggettivo può essere oggettivata e quantificata mediante l'utilizzo di indici integrati che tengono conto sia dei parametri microclimatici

ambientali, sia del dispendio energetico (inteso come dispendio metabolico e misurato in MET) connesso all'attività lavorativa, sia della tipologia di abbigliamento (isolamento termico: CLO) comunemente utilizzato. Tra gli indici quello che con maggiore precisione rispecchia l'influenza delle variabili fisiche e fisiologiche sopracitate sul comfort termico, è il **PMV (Predicted Mean Vote)**.

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) è una funzione matematica di 6 parametri che esprime il valore medio di benessere di un individuo, considerato "medio", all'interno di un campione significativo di persone su una scala di sensazioni termiche a 7 punti che varia da -3 a +3 con lo 0 che indica la neutralità termica:

Tabella 3 Scala di sensazione termica PMV

Voto Sensazione
+3 molto caldo
+2 caldo
+1 leggermente caldo
0 né caldo né freddo
-1 leggermente freddo
-2 freddo
-3 molto freddo

Esistono dei software ed apposite tabelle, contenute nella norma, che permettono di effettuare facilmente questo calcolo di difficile soluzione. In linea di principio la condizione di neutralità termica è caratterizzata da un valore nullo dell'indice PMV. La UNI-EN-ISO 7730 (1997) considera però gli ambienti mediamente confortevoli se caratterizzati da valori di PMV compresi tra - 0,50 e + 0,50. Dall'analisi del bilancio termico sul corpo umano si determinano i parametri presi in considerazione per questa analisi. Essi possono essere divisi in due macro-gruppi:

1. parametri fisici dell'ambiente:

- temperatura dell'aria,
- velocità dell'aria,
- temperatura media radiante,
- grado igrometrico o umidità relativa;

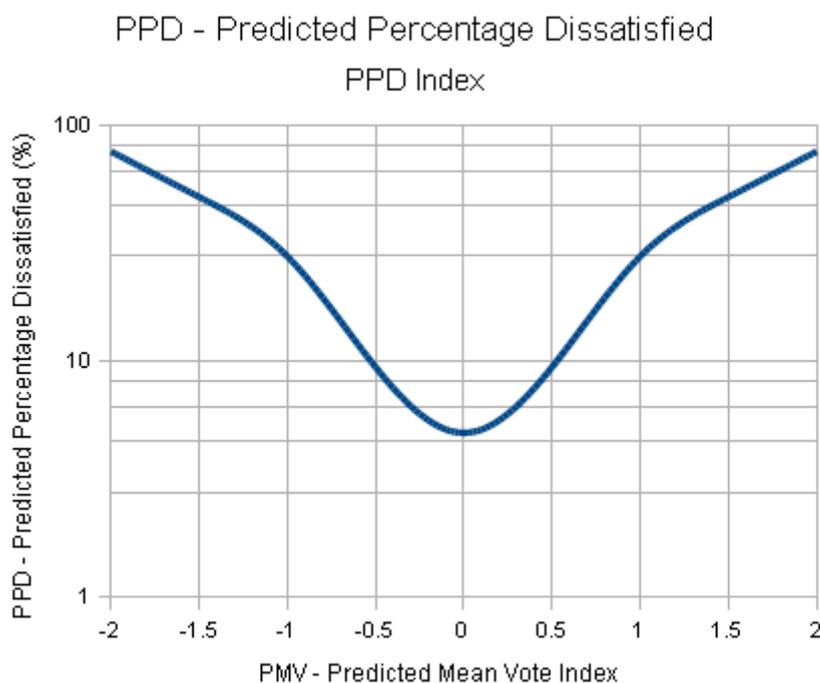
2. parametri relativi al soggetto:

- attività svolta, ovvero il metabolismo energetico,
- resistenza termica dell'abbigliamento.

L'insieme di queste sei variabili viene generalmente chiamato ambiente termico. Empiricamente si è dimostrato che i voti dei singoli individui presentano una certa dispersione intorno al valore medio, il che è comunque rappresentativo di una certa insoddisfazione.

Dal PMV è quindi derivato un secondo indice denominato **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)** che quantifica percentualmente i soggetti comunque insoddisfatti in rapporto a determinate condizioni microclimatiche. Viene considerato insoddisfatto un soggetto che dia una votazione all'ambiente maggiore o uguale a +2 o minore o uguale a -2, corrispondenti rispettivamente alle sensazioni di caldo e di freddo. Dal diagramma in figura quale si evince che la percentuale di insoddisfatti, è pari al 5% per PMV uguale a 0, diventa il 10% ai limiti dell'intervallo di benessere -0,50 - +0,50 e cresce rapidamente all'allontanarsi del PMV dai valori di comfort. Questo diagramma evidenzia come le risposte soggettive siano molto diverse tra loro e come sia quindi impensabile realizzare condizioni che siano di comfort per tutti.

Figura 2. Percentuale di soddisfazione termica **PPD** nel caso di attività leggere, 50% di umidità relativa e velocità media dell'aria $\leq 0,15$ m/s



Si possono considerare come temperature di benessere termico per l'inverno le temperature tra $20 \div 23,5^{\circ}\text{C}$ e per l'estate $23 \div 26^{\circ}\text{C}$. Analizzando in dettaglio le equazioni per il calcolo del PMV, risulta che l'umidità per gli ambienti moderati, al contrario delle altre tre variabili ambientali, influisce molto poco sul valore della sensazione termica. Tuttavia, per valori di umidità minori del 0,30% si seccano le mucose con diminuzione delle difese per germi e batteri e per valori maggiori di 70% aumentano i rischi di allergie e le probabilità che si formi condensa su punti freddi con conseguente sviluppo di muffe. Si può inoltre parlare di "Discomfort locale". Gli indici PMV e PPD danno una valutazione del comfort in funzione dei valori medi delle variabili

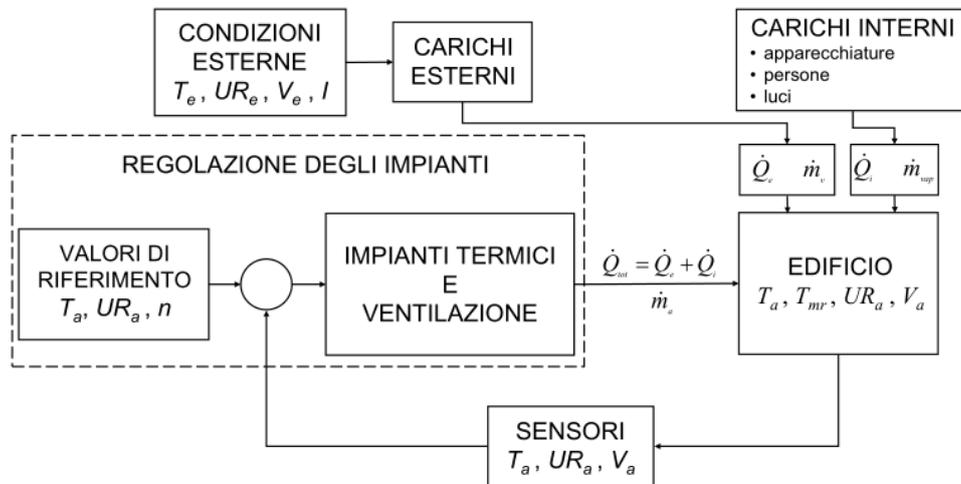
ambientali, cioè valutano il comfort globale. Le condizioni $-0,5 < PMV < +0,5$ e $5\% < PPD < 10\%$ rappresentano pertanto condizioni necessarie ma non sufficienti per il benessere medio negli ambienti. Perché ci sia effettivamente comfort, infatti, deve essere nullo anche il discomfort dovuto a disuniformità delle variabili ambientali locali (e non globali). Le cause di discomfort locale, prese in considerazione dalla norma, sono quattro:

1. elevata differenza verticale della temperatura dell'aria: viene prescritto come valore limite accettabile una differenza massima di temperatura di 3°C tra le misure a 1,1 m e 0,1 m dal pavimento (5% insoddisfatti);
2. pavimento troppo caldo o troppo freddo: per la sola stagione invernale è considerato accettabile un intervallo di temperatura superficiale del pavimento tra 19°C e 26°C , con la possibilità di arrivare a 29°C in presenza di sistema di riscaldamento a pavimento (10% insoddisfatti);
3. correnti d'aria: il criterio di accettabilità fa riferimento all'indice DR (Draft Risk, in italiano Rischio da Corrente d'aria), limitandone il valore massimo a 15 m/s: il criterio risulta praticamente sempre soddisfatto (10% insoddisfatti);
4. elevata asimmetria media radiante: per la sola stagione invernale sono fissati i seguenti limiti: con finestre o superfici verticali fredde, in direzione orizzontale $< 10^{\circ}\text{C}$, per soffitto riscaldato, in direzione verticale $< 5^{\circ}\text{C}$ (5% insoddisfatti).

Oggi esistono strumenti integrati come il BABUC che consentono di ottenere direttamente dati sul PMV e il PDD in tempo reale. In aggiunta al miglioramento della qualità dell'aria, il **monitoraggio indoor** permette un notevole risparmio energetico. Infatti, la corretta e precisa rilevazione dei parametri di un impianto (valori di soglia di temperatura, umidità, pressione), il controllo della regolazione degli stessi in funzione delle stagionalità, delle fasce orarie e della presenza o meno in ambiente di occupanti, oltre a garantire le condizioni di benessere desiderate, consente di ottimizzare il consumo energetico. Il controllo della qualità dell'aria, la segnalazione della presenza di gas quali il biossido o il monossido di carbonio fornisce indicazioni precise per una migliore ventilazione con un risparmio di energia.

È possibile tarare la ventilazione sul numero probabile di persone presenti all'interno dell'edificio basandosi sui livelli di CO_2 . Si cita, a riguardo, il documento redatto dall'Istituto Superiore di Sanità: "**Parametri microclimatici e inquinamento indoor**", il quale riporta un inquadramento dei parametri termoisometrici e dei componenti del sistema edilizio di cui tener conto nel monitoraggio dell'aria indoor, oltre ad una sintesi delle relative influenze sugli inquinanti chimici e biologici. Inoltre, viene riportato uno schema esemplificativo di organismo edilizio, con un elenco non esaustivo di informazioni da considerare, per programmare il monitoraggio, o da registrare durante il monitoraggio di un ambiente confinato:

Figura 3. Schema relazione impianti/edificio



All'interno degli edifici la temperatura dovrebbe variare tra i 20 °C e i 22 °C con un tasso di umidità tra il 40% e il 60%. Non è consigliabile scendere sotto il 20% di umidità perché l'aria diventerebbe troppo secca causando un'elevata evaporazione delle mucose bronchiali e quindi secchezza nelle vie respiratorie.

Negli ambienti in cui si debbano considerare gli effetti sul benessere delle persone, si possono adottare differenti metodi di classificazione e di progettazione. Le classi di qualità dell'aria sono funzione delle portate di aria esterna e della metodologia di filtrazione adottata. Il metodo prestazionale fa riferimento al bilancio di massa di singoli contaminanti e porta a determinare la portata minima e la filtrazione minima da adottare ai fini del rispetto di una soglia di concentrazione di ciascun contaminante. La classificazione che prende la concentrazione di CO₂ come marker della qualità dell'aria è utilizzabile nei locali in cui non è consentito fumare e non siano presenti fiamme libere e nei quali l'inquinamento è causato principalmente dalle persone in relazione alla loro attività metabolica.

In un ambiente confinato, quando le uniche sorgenti inquinanti sono quindi gli stessi occupanti della stanza la percentuale delle persone insoddisfatte cresce in modo significativo al superamento dei 600 ppm di CO₂; per questo motivo, di solito verso gli 800 ppm conviene aumentare l'immissione dell'aria esterna allo scopo di abbattere la concentrazione dei vari inquinanti presenti favorendo la diluizione degli stessi ed abbassando le concentrazioni di CO₂.

La normativa tecnica definisce i tassi di ventilazione all'interno degli edifici, che sono necessari per garantire livelli ottimali di qualità dell'aria. Si possono citare ad esempio i vari standard internazionali come: **Indoor Air Quality Guide**, **ASHRAE Standard 62.1** e **CIBSE Guide B: Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration** i quali riportano il valore di riferimento in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.

Tabella 4. Classi di qualità dell'aria in funzione della concentrazione di CO₂

Classi di qualità dell'aria	Concentrazione di CO ₂ [ppm]
Elevata	≤ 400
Media	400 ÷ 600
Bassa	600 ÷ 1000

Se comunque il solo uso della CO₂, come indicatore globale, è da ritenersi superato, la sua misura insieme a quella dei principali VOC e dell'ammoniaca va considerata per la determinazione oggettiva della qualità dell'aria. Fondamentale poi è il giusto inquadramento del sistema edilizio inteso come sistema termodinamico aperto con scambi termici e di acqua con l'ambiente esterno e con quanto presente all'interno, e come tali scambi influiscono sui parametri micro-climatici interni:

- temperatura dell'aria: T_a
- temperatura superfici e temperatura media radiante: T_s e T_{mr}
- umidità relativa: $u.r$
- velocità dell'aria e ricambi d'aria.

I precedenti parametri ambientali descrivono i principali scambi termici del corpo umano, che, insieme al metabolismo e alla resistenza termica dell'abbigliamento, determinano il parametro che identifica la sensazione provata.

La norma **UNI 15251** (Criteri per la determinazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica). Specifica i parametri di input per la progettazione e la valutazione degli ambienti indoor. La norma si focalizza principalmente sulla qualità dell'aria e sull'ambiente termico ma anche su aspetti come: qualità della luce e qualità acustica.

La norma **UNI 10339** (Determinazione delle portate d'aria per il dimensionamento dell'impianto aerulico in base al numero di persone previsto e ai livelli di inquinamento attesi): per il residenziale ed il terziario. Individua due metodi: **metodo prescrittivo** basato sulla determinazione di alcuni parametri progettuali come numero di persone, dimensioni e livello di inquinamento dell'edificio ed il **metodo prestazionale** basato sulla determinazione delle portate d'aria necessarie in funzione del livello d'inquinamento legato agli occupanti e all'edificio.

La normativa **UNI 10339** fornisce indicazioni in merito alla classificazione e la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il funzionamento degli stessi, viene quindi applicata agli impianti aerulici destinati al benessere delle persone, installati in edifici chiusi. L'impianto aerulico deve consentire di raggiungere e mantenere: le condizioni di qualità e movimento dell'aria e le condizioni termiche ed igrometriche dell'aria specifiche delle funzioni assegnate (filtrazione, riscaldamento,

raffrescamento, umidificazione, deumidificazione). L'impianto deve assicurare quindi ai fini del benessere e della salvaguardia delle condizioni di qualità dell'aria degli ambienti confinati non industriali: un'immissione di aria esterna pari o maggiore ai valori minimi, per ciascun tipo di destinazione d'uso, riferiti o al numero delle persone presenti, o alla superficie in pianta, o al volume dell'ambiente.

La norma **UNI 15251** che è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea **EN 15251** specifica tra le altre cose i parametri relativi all'ambiente interno che influiscono sulla prestazione energetica degli edifici. Nelle due revisioni considerate nel seguente articolo: *"The impact of design ventilation rates on the indoor air quality in residential buildings: An Italian case study"* (Moschetti R. e Carlucci S. *Indoor and Built Environment*, 2016) le due norme forniscono i parametri relativi alle portate d'aria che devono essere garantite in determinati ambienti a seconda della destinazione d'uso, del grado di affollamento o della superficie netta [m²] in pianta. Viene introdotto un sistema di classificazione della qualità dell'aria basato sulla differenza tra i precedenti valori di portata e il grado di concentrazione degli inquinanti considerati più pericolosi. I valori di riferimento principali sono riportati nelle successive tabelle:

Tabella 5. Valori per i flussi d'aria di immissione ed estrazione suggeriti dalla norma EN 15521. AQC: air quality class

	Terminali di immissione			Terminali di estrazione	
	Tasso di ventilazione totale		Flusso di aria per persona	Cucina	Bagno
AQC	<i>m³/h per m²</i>	ACH	<i>m³/h per persona</i>	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>
I	1,8	0,7	36	100,8	72
II	1,5	0,6	25,2	72	54
III	1,3	0,5	14,4	50,4	36
IV	0,8	0,4	N/A	36	21,6

Tabella 6. Valori per i flussi d'aria di immissione ed estrazione suggeriti dalla norma UNI 10339

	Terminali di immissione		Terminali di estrazione	
	Flusso di aria per persona	Flusso di aria per m ²	Cucina	Bagno
AQC	<i>m³/h per persona</i>	<i>m³/h per m²</i>	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>
Alto	16,2	N/A	46,8	28,8
Medio	10,8	0,5	N/A	N/A
Basso	7,2	N/A	N/A	N/A

I valori indicati in tabella sono presenti all'interno delle due seguenti proposte di normativa: prUNI 10339:2014 e prEN 15251:2014 le quali basano le proprie analisi sugli scenari di ventilazione previste dallo standard: ASHRAE Standard 62.1-2010, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality".

Vengono inoltre caratterizzate le seguenti classi di qualità dell'aria in funzione delle concentrazioni di TVOC (Total Volatile Organic Compound) è un valore che indica la somma dei valori VOC delle singole sostanze (misurate), cioè le concentrazioni di composti organici volatili totali che possono essere individuate

all'interno degli ambienti: secondo la proposta di normativa prEN 15521 è possibile individuare due classi di edifici rispettivamente "very polluting building" e "polluting building" e per le quali le concentrazioni di composti organici volatili TVOC, devono risultare minori di 400 e 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ senza specificare l'intervallo temporale a cui le concentrazioni indicate si riferiscono. La proposta di norma prUNI 10339 invece fissa valori decisamente più restrittivi e cioè inferiori a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e a 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ individuando tra le due classi di concentrazioni una terza classe intermedia con una risoluzione temporale di 1 h. Questi valori derivano da numerosi studi precedenti tra cui il cosiddetto studio *Seifert*, che tra il 1985 e il 1986 nell'ambito di un più largo studio da parte dell'Istituto Superiore di Sanità tedesco ha analizzato il normale inquinamento da COV dell'aria all'interno di circa 500 abitazioni tedesche. I risultati hanno evidenziato la presenza di oltre 50 differenti sostanze, con una concentrazione totale molto diversa da un'abitazione all'altra, compresa tra 170 e 2600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La valutazione statistica di questo studio ha rivelato un valore medio (valore al 50° percentile o mediano) di circa 330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, che, arrotondato a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, è considerato da allora da molti esperti il valore obiettivo a cui aspirare. In occasione della Indoor Air Conference di Ottawa, nel 1990 lo stesso Seifert constatò che il valore TVOC di 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e i relativi valori per i singoli gruppi di VOC, rappresentavano solo un obiettivo a cui aspirare nel lungo periodo, benché senza valutazione tossicologica. Infatti, per ambienti appena ristrutturati si indicò come ampiamente accettabile un superamento di tali valori anche di 50 volte dopo una settimana e di 10 volte dopo sei settimane.

La **qualità dell'aria negli ambienti confinati** è quindi essenzialmente una percezione soggettiva, basata in genere sulla temperatura dell'aria e sulla sua umidità (*comfort termo-igrometrico*), sul grado di ventilazione e sulla concentrazione degli inquinanti presenti. L'inquinamento può essere dovuto a diversi fattori tra cui cottura di alimenti, fumo di sigarette, deodoranti o incensi e candele bruciate in ambienti chiusi ma anche i mobili, i componenti di arredo ed i materiali con cui l'ambiente è realizzato (pavimenti, pareti, soffitti).

Si tende a perseguire una **qualità dell'aria** che viene definita non ideale, ma piuttosto **accettabile**, in quanto soddisfa sia le normative imposte dagli organi competenti, sia le esigenze di comfort di una percentuale definita "accettabile" degli occupanti degli ambienti indoor. L'approccio più efficace per il miglioramento dell'**IAQ - Indoor Air Quality** richiede quindi di operare su più fronti, riducendo le emissioni di sostanze inquinanti che interessano l'ambiente indoor e adottando strategie di ventilazione adeguate.

Per ottenere un'ottimale qualità dell'aria interna è necessario ventilare adeguatamente l'ambiente. La norma **UNI EN 15251** propone tre criteri di valutazione della qualità dell'aria interna differenti da usare in funzione del tipo di ambiente e dei suoi requisiti. Il primo metodo si basa sulla portata di aria esterna per ogni persona presente all'interno dell'edificio basandosi sull'inquinamento prodotto dall'uomo stesso, il secondo sulla portata di aria esterna per unità di superficie basandosi sull'inquinamento prodotto dai materiali componenti l'arredo e le finiture dell'ambiente interno (ed è quello che è stato analizzato e simulato nel seguente lavoro di tesi), mentre il terzo si basa sulla concentrazione di CO₂.

La qualità dell'aria interna negli ultimi anni è diminuita drasticamente a causa di diversi fattori quali: il risparmio energetico e la conseguente diminuzione della ventilazione, nuovi materiali da costruzione e nuove fonti di inquinamento indoor.

Le numerose campagne di risparmio energetico, unite agli elevati prezzi dell'energia, hanno spinto molte persone a rendere il più possibile ermetiche le loro abitazioni riducendo anche il tasso di ventilazione; ciò significa che la quantità di aria esterna fornita dalle infiltrazioni attraverso l'involucro e gli infissi non è più sufficiente a fornire il necessario ricambio d'aria. L'introduzione e l'utilizzo di nuovi materiali, come ad esempio i polimeri e le fibre, hanno contribuito all'aumento di emissioni di inquinanti andando a compromettere sempre più la qualità dell'aria interna.

Appare evidente come sia necessario operare su più fronti, tramite l'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata (VMC) e opportuni filtri per garantire da un lato un risparmio energetico sostenibile e dall'altro una qualità dell'aria compatibile con il benessere interno degli occupanti. L'adozione di idonei sistemi di filtrazione inoltre permette di abbassare le portate d'aria richieste per la diluizione degli inquinanti interni garantendo un ulteriore risparmio energetico senza abbassare la qualità dell'aria percepita dagli occupanti.

L'attenzione sulle **tematiche ambientali legate all'ambiente urbano è uno degli aspetti che maggiormente interessa i cittadini**. Consapevoli che negli ultimi anni è cresciuta tra di essi la voglia di informarsi in prima persona sulle problematiche che li riguardano da vicino e che è aumentata la percezione e conoscenza della qualità dell'ambiente che li circonda, siamo sempre più convinti che un **approccio passivo**, in cui misure e provvedimenti vengono calati dall'alto da parte delle amministrazioni, **non è più sufficiente per trovare soluzioni e consensi**. Anzi, la voglia di capire, approfondire e partecipare attivamente nella scelta delle possibili soluzioni, è diventata la chiave di lettura per ottenere percorsi condivisi, consapevoli e prolifici che portano al raggiungimento di obiettivi concreti, strutturati e duraturi.

Citizen science, apprendimento collaborativo e attivismo ambientale sono stati quindi i concetti chiave su cui è stato impostato il monitoraggio scientifico del Trenoverde di Legambiente, la storica campagna itinerante di Legambiente che dal 1988 insieme a Ferrovie dello Stato Italiane fa tappa nelle maggiori stazioni del paese per promuovere la sostenibilità che parte dal basso, dalle persone, dalla condivisione. Da ciò che tutti possiamo fare per costruire insieme territori più sani e vivibili.

Nel 2017 sono state undici le tappe da nord a sud della Penisola, 2.500 i km percorsi, 40 le giornate di viaggio, 44 i campionamenti indoor eseguiti in 11 le scuole, per sensibilizzare e far crescere la consapevolezza tra le persone che nell'ambiente in cui viviamo molte volte non ci accorgiamo della presenza di alcune criticità - la cui presenza diamo anzi per scontate - che spesso sono il frutto di una superficiale analisi delle cause e, per di più, sono il frutto di comportamenti sbagliati e cattive abitudini da noi perpetrate.

Le conseguenze di questi atteggiamenti e comportamenti sbagliati, in termini di peggioramento della qualità della vita e di patologie sanitarie, **sono ancora troppo spesso sottovalutate e poco conosciute**. Così come sono ancora sottovalutati e poco riconosciuti i piccoli gesti e le continue attenzioni che in molti casi comporterebbero invece notevoli miglioramenti.

Il monitoraggio scientifico del Treno Verde non ha voluto sostituirsi ai controlli eseguiti dagli enti preposti, ma ha voluto fornire un'istantanea - in termini d'inquinamento indoor in alcune scuole selezionate nelle tappe della campagna - proponendo un approccio metodologico diffuso, una campionatura puntuale che, messa a regime, permetterebbe alla scuola di individuare le criticità e attuare risoluzioni concrete e mirate, a servizio del benessere e della sicurezza degli studenti e dei docenti.

4.1 Parametri monitorati

I parametri scelti per le attività di monitoraggio rispondono alle esigenze di caratterizzare gli ambienti sia da un punto di vista legato agli effetti sulla salute che dal punto di vista del benessere psico-fisico legato quindi alle condizioni di benessere termoisometrico. Per tale motivo la CO₂, sebbene sia un composto chimico, viene considerata come indicatore di una caratteristica microclimatica, direttamente legata ai ricambi d'aria ed al tasso di ventilazione.

L'unità di ricerca "Energia e Città" dell'Università IUAV di Venezia si è occupata di analizzare le misure di temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂ svolte in cinque scuole, ciascuna scelta in una tappa del treno verde e distribuite nel territorio nazionale per essere sufficientemente rappresentative delle condizioni climatiche italiane nel periodo in cui ha avuto luogo il Trenoverde 2017. Precisamente le località sono: Potenza, Salerno, Foligno, Vicenza e Milano.

Il CNR IIA ha effettuato una serie di campionamenti con l'obiettivo non soltanto di valutare la qualità degli ambienti interni, ma anche di comprendere se i contaminanti indoor fossero prevalentemente generati in situ o provenissero dall'esterno.

L'attività descritta è stata effettuata dall'Istituto come contributo al Progetto **"Treno Verde 2017"**, promosso da Trenitalia in collaborazione con Legambiente. La partecipazione dell'Istituto è stata realizzata su base volontaria (in forma gratuita), come contributo alla formazione delle giovani generazioni riguardo alla tutela della salute e dell'ambiente. Allo scopo sono stati impegnati dispositivi, strumenti e materiali dedicati, e il personale necessario per predisporre e attuare la raccolta e analisi chimica dei campioni ambientali.

Infine il **DIAEE, il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università Sapienza di Roma**, ha utilizzato il sensore integrato **HOPES** nelle scuole selezionate nei comuni di: Potenza (3-4 Marzo), Foligno (15-16 Marzo) e Vicenza (22-23 Marzo). Il sensore, analizzando contemporaneamente una serie di serie di sostanze inquinanti, fornisce un valore standardizzato di qualità dell'aria basato sulla normativa americana proposta dall'ente americano per la protezione dei lavoratori (NIOSH) e disponibile gratuitamente online nella guida "Niosh pocket guide to chemical hazards". La scelta della normativa americana è dovuta all'ampia gamma di sostanze considerate, a differenza delle normative dei paesi europei, che sono spesso limitate ai maggiori inquinanti tralasciando sostanze ritenute "secondarie" ma che presentano rischi più o meno gravi per la salute.

4.1.1 Parametri chimici

Nell'ambito del Progetto, il **CNR IIA**, in ogni scuola si è occupato di esaminare due o tre ambienti interni (aule, mense o uffici), dove sono stati misurati gli idrocarburi aromatici gassosi benzene, toluene, etilbenzene e xileni (il benzene è un parametro di qualità dell'aria, la sua concentrazione media non deve superare 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabella 7. Schema dei campionamenti attivi e diffusionali effettuati presso le scuole

Città/periodo	Siti					
Asti 1-16/03/2017	Sc. Prim. "G. Ferraris"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	aula		esterno	aula	aula (2)
Bari 17/02-01/03/2017	Sc. "G. Marconi"					
	BTEX				Polveri deposizione	
		aula (A)	aula (B)	esterno	aula	aula (2)
Bologna 21/02-7/03/2017	Sc. Sec. I grado "Farini"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa (A)	mensa (B)	aula	esterno	aula	aula (2)
Catania 14/02-24/03/2017	Istituto					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	(bianco)	aula	esterno	aula	
Foligno (PG) 22/02-09/03/2017	Sc. Infanzia "Piave"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa (A)	mensa (B)	aula	esterno	aula	
Milano 7-21/03/2017	Ist. "Bodio"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa (A)	aula	aula (2)	esterno	aula	
Paola (CS) 9-23//02/2017	I.C. "Gentili"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa (A)	mensa (B)	aula	esterno	sala prof.	atrio uff.
Pescara 13-27/02/2017	Istituto					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	aula		esterno	aula	
Salerno 01/03-19/04/2017	Con. Naz. "T. Tasso"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	aula	aula (2)	esterno	aula	
Potenza 06-21/02/2017	I.C. "Sinisgalli"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	aula		esterno	aula	atrio
Vicenza 03-17/03/2017	Sc. Prim. "Loschi-Carta"					
	BTEX				Polveri deposizione	
	mensa	aula	aula (2)	esterno	corrid.	corrid. (2)

Misure comparative sono state effettuate all'esterno delle scuole. Contestualmente, in uno o più ambienti interni sono state esaminate le polveri di deposizione per il contenuto d'idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e di esteri ftalici.

Nella tabella precedente è presente lo schema dei campionamenti attivi e diffusionali effettuati presso le scuole partecipanti al progetto Treno Verde 2017. La campagna di raccolta si è protratta complessivamente

dal 6 febbraio al 19 aprile 2017; in ciascuna città, tuttavia, essa ha interessato un periodo più breve, mediamente dai 10 ai 15 giorni, ad eccezione di Catania e Salerno dove si è protratta per oltre un mese. Tanto le polveri di deposizione quanto gli idrocarburi BTEX sono stati campionati all'interno degli edifici (possibilmente, in un'aula e nell'ambiente mensa; alternativamente, in due aule), mentre all'esterno sono stati raccolti soltanto i BTEX.

4.1.2 Parametri fisici

Nell'ambito del progetto l'unità di ricerca "Energia e Città" dell'Università **IUAV di Venezia**, come già accennato, si è occupata di analizzare le misure di temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂. In particolare i commenti si sono focalizzati sugli andamenti della concentrazione di CO₂ quale indicatore del livello di ricambio dell'aria rapportato all'affollamento presente. Gli andamenti di temperatura interna sono stati riportati in quanto in genere utili per individuare il momento di apertura delle finestre. I valori di temperatura e umidità rilevati erano sempre nell'intervallo del benessere. L'umidità relativa è risultata sempre compresa nell'intervallo 40-60%. I relativi trend non sono stati quindi riportati non essendo in questo caso particolarmente significativi.

Dato che, come è già stato specificato, non esiste attualmente nella normativa nazionale un valore guida limite per la concentrazione della CO₂ ammessa nelle aule, nei commenti si è fatto riferimento a quanto esistente specificatamente per le scuole in ambito internazionale. In particolare, alla *norma tedesca DIN 1946* e alla norma svizzera SIA 328/1 che fissano un valore limite massimo della concentrazione di CO₂ nelle aule pari a 1500 ppm e un intervallo accettabile tra 1000 e 1500 ppm. Nel Regno Unito l'autorità per la scuola pubblica ha attualmente fissato il limite di 1500 ppm per la concentrazione media durante le ore di occupazione giornaliera. Resta naturalmente il riferimento alle classi di qualità dell'aria in base alla concentrazione interna di CO₂ rispetto al livello esterno (mediamente 400 ppm) stabilite dalla EN 13779.

4.2 Metodologia di campionamento e analisi

4.2.1 Parametri chimici

L'indagine è stata realizzata applicando procedure consolidate, con dispositivi e metodi atti alla valutazione delle specie d'interesse per concentrazioni in aria tipiche degli ambienti interni. Pur essendo compiuta nelle sue finalità, essa è concepita come base concettuale e operativa per future campagne di misura mirate ad una più ampia caratterizzazione degli ambienti interni (scolastici, di vita e di lavoro), estesa ad esempio alle polveri sospese (PM₁₀/PM_{2,5}) e a classi di contaminanti di crescente importanza (distruttori endocrini, sostanze cancerogene).

L'indagine esplorativa è stata mirata sulla presenza di sostanze organiche nei locali degli istituti scolastici prescelti. Tali sostanze potevano teoricamente presentarsi sia in fase gassosa, sia associate al particolato atmosferico. Per le prime, è stato disposto **l'uso di dispositivi di raccolta di tipo diffusionale**; l'attenzione è stata posta sugli idrocarburi aromatici, perché il benzene è tossico (cancerogeno, con un limite di concentrazione in aria ambiente fissato a 5,0 µg/m³ come valore medio annuale) e tutti i composti del gruppo emanano odori fastidiosi per l'uomo.

Per le specie meno volatili, presenti in forma particolata, i test sono stati limitati alle polveri di deposizione, prelevate da superfici piane orizzontali, rimandando alla eventuale campagna "standard" l'impiego di campionatori per aspirazione su filtro. Pur nella consapevolezza che la composizione delle polveri sospese (PM₁₀) sia quantitativamente diversa da quelle delle polveri sedimentabili e che non poteva essere stimata la velocità di deposizione di esse e dei loro contaminanti, tuttavia le misure sono state realizzate nella convinzione che valori abnormi di concentrazione e/o la presenza di sostanze nocive avrebbero finalizzato le indagini successive. **Relativamente alle polveri**, sono stati investigati: **a) gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA)**, in quanto alcuni di essi sono classificati come possibili o probabili cancerogeni e per il benzo[a]pirene (BaP), conclamato cancerogeno, la normativa vigente fissa un limite di concentrazione in aria ambiente di 1,0 ng/m³ come media annuale nella polvere sospesa (PM₁₀); **b) gli ftalati**, comunissimi plastificanti e contaminanti ubiquitari, noti quali interferenti endocrini.

4.2.2 Parametri Fisici

Le misure dei parametri riguardanti la concentrazione di CO₂, umidità relativa e temperatura sono state svolte utilizzando la strumentazione messa a disposizione di Legambiente da parte dell'azienda Studio SMA di Mogliano Veneto (TV) che ha fornito anche il necessario supporto tecnico. Verranno quindi presentati e commentati i dati misurati durante tutta una giornata in un'aula per ciascuno delle città in cui sono state effettuate le misurazioni. I commenti riportati sono stati inseriti nel comunicato stampa emesso nella corrispondente tappa del Trenoverde 2017 e pubblicizzato sia a livello locale che nazionale. Nonostante il clima particolarmente mite del marzo 2017 abbia favorito l'apertura volontaria delle finestre, le misure hanno permesso di evidenziare le tematiche relative alla necessità di un ricambio d'aria adeguato e l'efficacia

di una ventilazione pur manuale. Per evitare un'eventuale sottovalutazione del livello di criticità del problema della ventilazione nelle scuole, si è però deciso a titolo esemplificativo di aggiungere i risultati ottenuti nel monitoraggio di due aule di una scuola media a Treviso in periodo invernale pieno e quindi meno soggetto ad aperture spontanee delle finestre.

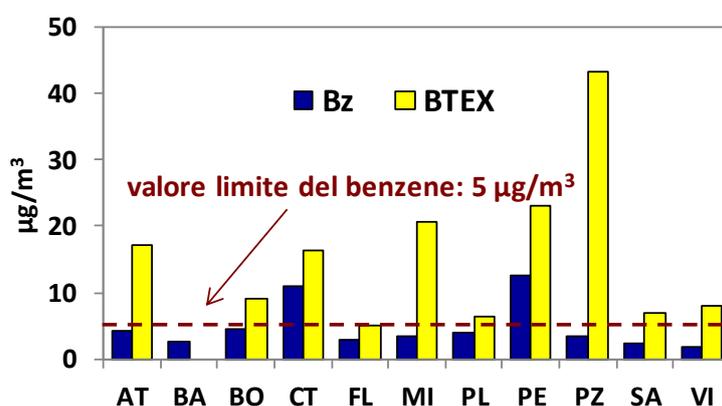
4.3 Risultati e discussione

4.3.1 Parametri chimici

4.3.1.1 Idrocarburi volatili

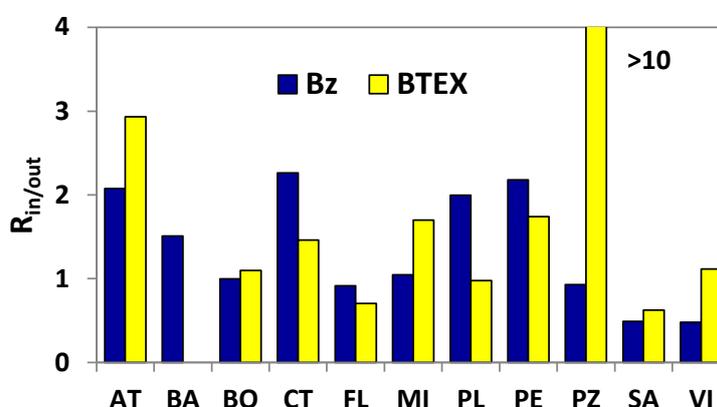
Le concentrazioni (medie indoor e outdoor) di benzene e idrocarburi aromatici totali registrate nelle undici città sono riportate in Figura 4. Nei locali interni delle scuole il benzene eccedeva il limite di legge a Catania (~ 10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e Pescara (12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); negli altri casi, la sua concentrazione era pari a $3.3 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pescara era l'unica città dove anche in aria esterna il benzene superava $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Quanto ai siti interni, ampie differenze di concentrazione si osservavano tra le mense e le aule; a Asti e Vicenza le concentrazioni erano decisamente superiori nelle mense, altrove erano grossomodo simili mentre a Milano erano maggiori nell'aula. Gli idrocarburi totali (BTEX), anch'essi assai variabili, erano pari a $12.6 \pm 6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con l'eccezione importante di Potenza, dove toccavano $43.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 4. Concentrazioni d'idrocarburi aromatici gassosi nelle 11 scuole esaminate



Simboli: Bz = benzene; BTEX = benzene + toluene + etilbenzene + m/p-xilene + p-xilene. AT = Asti, BA = Bari, BO = Bologna, CT = Catania, FL = Foligno, MI = Milano, PL = Paola, PE = Pescara, PZ = Potenza, SA = Salerno, VI = Vicenza

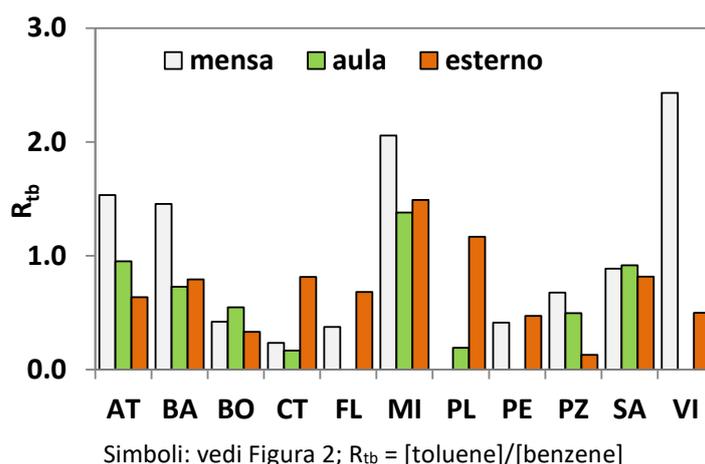
Figura 5. Rapporti tra le concentrazioni indoor e outdoor (idrocarburi aromatici)



Il confronto delle concentrazioni rivela che i siti interni erano altrettanto o più inquinati d'idrocarburi rispetto all'aria esterna (Figura 5); le uniche eccezioni importanti erano Salerno e Vicenza per il benzene ($R_{in/out} \sim 0.49$), Salerno per i BTEX ($R_{in/out} \sim 0.62$). Anche le concentrazioni relative dei BTEX mostravano ampie

variazioni da città a città e da sito a sito. Sono stati esaminati i rapporti di concentrazione toluene/benzene $R_{t/b}$ e (benzene+toluene)/(etilbenzene+xileni) $R_{bt/ex}$ (**Figura 6**); infatti, il primo è un indicatore del fumo di tabacco e/o dell'invecchiamento della particella d'aria (ossia, se l'emissione è fresca e c'è un buon ricambio d'aria o l'aria è stagnante), mentre il secondo evidenzia l'uso di solventi e vernici o di prodotti per la pulizia della casa. I valori medi di $R_{t/b}$ e $R_{bt/ex}$ per tutti i siti interni erano eguali a 0.88 ± 0.65 e 2.1 ± 1.3 , tuttavia si distinguevano per ciascun rapporto due sotto-gruppi di siti. Per $R_{t/b}$: ad Asti, Bari, Milano e Vicenza (mensa) era pari a 1.72 ± 0.42 , per gli altri interni era pari a 0.54 ± 0.27 ; per $R_{bt/ex}$, era uguale a 2.60 ± 1.02 a Asti (mensa), Bari, Bologna, Catania, Foligno, Paola, Pescara, Salerno e Vicenza, a 0.63 ± 0.52 a Asti (aula), Milano e Potenza. Contestualmente, nell'aria esterna delle undici città $R_{t/b}$ e $R_{bt/ex}$ erano uguali a 0.71 ± 0.38 e 2.52 ± 0.72 . I rapporti di concentrazione esaminati convergevano nell'indicare che ad Asti, Milano, Potenza e Vicenza la composizione di BTEX era modificata, rispetto all'aria esterna, per la presenza di fonti interne e che queste ultime erano diverse dal fumo di sigaretta.

Figura 6. Rapporti di concentrazione toluene/benzene (postazioni indoor e aria esterna)



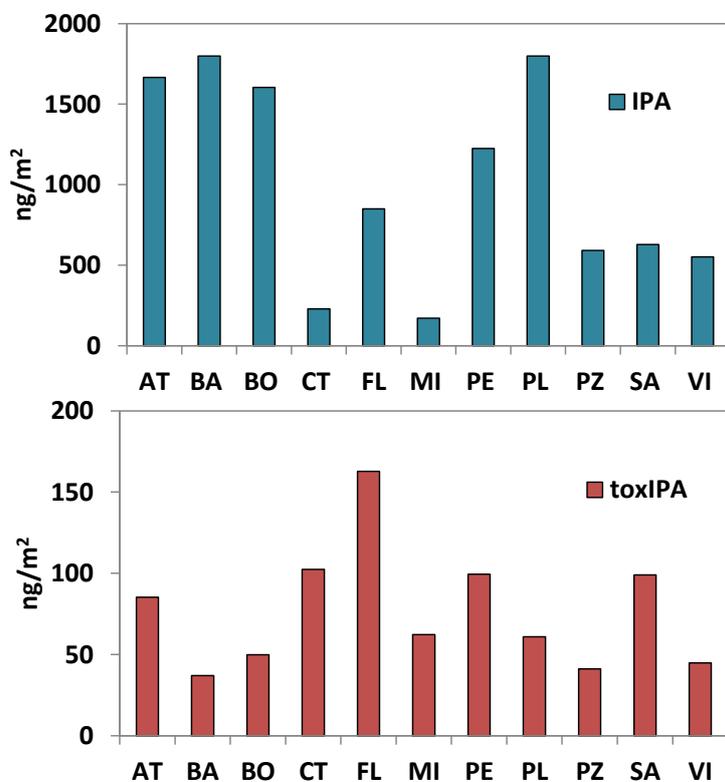
4.3.1.2 Polveri superficiali

La procedura applicata e l'esiguità delle polveri non hanno consentito di calcolare le quantità assolute di campione, né le rispettive concentrazioni per unità di superficie. Conseguentemente, le quantità di contaminanti registrate sono state riferite all'unità di superficie di raccolta. La **Figura 7** mostra le concentrazioni medie di IPA totali e di "IPA cancerogeni" (BaA, BbF, BkF, BjF, BaP, IP, DBahA: vedi legenda) nelle undici scuole.

Gli IPA totali erano compresi tra 170 e 1800 ng/m², con il minimo osservato a Milano e il massimo a Bari e Paola. Il gruppo era composto per oltre il 90% da IPA a 3 e 4 anelli (dal fenantrene al pirene), con le sole eccezioni di Catania (~40%) e Milano (~56%); al contrario indeno[1,2,3-cd]pirene, benzo[ghi]perilene e dibenz[a,h]antracene erano assenti nella maggioranza dei campioni. Tuttavia, gli IPA cancerogeni (< 40 ng/m²

a Bari) raggiungevano 163 ng/m² a Foligno. Il benzo[a]pirene era presente in piccole concentrazioni, non superando mai 23 ng/m².

Figura 7. Concentrazioni di IPA totali (sopra) e IPA cancerogeni toxIPA (sotto) registrate nelle undici città



Simboli: IPA = somma degli IPA esaminati; toxIPA = benz[a]antracene (BaA) + benzo[b]fluorantene (BbF) + benzo[j]fluorantene (BkF) + benzo[k]fluorantene (BkF) + benzo[a]pirene (BaP) + indeno[1,2,3-cd]pirene (IP) + dibenz[a,h]antracene (DBA).

Il confronto con altri dati di letteratura è alquanto limitato, poiché i numeri ivi riportati sono riferiti alla quantità di polvere esaminata e non alla superficie interessata. Tuttavia, prendendo a riferimento le concentrazioni superficiali di toxIPA registrate ad Ouargla (Algeria), Fiumicino e Roma (vedi dati in **Tabella 8**), i valori delle undici scuole sono medio-alti.

Tabella 8. Concentrazioni medie di tox-IPA (BaA+BbF+BjF+BkF+BaP+IP+DBaA) e di ftalati registrate a Ouargla (Algeria) e Roma (città e aeroporto)

città	sito	tox-IPA (ng/m ²)	ftalati (µg/m ²)
Ouargla (Algeria)	università	17.8±2.7	12.3±3.3
	ospedale	22.8±10.1	0.62±0.42
	scuolab	15.0±3.6	13.2±9.4
	appartamento	89±32	28±18
Roma (Italia)	appartamenti	20±14	63±45
	aeroporto Fiumicino	60±30	non valutati

Il computo dei rapporti di concentrazione FA/(FA+PY) e BaA/(CH+BaA), che la letteratura scientifica propone come diagnostici per l'identificazione delle sorgenti d'inquinamento, ha fornito i risultati riportati in **Tabella 9**). Il calcolo di IP/(IP+BPE) non è stato preso in considerazione perché i due composti erano spesso assenti.

Tabella 9. Rapporti di concentrazione tra IPA, calcolati per le polveri delle 11 scuole esaminate

Città	FA/(FA+PY)	BaA/(Ba+CH)	BaP/(BeP+BaP)
Asti	0.61	0.36	0.56
Bari	0.66	0.49	0.13
Bologna	0.71	0.40	0.37
Catania	0.58	0.10	0.24
Foligno	0.64	0.48	0.14
Milano	0.53	0.44	0.20
Pescara	0.68	0.48	0.42
Paola	0.66	0.48	0.17
Potenza	0.54	0.40	0.18
Salerno	0.69	0.25	0.25
Vicenza	0.72	0.46	0.12

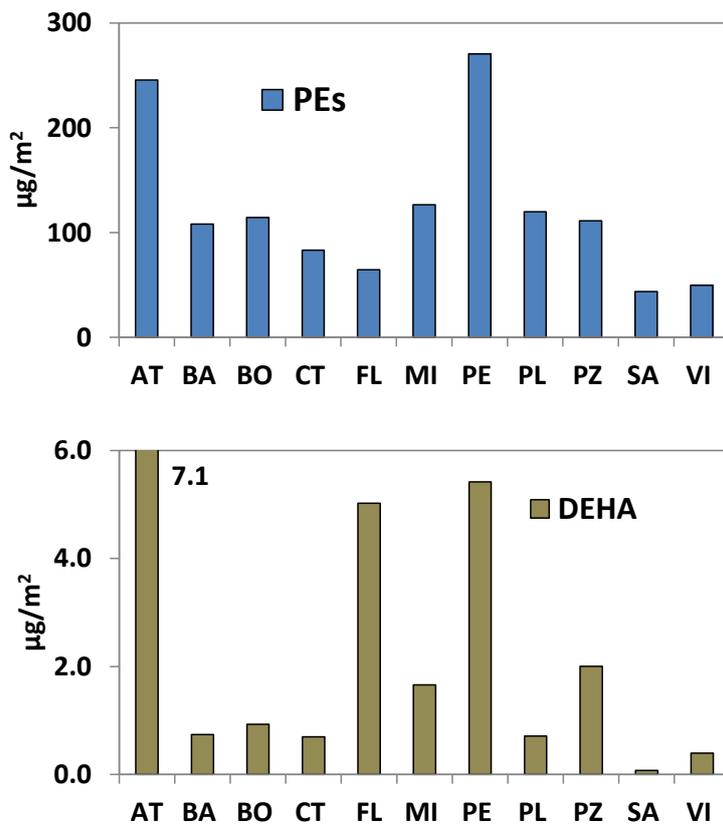
Simboli: FA/(FA+PY) = [fluorantene]/([fluorantene]+[pirene]); BaA/(Ba+CH) = [benz(a)antracene]/([benz(a)antracene]+[crisene]); BaP/(BaP+BeP) = [benzo(a)pirene]/([benzo(a)pirene]+[benzo(e)pirene])

Il rapporto FA/(FA+PY) era simile in tutti i siti (0.64 ± 0.07), mentre maggiore variabilità (0.40 ± 0.12) mostrava BaA/(Ba+CH). Il primo indicava come probabile sorgente il riscaldamento domestico a gasolio ($R = 0.64 \pm 0.03$), l'altro, la polvere di strada risospesa ($R = 0.35 \pm 0.10$).

Il rapporto BaP/(BeP+BaP), indice dell'intensità di degradazione del campione e del suo contenuto organico, risultava < 0.25 in tutte le scuole ad eccezione di Asti, Bologna e Pescara, dove si poteva ipotizzare un continuo ingresso o rilascio di IPA; viceversa altrove le polveri avevano subito un processo d'invecchiamento (decomposizione delle specie più reattive).

I campioni erano ricchi di ftalati (PEs), ma contenevano anche di-2-etilesil-adipato (vedi grafici in **Figura 8**). Gli ftalati si confermavano tra i principali componenti delle polveri superficiali, ma in concentrazioni variabili sia in valori assoluti ($44-270 \mu\text{g}/\text{m}^2$), sia in composizione percentuale. Infatti, in media i componenti più importanti erano diisobutilftalato (DiBuP) (47%), di-2-etilesilftalato (DEHP) e diisonilftalato (DiNoP). Tuttavia, ad Asti e Catania il primo rappresentava il 19% del totale, mentre il DiNoP raggiungeva rispettivamente il 49% e il 30%. Escludendo il dato di Foligno ($\sim 7.8\%$), il DEHA era pari a meno del 3% degli ftalati. La diversa composizione suggerisce che comunque i materiali e prodotti che rilasciano ftalati e DEHA siano diversi per le città indagate.

Figura 8. Concentrazioni medie di ftalati totali (sopra) e dietilesiladipato (sotto) nelle polveri delle scuole esaminate



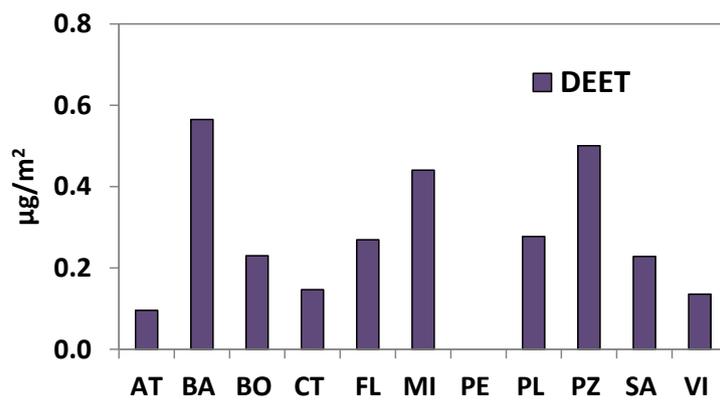
Simboli: PEs = ftalati (somma); DEHA = di-2-etilesiladipato

Confrontando le concentrazioni superficiali con quelle riscontrate ad Algeri e Roma (vedi **Tabella 8**), si può affermare che anche per gli ftalati i valori erano nella categoria medio-alta (PEs >40 µg/m²).

Poiché la quantità di contaminanti depositata sulle superfici dipende dalla frequenza di rimozione delle polveri mentre l'esposizione è funzione del carico superficiale sia per quanto attiene al contatto, sia per l'inalazione della polvere risospesa, incrementando gli interventi di pulizia si ridurrebbe l'impatto sanitario sia degli IPA, sia degli ftalati.

Infine, il DEET è stato positivamente identificato in tutte le scuole, eccetto a Pescara (problemi d'interferenze analitiche), in concentrazioni superficiali comprese tra ~0.1 e ~0.6 µg/m² (vedi dati in **Figura 9**). Il DEET è una sostanza relativamente instabile in aria e volatile, perciò il suo ritrovamento in concentrazioni dell'ordine della frazione di microgrammo suggerisce un uso continuato e importante del prodotto.

Figura 9. Carichi superficiali di N,N-dietil-m-toluammide nelle scuole delle undici città esaminate



Simboli: N,N-dietil-m-toluammide = DEET

4.3.1.3 Le rilevazioni di HOPES

Il sensore HOPES sviluppato dal DIAEE in collaborazione con il team DynamicMakers tiene conto in maniera qualitativa e quantitativa di una serie di sostanze inquinanti che possono essere presenti nell'atmosfera interna. In particolare, vengono analizzati:

Nome comune	Formula chimica	Limiti (ppm)	Tipologia
Toluene	C ₇ H ₈	100	REL-TWA
		150	REL-STEL
Alcool	C ₂ H ₆ O	30000	LEL
Acido Solfidrico	H ₂ S	10	REL-C
Ammoniaca	NH ₄	25	REL-TWA
		35	REL-STEL
Metano	CH ₄	44000	LEL
Isobutano	C ₄ H ₁₀	800	LEL
Propano	C ₃ H ₈	1000	LEL
Monossido di Carbonio	CO	35	REL-TWA
Metantiolo	CH ₄ S	0.5	REL-C
Trimetilammina	C ₃ H ₉ N	10	REL-TWA
		15	REL-STEL
Particolato	PM 10	40 µg/m ³	Medio/annuo
Particolato Fine	PM 2.5	25 µg/m ³	Medio/annuo

Per la costruzione dell'indice sono stati presi come riferimento il limite raccomandato di esposizione (REL) e i valori limiti di esposizione (TLV). Essi sono più bassi in quanto considerano esposizioni prolungate alle sostanze da parte del pubblico. Esiste inoltre il limite massimo di esposizione (PEL) che identifica il massimo livello di inquinante ammissibile come concentrazione per i luoghi pubblici. Questi limiti possono essere ulteriormente suddivisi in funzione del tempo di esposizione:

- 1) TWA (Media pesata sul tempo): considera un'esposizione di 8h/giorno per un totale di 40h/settimana (equivalenti ad una settimana lavorativa);
- 2) STEL (Limite di esposizione a breve termine): considera un'esposizione di 15 minuti che non può essere ripetuta per più di 4 volte al giorno e con almeno 60 minuti tra un'esposizione e l'altra;
- 3) C (Limite massimo): il limite che non può mai essere superato in nessun momento della giornata;

La suddivisione in queste categorie è espressa nel testo "Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices, TLVs and BEIs" con maggior dettaglio. Per le sostanze infiammabili si è invece scelto come limite 2/3 del valore di LEL (limite inferiore di infiammabilità) che indica il valore minimo di sostanza per cui si possono avere fiamme (o deflagrazioni) in aria. Il sensore considera i limiti più bassi tra quelli disponibili partendo dal presupposto che l'assunzione di sostanze, per quanto limitata nel tempo, comporta comunque un rischio dal punto di vista sanitario.

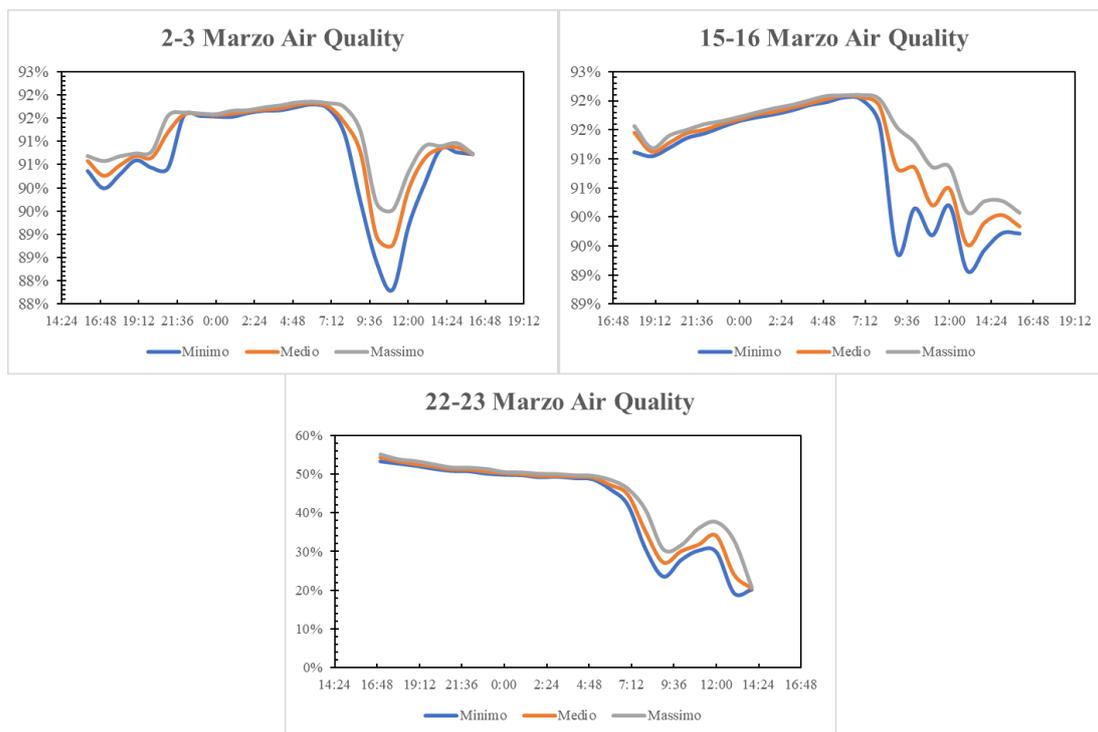
Inoltre, data la matrice di sensori presenti all'interno del dispositivo e la grossa quantità di sostanze analizzate si è diviso, per quanto possibile, l'analisi in sotto indici:

- **VOCs:** composti organici volatili, il sensore non è in grado di caratterizzare tutti i possibili VOCs, ma è comunque possibile correlare in via qualitativa le sostanze analizzate in modo da avere un indice di valutazione con buona approssimazione.
- **Particolato:** il sensore utilizzato nella campagna non montava il sensore ottico di particolato presente invece in altri modelli.
- **Cattivi odori:** Alcune sostanze inquinanti producono cattivi odori in atmosfera, dalla matrice di sensori è possibile ottenere alcune informazioni al riguardo.
- **Perdite di gas:** la matrice di sensori tiene conto di gas più comuni utilizzati per produrre fiamme all'interno delle abitazioni ed è in grado di avvisare qualora ci fossero concentrazioni anomale.

Questi indici sono definiti come una percentuale pesata di sostanze inquinanti rispetto alle soglie ammesse dalla normativa. I pesi utilizzati dipendono dai rapporti di concentrazione ammissibili in aria. In particolare, lo 0% indica assenza della fonte di inquinamento e il 100% il raggiungimento dei limiti consigliati. Questi indici possono andare anche al 100% identificando condizioni di inquinamento superiori a quelle massime consigliate. Dalle sostanze analizzate è inoltre possibile introdurre un indice di qualità dell'aria complessiva ottenuto tramite un apposito algoritmo di calcolo che è in grado di fornire un'indicazione chiara e semplice dello stato attuale dell'atmosfera respirata. L'indice è di carattere qualitativo e rappresenta una percentuale media di inquinanti in aria rispetto ai limiti consigliati dalla legge. L'indice parte da 100% per aria completamente pulita e può scendere anche a valori negativi in caso di condizioni di inquinamento particolarmente gravose. Qualora una delle sostanze superasse il limite di legge la qualità dell'aria sarebbe considerata pari a zero e il sensore avviserebbe in via sonora e luminosa del problema l'utente. Inoltre, il sistema fornisce i dati in tempo reale e gli storici dell'ultima settimana dal portale <https://www.dynamicmakers.com/vss>. Ulteriori dettagli possono essere trovati in bibliografia nell'articolo: "A cheap and third-age-friendly home device for monitoring indoor air quality" pubblicato da "International Journal of Environmental Science and Technology".

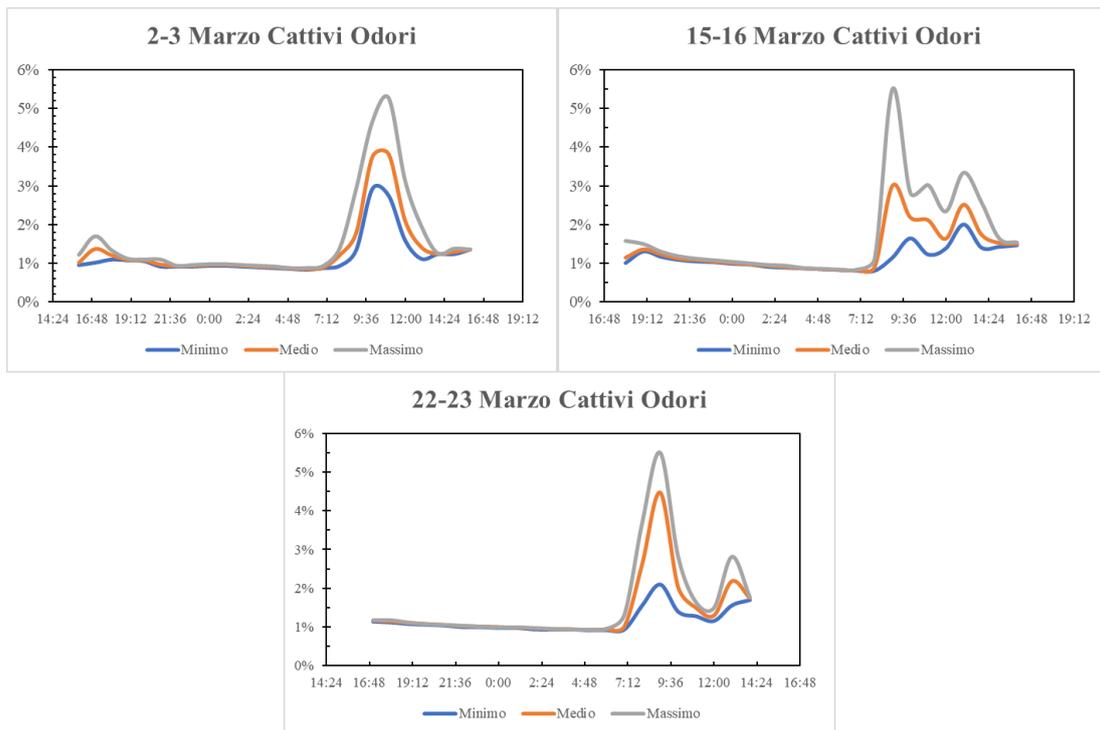
Nei seguenti grafici sono stati riportati gli andamenti dell'indice di qualità dell'aria durante le 3 diverse analisi:

Figura 10. Misura della qualità dell'aria effettuata tramite sensore HOPES



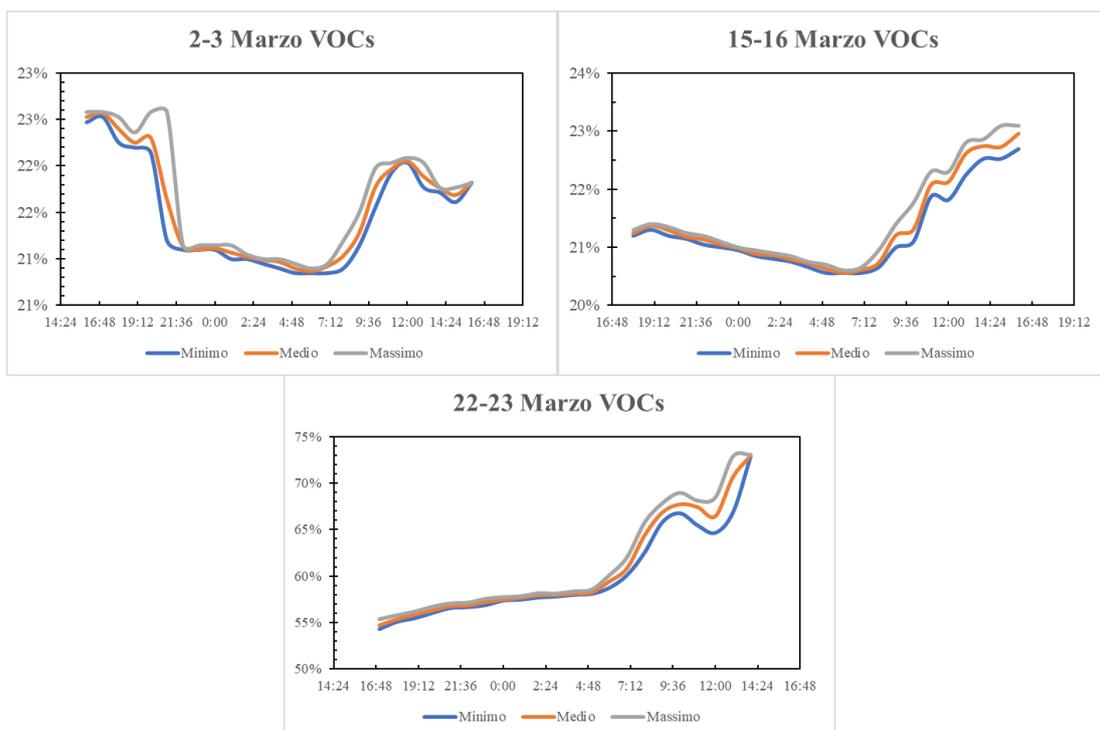
Come si può facilmente notare dai grafici, l'aria più inquinata si può riscontrare nel terzo ambiente, durante le misure svoltesi il 22-23 marzo a Vicenza. La cattiva qualità dell'aria riscontrata viene confermata anche dalle misure riportate dallo IUAV riguardo lo stesso ambiente durante la stessa giornata. Inoltre, si può notare un decremento della qualità dell'aria durante le giornate corrispondente alle fasce orarie di normale attività scolastica. Si notano inoltre fluttuazioni dei valori di riferimento dovute alla probabile apertura/chiusura delle finestre e/o delle porte. L'indice di qualità dell'aria globale, sebbene utile, non è in grado di fornire informazioni dettagliate sulle cause di inquinamento ambientale. Di seguito sono riportati quindi gli andamenti dei sotto-indici di Cattivi Odori, VOCs e Perdite di Gas, per l'ambiente considerato.

Figura 11. Sottoindice di qualità dell'aria: Cattivi Odori



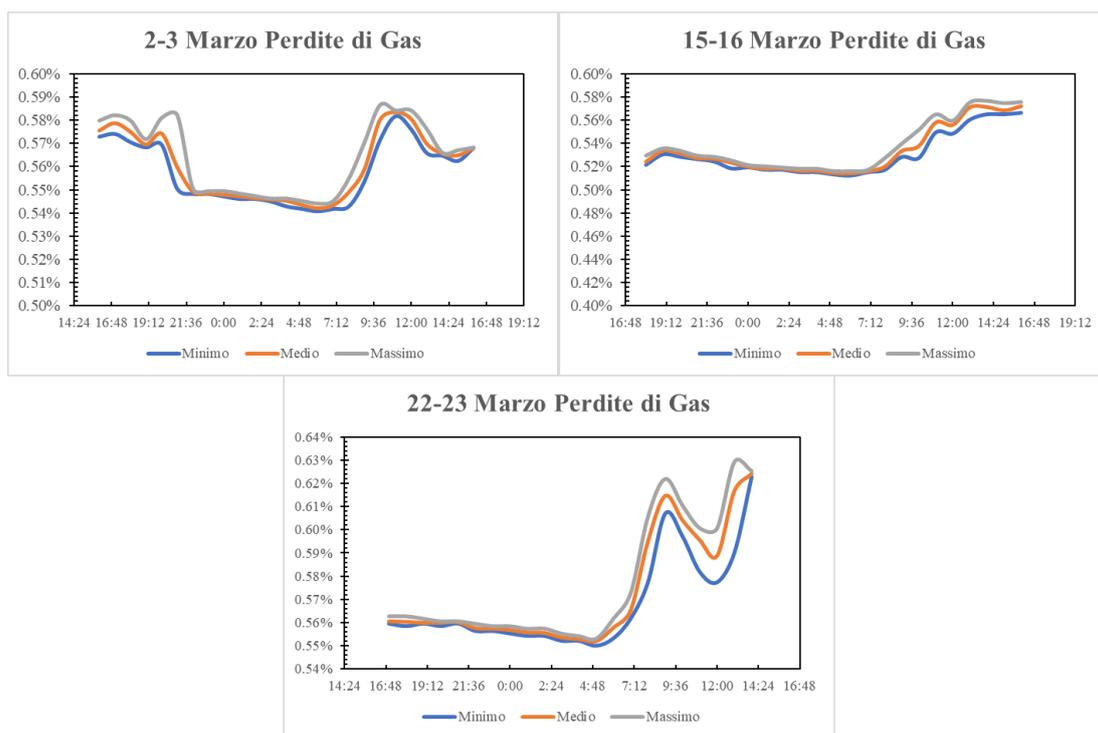
I valori riscontrati sono abbastanza nella norma, con un massimo del 6% rispetto al limite consigliato. [Dall'analisi non risulta una forte presenza di cattivi odori ma al massimo qualche leggero fastidio dovuto all'aria stagnante durante le mattine.

Figura 12. Sottoindice di qualità dell'aria: VOCs



Il contributo principale a livello di inquinamento dell'aria sembra essere fornito dai VOCs che, tra le varie fonti, possono essere prodotti da fenomeni di carattere biologico o contenuti nei comuni detergenti e disinfettanti. I valori si avvicinano a condizioni critiche il 22-23 marzo a Vicenza dove arrivano alla soglia del 75% rispetto al limite consigliato rientrando comunque entro i limiti ma con valori alti che potrebbero causare una condizione di discomfort unita ad una leggera difficoltà di concentrazione e affaticamento.

Figura 13. Sottoindice di qualità dell'aria: Perdite di Gas



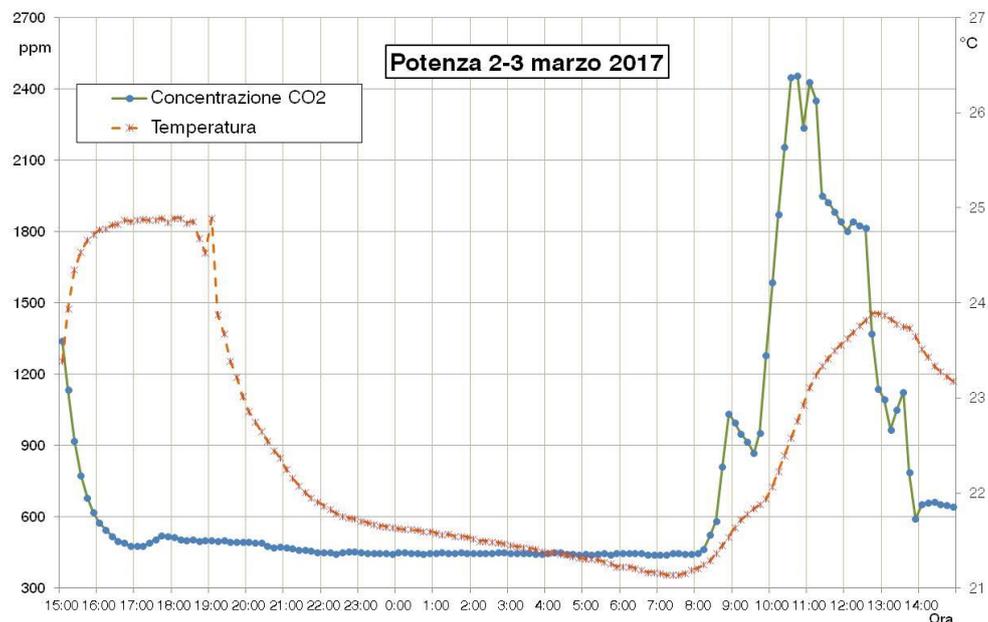
Per quanto riguarda eventuali concentrazioni anomale di gas combustibili possiamo affermare che le concentrazioni non superano lo 0.7% attestandosi vicino al fondo scala dello strumento e potendosi quindi definire nulle.

4.3.2 Parametri fisici

4.3.2.1 Misure a Potenza

Caratteristiche aula:

- Scuola elementare
- 22 alunni
- Orario lezioni:
8:30-13:30
- Aula 7x6,5 m h= 3 m
- 4 finestre 1,1x1,5
- Densità $(7 \times 6,5) / 23 = 1,98 \text{ m}^2/\text{p}$

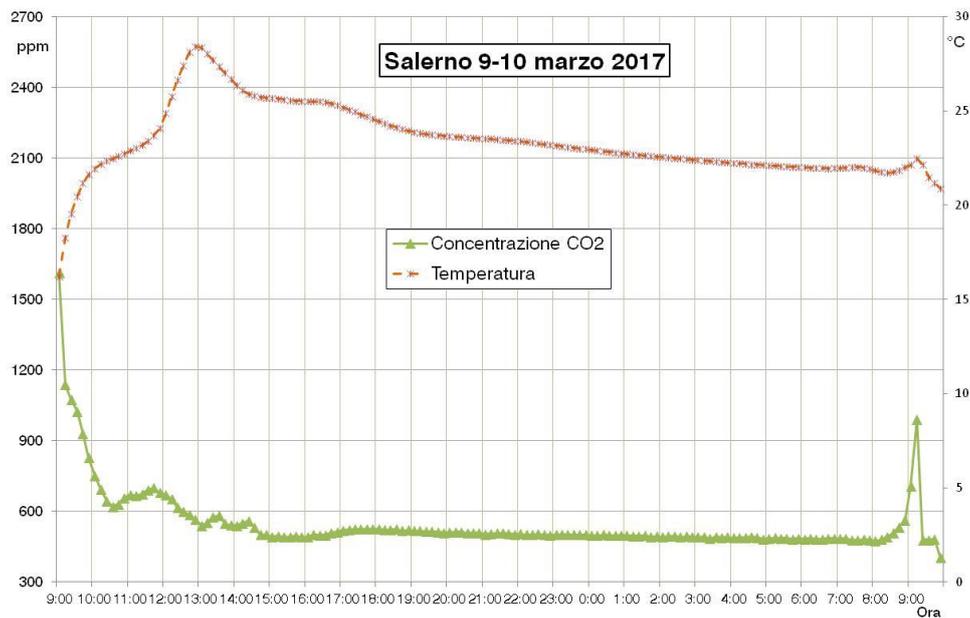


La concentrazione di CO₂ nell'aula cresce rapidamente a partire dall'inizio della lezione superando il limite di comfort previsto per le scuole alle 10,00. Il picco più alto viene raggiunto verso le 11 e si colloca nella parte inferiore della fascia di discomfort in cui si comincia a prevedere per gli alunni una riduzione della capacità di concentrazione. Successivamente si osserva un rapido calo della concentrazione di CO₂ causata probabilmente dall'intervallo e dall'apertura anche temporanea della porta e/o finestre. Alle 13 il valore misurato rientra pienamente nel campo del comfort. Complessivamente si giudica la condizione interna del tutto controllabile aumentando anche di poco la ventilazione naturale tramite le finestre.

4.3.2.2 Misure a Salerno

Caratteristiche aula:

- Scuola elementare
- 8 alunni
- Orario lezioni:
8:30-14:30
- Aula 5,5x4 m h= 3,5 m
- 2 finestre 2x3,2 m
- Densità $(5,5 \times 4) / 9 = 2,5 \text{ m}^2/\text{p}$

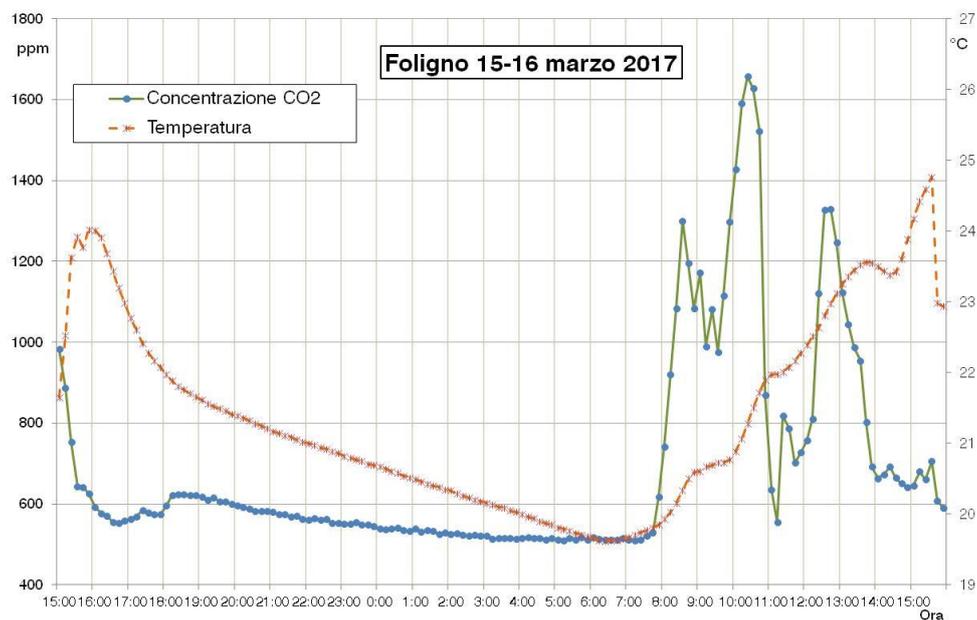


Dalle misure risulta una ventilazione efficace dell'aula durante la giornata realizzata grazie all'apertura delle finestre e certamente facilitata dal bel tempo. La concentrazione di CO₂ si colloca sempre nell'intervallo del pieno benessere con valori spesso solo immediatamente superiori alla concentrazione di CO₂ nell'ambiente esterno.

4.3.2.3 Misure a Foligno

Caratteristiche aula:

- Scuola materna
- 15 alunni
- Orario lezioni:
8:00-16:00
- Aula 7,5x6,6 m h=3 m
- Vetrate (porta+finestra) 4,9 m²
- Densità (7,5x6,6)/16= 3,09 m²/p

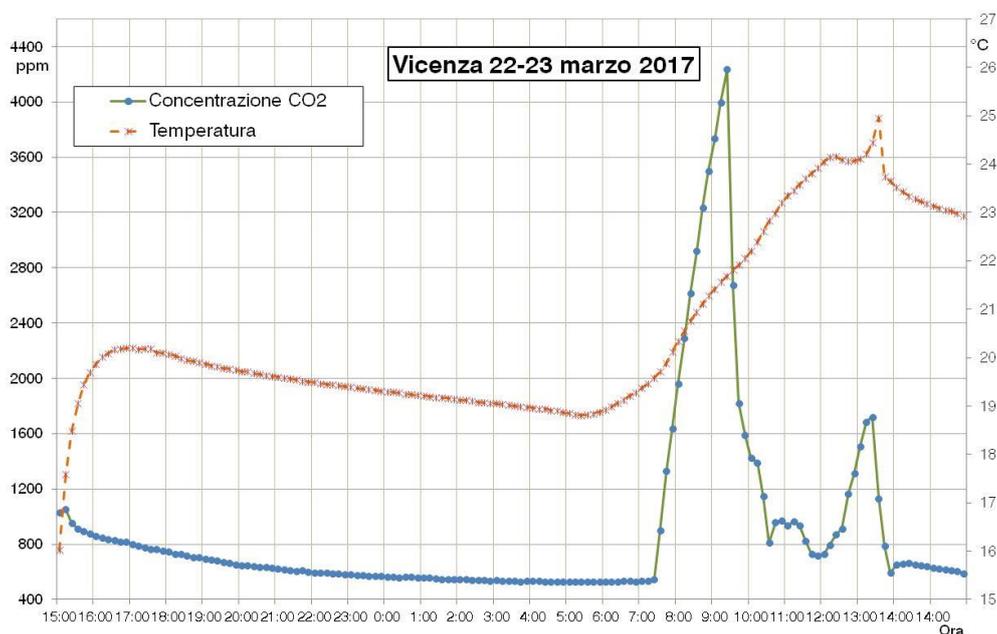


La misurazione ha riguardato l'aula di una scuola materna caratterizzata quindi da un basso carico fisiologico. Tuttavia si assiste ad un progressivo e quasi lineare aumento della concentrazione interna di CO₂ che da una condizione prossima a quella dell'ambiente esterno all'inizio arriva a superare il limite di comfort verso le 11. Un'apertura di finestra di circa 20 minuti è in grado di riportare il valore di CO₂ a quello del primo mattino. I successivi aumenti restano così nell'ambito dell'intervallo del comfort fino al termine della giornata. Le misure evidenziano quindi come un semplice intervento, quale una breve ventilazione naturale a metà giornata, abbia permesso di tenere sotto controllo il ricambio dell'aria viziata.

4.3.2.4 Misure a Vicenza

Caratteristiche aula:

- Scuola media
- 23 alunni
- Orario lezioni:
8:30-13:45
- Aula 52 m² h=3,5 m
- Finestre 16 m²
- Densità 52/24= 2,17 m²/p

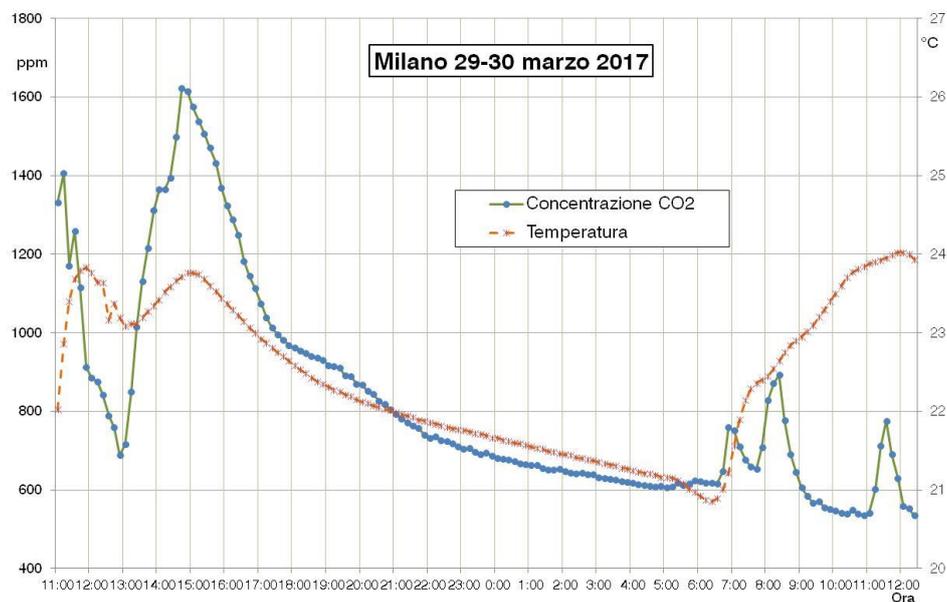


La concentrazione di CO₂ misurata raggiunge rapidamente il limite superiore del campo di comfort previsto per le scuole in circa 45 minuti dall'inizio della lezione, continuando poi a crescere fino ad un picco registrato alle 9.50 e di poco inferiore al valore di inizio del malessere fisiologico. Da questo momento viene attuata una ventilazione che riduce drasticamente la concentrazione, riportandola già verso le 10.30 nell'intervallo del comfort. Tale ventilazione riduce poi ulteriormente la CO₂ presente e viene interrotta verso le 12,30 come evidenziato dal successivo aumento registrato che riporta la concentrazione al limite superiore del comfort. Le misure hanno evidenziato l'assoluta necessità di una ventilazione seppur intermittente per garantire nell'aula condizioni di salubrit .

4.3.2.5 Misure a Milano

Caratteristiche aula:

- Scuola elementare
- 20 alunni
- Orario lezioni:
8:30-16:30
- Aula 40 m² h=3,5 m
- finestre 9 m²
- Densità 40/21= 1,90 m²/p



Nella mattinata le misure evidenziano la presenza di un'apertura continua delle finestre data una concentrazione di CO₂ molto ridotta e prossima a quella esterna. Apertura certamente favorita dalla bella giornata. Pur partendo da valori così bassi, nel pomeriggio la concentrazione della CO₂ cresce invece rapidamente arrivando a sfiorare il limite di comfort previsto dalla normativa nell'ultima ora di lezione evidentemente a causa di una ventilazione ridotta. I dati suggeriscono di porre attenzione al ricambio dell'aria nel periodo invernale più rigido quando meno spontanea è l'apertura delle finestre.

4.3.2.6 Misure a Treviso

Caratteristiche aule:

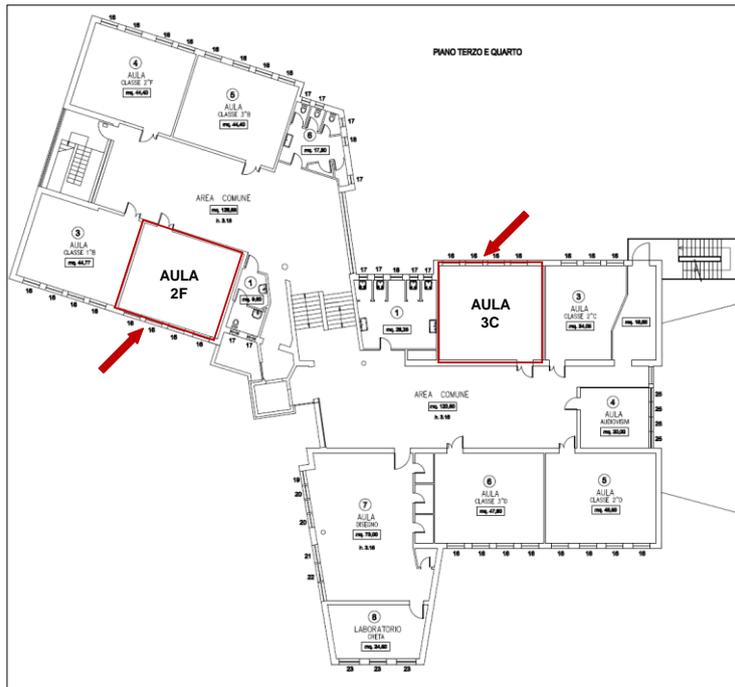
- Scuola media
- Sabato chiuso

Aula 3C

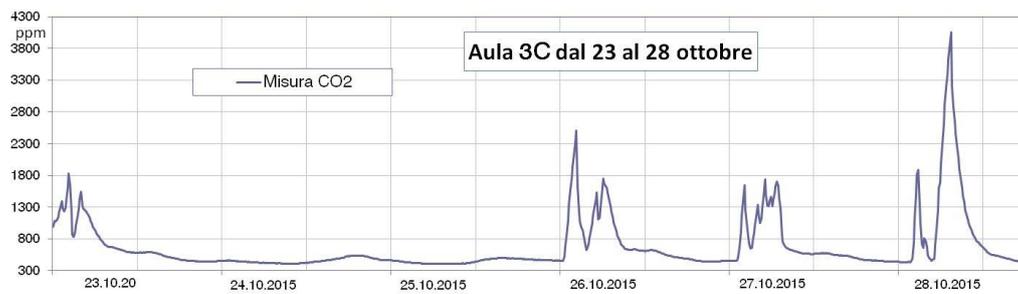
- 25 alunni
- Orario lezioni:
8:00-13:30
- Aula 7,5x6,5 m h=3,15 m
- finestre 7,04 m²
- Densità 48,8/21= 1,88 m²/p

Aula 2F

- 27 alunni
- Orario lezioni:
8:00-13:30
- Aula 7,6x6,5 m h=3,2 m
- finestre 7,04 m²
- Densità 49,4/28= 1,76 m²/p

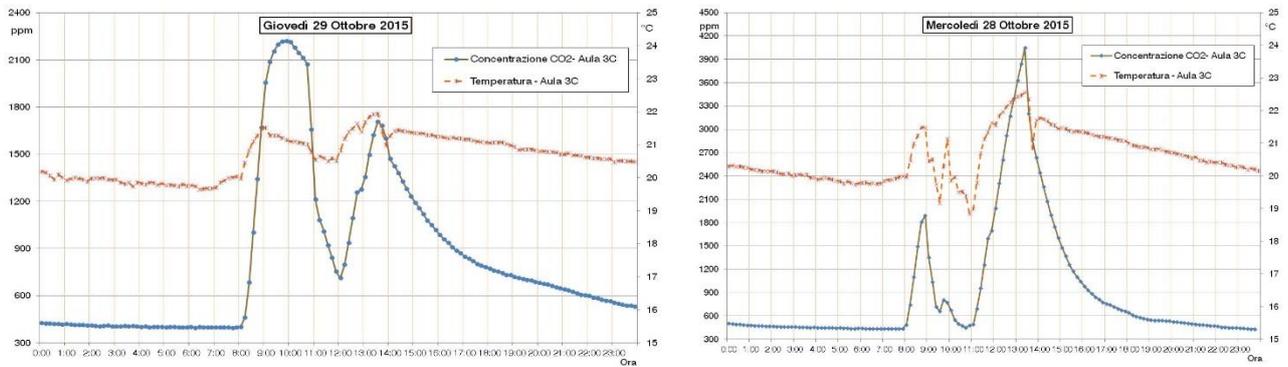


La forte variabilità dei risultati delle misure e le criticità rilevate in alcuni casi hanno suggerito in questo edificio un'analisi più approfondita. Per questo motivo sono successivamente riportati in dettaglio i valori misurati ogni 10 minuti della concentrazione e della temperatura interna correlati poi con interpolazione lineare. Ai fini dell'analisi della qualità dell'aria accanto alla concentrazione di anidride carbonica risulta:



infatti molto utile, nelle analisi giornaliere più dettagliate, riportare il contemporaneo andamento della temperatura. Si è infatti rilevata una temperatura interna superiore a quella esterna e spesso superiore ai

20°C specie nelle ore di attività data la presenza dei carichi interni legata al forte affollamento. In queste condizioni la registrazione di un repentino calo di temperatura è prova dell'apertura di una finestra o vasistas oppure anche a volte più semplicemente della porta verso l'area interna comune che si trova a temperatura inferiore.

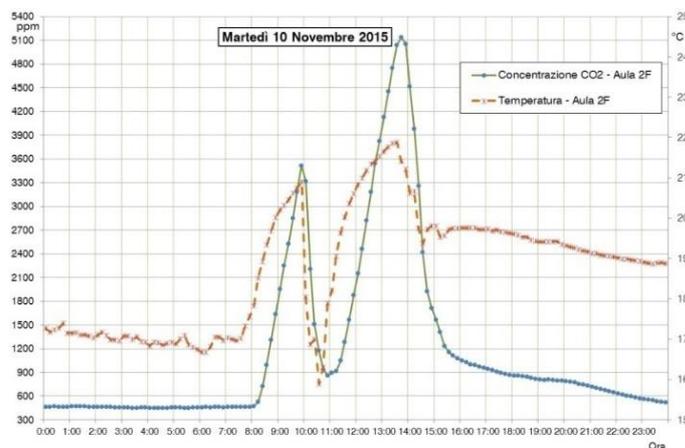
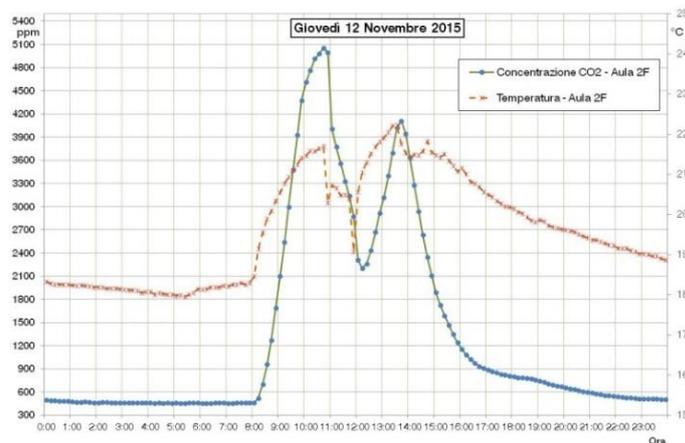


L'analisi riferita alle condizioni registrate nell'aula 3C evidenzia un rapido superamento fin dal primo mattino delle 1500 ppm ritenute come limite di accettabilità in un edificio scolastico da varie normative fra cui la già citata norma DIN che indica come accettabile, in termini di comfort legato alla diluizione degli odori corporali, una concentrazione tra 1000-1500 ppm. Dai dati misurati risulta però frequente anche il superamento delle 2000 ppm che, come si è visto in base agli studi di Pettenkorfer, aggiunge alla sensazione di aria viziata anche una condizione di malessere fisico caratterizzato da un calo delle prestazioni intellettuali fra cui la capacità cognitiva e di concentrazione mentale. Il rapido incremento della concentrazione di anidride carbonica nelle prime ore del mattino viene positivamente interrotto in modo drastico dall'intervallo fra le 10.45 e le 11.00. Nel breve volgere di 15 minuti l'uscita degli studenti con l'apertura della porta verso la zona interna e il più delle volte la contemporanea apertura di una finestra ha effetti efficacissimi nell'abbattere la concentrazione iniziale spesso fino ai livelli di accettabilità come si registra nell'ora seguente l'intervallo. La stessa apertura della porta interna e probabilmente a volte del serramento superiore a vasistas, come risulta evidenziato dal contemporaneo abbassamento della temperatura interna, comporta una riduzione della concentrazione immediatamente rilevabile.





Per quanto riguarda l'aula 2F restano valide le considerazioni fatte per l'aula 3C. In questo caso però si assiste ad un peggioramento della qualità dell'aria con un aumento della concentrazione di CO2 che arriva saltuariamente anche a sfiorare le 5000 ppm cioè quel limite massimo indicato per la salubrità dei posti di lavoro e oltre il quale possono cominciare ad insorgere anche problemi di respirazione nei soggetti più deboli. Si ritiene quindi che questo peggioramento sia dovuto ad una riduzione della ventilazione esterna conseguente l'avanzamento della stagione invernale dato che le misure nella 2F sono state fatte successivamente a quelle della 3C. Con il calo della temperatura esterna c'è certamente una minore disponibilità ad aprire i serramenti esterni.



4.3.2.7 Misure indoor del particolato nelle scuole

Le aule non sono normalmente caratterizzate da una produzione interna di particolato. Viceversa sono interessate dalla penetrazione di particolato prodotto esternamente specialmente in prossimità di aree urbane ad elevato traffico. Soprattutto con riferimento al PM_{10} e $PM_{2.5}$, tale particolato tende a depositarsi in quantità legate anche al livello di pulizia dei locali. La concentrazione di particolato aerodisperso finisce così per essere fortemente influenzato dall'attività umana presente che provoca una risospensione anche delle polveri sottili. I valori misurati nei locali scolastici possono quindi risultare decisamente più elevati di quelli esterni e vanno quindi tenuti sotto controllo. A titolo esemplificativo si riportano i risultati ottenuti in un'aula universitaria durante lo svolgimento di un corso nel 2017 con un numero di presenze pressoché costante nel periodo. Trattasi di un corso di architettura caratterizzato da lezioni ex cathedra in cui gli allievi ascoltano seduti e da revisioni delle esercitazioni svolte in gruppo in cui invece gli allievi si muovono liberamente tra i tavoli. Si osservi nel secondo caso (11 maggio) come la risospensione delle polveri provochi un deciso aumento della concentrazione di PM_{10} misurata all'interno dell'aula che invece non si verifica durante la lezione (20 aprile).

Figura 14. Andamento delle concentrazioni di PM_{10}

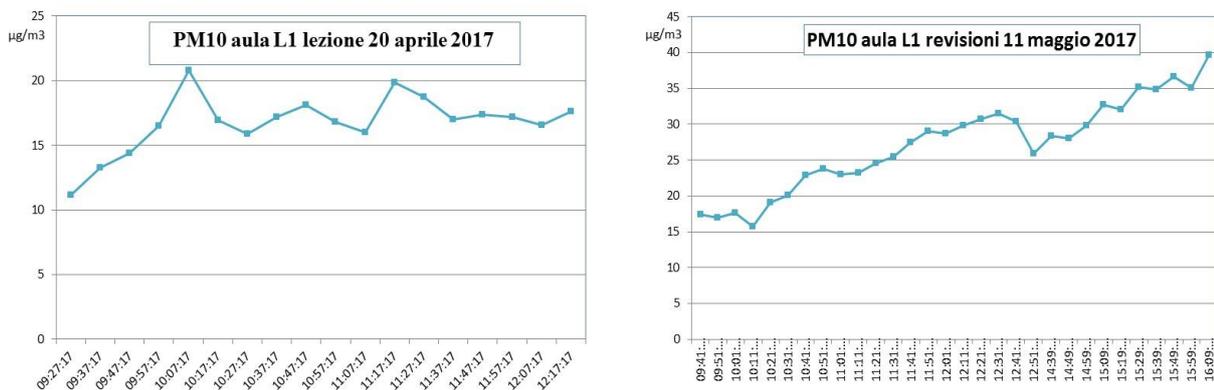
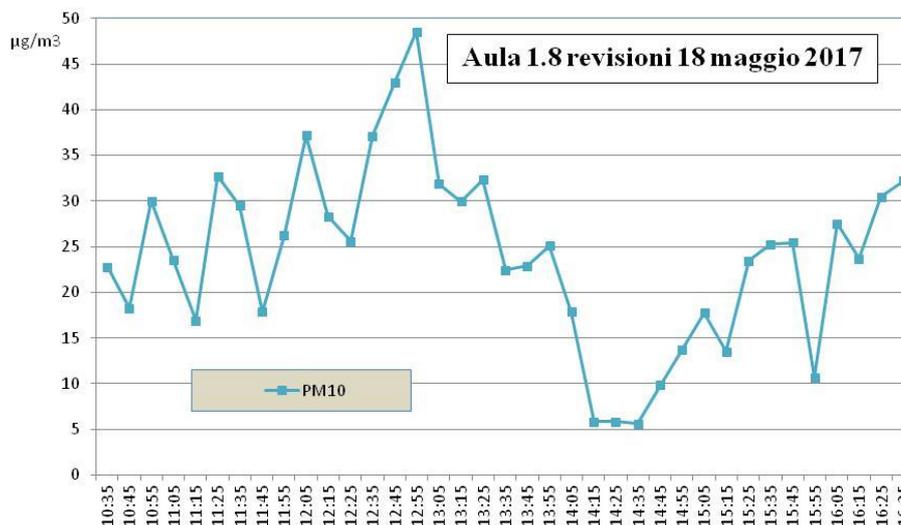


Figura 15. Andamento delle concentrazioni di PM_{10} in presenza di ventilazione naturale



In presenza di un ridotto inquinamento esterno certamente gli effetti della risospensione possono essere decisamente neutralizzati da una efficace ventilazione. A tale proposito si osservi l'andamento del PM₁₀ misurato durante un'intera giornata (18 maggio) dedicata a revisioni. L'apertura delle finestre nelle ore centrali determina una brusca riduzione del particolato aerodisperso all'interno dell'aula.

5 Simulazioni quale strumento per la progettazione consapevole

Seppur con notevole approssimazione è possibile tramite opportuni codici di calcolo modellizzare il comportamento dell'intero edificio per determinare le portate d'aria necessarie a garantire le opportune condizioni di benessere e qualità dell'aria indoor.

Ad esempio, è possibile utilizzare **codici di calcolo multi-zona**, che si basano sulla modellizzazione dell'edificio in analisi secondo un circuito elettrico formato da nodi, che rappresentano le zone in cui è stato suddiviso e da rami che invece rappresentano gli elementi attraverso i quali i nodi interagiscono tra loro e che corrispondono ai **dispositivi (porte, finestre, eventuali terminali di un impianto di ventilazione meccanica)** attraverso i quali può avvenire il passaggio dell'aria. Ogni zona corrisponde ad una porzione omogenea di fluido in termini di pressione, temperatura e concentrazione degli inquinanti. Benché questo tipo di modello non sia in grado di fornire informazioni locali come ad esempio la distribuzione delle velocità in una determinata regione oppure la distribuzione spaziale degli inquinanti all'interno della stessa zona la semplicità dell'algoritmo di calcolo fa sì che i tempi di simulazione e le risorse computazionali richieste risultino contenuti.

Nella simulazione multi-zona la portata d'aria che attraversa ogni *dispositivo* è univocamente determinata una volta che siano note le pressioni ai due capi dell'elemento e che questo sia stato caratterizzato in base ad un'opportuna relazione pressione-portata. Dato quindi un qualunque dispositivo di flusso che metta in comunicazione due zone differenti dell'edificio è possibile calcolare la differenza di pressione disponibile (ΔP) tramite un'opportuna relazione fisica che tiene in considerazione oltre le pressioni di riferimento delle due zone anche l'eventuale variazione di densità, l'altezza del dispositivo e l'eventuale contributo del vento (azioni dirette sulla facciata dell'edificio). Applicando le opportune relazioni di conservazione della massa è possibile quindi determinare la distribuzione delle pressioni all'interno dell'edificio **rendendo quindi disponibili le portate d'aria circolanti**.

La concentrazione di inquinanti all'interno di ciascuna zona è quindi ricavata in base ad un bilancio tra le portate entrati ed uscenti ed un'eventuale generazione interna. Il modello di calcolo è poi caratterizzato in base ad informazioni proprie dell'edificio in esame (metrature e volumi dei vari locali presenti, caratteristiche dell'involucro edilizio) e ad informazioni che definiscono il clima esterno (temperatura, velocità e direzione del vento). Le prime sono utilizzate per la suddivisione in zone, per l'individuazione dei vari *dispositivi* di flusso ed infine per la definizione delle relazioni pressione-portata associate ad ogni dispositivo tenendo cioè conto della diversa natura del flusso che avviene attraverso una porta aperta piuttosto che quella che ha luogo attraverso una fessurazione dell'involucro. Le seconde sono invece utilizzate per riprodurre l'interazione tra ambiente esterno ed edificio.

L'edificio in esame deve essere scomposto in una serie di zone collegate reciprocamente dai *dispositivi* attraverso i quali può avvenire lo scambio reciproco di massa. La modellazione dei flussi d'aria tra le varie zone e tra queste e l'ambiente esterno richiede inoltre la caratterizzazione dell'involucro edilizio in termini di permeabilità all'aria (proporzionale al tasso di infiltrazione). Attraverso l'involucro dell'edificio avvengono difatti scambi d'aria, volontari (aperture intenzionali di porte e finestre) e non (l'aria entra attraverso i punti di giunzione dei componenti dell'involucro, attraverso i fori per il passaggio dei cavi elettrici, delle condutture per l'acqua e il gas nonché i condotti dell'impianto e dei relativi terminali di ventilazione, attraverso eventuali fessurazioni o porosità dell'involucro edilizio), tra esterno e interno.

È possibile operare una simulazione preventiva al fine di poter dimensionare e progettare opportunamente i sistemi edilizi sia di nuova costruzione che relativamente a ristrutturazioni o adeguamenti impiantistici. L'analisi delle portate d'aria circolanti può essere accompagnata dall'analisi delle emissioni dei principali composti inquinanti dovute alla presenza di materiali da costruzione e di arredo o comunque a sorgenti interne definite in termini di quantità di inquinante emesso per unità di superficie considerata: $\mu\text{g}/\text{m}^2$.

I **modelli di emissione** sono basati su dati empirici derivanti dalla valutazione sperimentale dei tassi di emissione e dalle analisi statistiche di tali dati nonché sulla previsione di tali tassi di emissione dalle equazioni di trasferimento e conservazione della massa (modelli che tengono conto dell'evaporazione e della diffusività molecolare). Questi ultimi sono scientificamente più rigorosi perché possono essere ricavati dalla previsione del comportamento fisico del materiale oggetto di studio e possono essere utilizzati per stimare l'impatto sulla qualità dell'aria indoor e sulla valutazione dell'esposizione degli occupanti. I modelli statistici di decadimento invece sono di più semplice utilizzo e più pratici per tutte quelle applicazioni in cui è possibile conoscere o quantomeno stimare i fattori d'emissione e si conoscono i dati relativi al decadimento delle emissioni stesse. Oltre ad essere delle sorgenti primarie di emissione, i materiali da costruzione possono anche influenzare il trasporto e la rimozione tramite **assorbimento e desorbimento sulle superfici interne**.

La successiva emissione di COV adsorbiti sui materiali da costruzione può portare ad un aumento delle concentrazioni di COV nell'ambiente interno e quindi i materiali in grado di adsorbire e/o accumulare inquinanti possono influenzare l'IAQ lungo tutto il loro ciclo di vita.

Per questo è necessario che nella previsione delle condizioni di IAQ vengano considerati anche questi fenomeni di adsorbimento/desorbimento ossia che venga considerata la reattività dei materiali, in questo caso rispetto ai COV ma non solo, esistono difatti anche fenomeni di risospensione delle particelle solide quali il particolato.

Non meno importante è la considerazione che i modelli statistici utilizzati prevedono parametri multipli stimati tramite il "curve fitting" cioè tramite regressione non lineare solitamente mediante l'utilizzo di piccole

celle di prova (test chamber). I parametri potrebbero essere quindi non generalizzabili e potrebbero a volte non rappresentare quello che dovrebbero, inoltre risulta assai difficile validare il modello.

Il CNR IIA è attivo anche nell'ambito dello sviluppo di sensoristica avanzata ed integrata per gli ambienti residenziali, in particolare si può citare il progetto **GrIN BOX**, progetto finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca nell'ambito del programma Smart Cities and Communities e Social Innovation. Il progetto prevede di ottimizzare i sistemi di abbattimento degli inquinanti indoor combinandoli con sensoristica avanzata a basso costo. L'obiettivo generale del progetto è quello di realizzare un sistema a basso costo, bassi consumi, ingombri ridotti e bassa invasività in termini di estetica e rumore generato, per la gestione ed il controllo della qualità dell'aria indoor. Il sistema prevede una interfaccia user-friendly e gestibile da remoto tramite web e smartphone. Lo scopo è quello di poter fornire agli utenti privati e pubblici un efficace strumento adattabile alle varie realtà (abitazioni, luoghi di lavoro non industriali, luoghi pubblici ivi compresi gli impianti sportivi indoor, musei ecc.). La versatilità del progetto sarà garantita attraverso lo sviluppo di 4 linee progettuali distinte: **GrIN-BOX per il monitoraggio**, **GrIN-BOX per l'abbattimento**, **GrINtegrated** e **GrIN-CERTIFIED**.

GrIN-BOX per il monitoraggio permetterà di analizzare real-time i parametri microclimatici e di inquinamento per gli ambienti confinati; il sistema (possibilmente robotizzato e quindi mobile all'interno degli ambienti) sarà dotato anche di una webcam per la videosorveglianza.

GrIN-BOX per l'abbattimento permetterà di rimuovere i principali contaminanti indoor e mantenere i parametri microclimatici ottimali.

GrINtegrated sarà costituito da una centralina integrata nei moderni sistemi di home/building automation che, tramite la valutazione delle concentrazioni di alcuni inquinanti, consentirà la regolazione degli impianti di ventilazione/climatizzazione, tenendo anche in considerazione i fattori fisici e le condizioni dell'aria esterna, al fine di garantire (oltre all'efficienza energetica) la qualità dell'aria indoor.

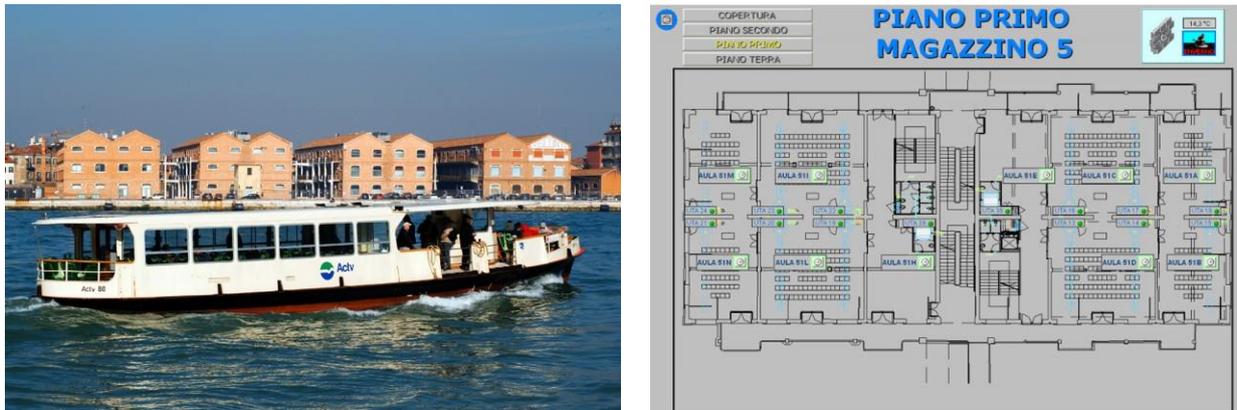
GrIN-CERTIFIED permetterà la certificazione degli ambienti tramite la definizione di norme tecniche (linee guida) per la certificazione della qualità dell'aria indoor in diversi ambiti (di lavoro, residenziali, sanitari, di elevata affluenza, trasporti e museali).

L'Unità di ricerca Energia e Città dell'Università Iuav di Venezia ha condotto una valutazione del risparmio energetico conseguente alle strategie di controllo della qualità dell'aria indoor relativamente ad un caso studio. Partendo dal presupposto che il trattamento termoigrometrico dell'aria di rinnovo negli edifici richiede una quota rilevante della domanda totale di energia dei sistemi di climatizzazione, soprattutto quando la domanda di ventilazione è significativa, una corretta strategia di risparmio energetico dovrebbe concentrarsi quindi sull'utilizzo di tecniche idonee per ridurre questo consumo. Come dimostrato dalle moderne teorie sul comfort, valori meno rigidi possono essere accettati per i set point dell'umidità interna senza compromettere le condizioni di benessere. Inoltre, la ventilazione meccanica controllata in base

all'effettiva domanda (Demand Controlled Ventilation o DCV) offre l'opportunità di ridurre la richiesta energetica.

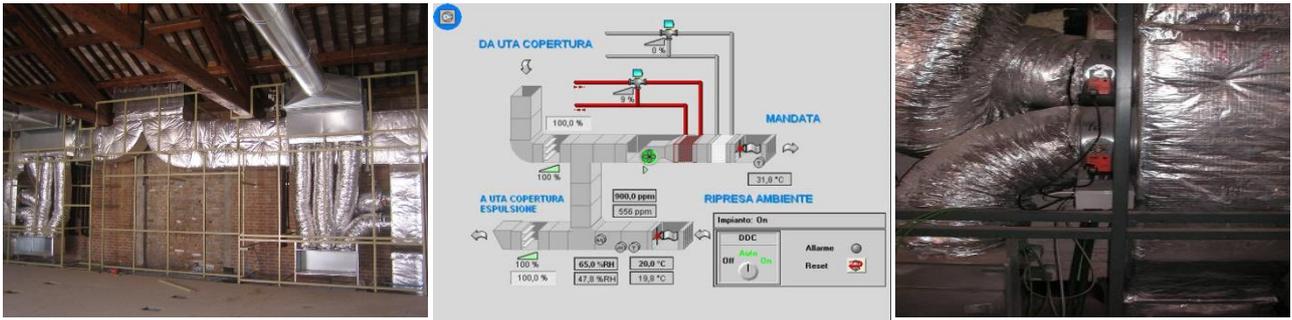
Il caso studio qui riportato tratta di un edificio storico in Venezia recentemente trasformato in una moderna struttura universitaria. Il nuovo sistema di gestione è anche in grado di controllare le prestazioni di tutti gli impianti registrando i dati monitorati. In questo modo è stato possibile svolgere un'accurata indagine del contributo di una gestione intelligente basata sulla DCV e sull'ottimizzazione dei set point dell'umidità relativa interna. L'analisi delle prestazioni ha evidenziato l'effettivo conseguimento di notevoli risparmi energetici.

Figura 16. Magazzini di S. Basilio (a sinistra) e schermata di controllo con le aule (a destra)



L'edificio fa parte di un gruppo di vecchi magazzini doganali nella zona portuale di S. Basilio in Venezia recentemente ristrutturati. Gli edifici presentano una struttura modulare che ha permesso di realizzare aule con uno, due e quattro moduli per ospitare rispettivamente 45, 90 e 180 studenti. Ciascun modulo ha una superficie in pianta di 57 m² (6,4x8,9 m) ed è munito di un condizionatore (UTA) interno per la climatizzazione cui arriva l'aria di rinnovo già trattata dalle centrali installate sulla copertura. L'immissione dell'aria di rinnovo in ciascun condizionatore è modulata mediante serrande in base alla concentrazione di CO₂ rilevata sulla ripresa di ciascuna macchina. In questo modo il sistema di gestione centrale è in grado di controllare e regolare individualmente ciascun condizionatore, assicurando quindi una regolazione capillare e indipendente di temperatura interna, umidità e quota di ventilazione di ciascun modulo interno. Su precisa richiesta della committenza di assicurare un'elevata qualità dell'aria, il set point per il controllo della concentrazione di CO₂ è stato fissato a 850 ppm con un differenziale di 100 ppm.

Figura 17. Condizionatori interni (UTA) senza mascheramento finale (a), schermata di controllo di un UTA (b) e relative serrande motorizzate (c)



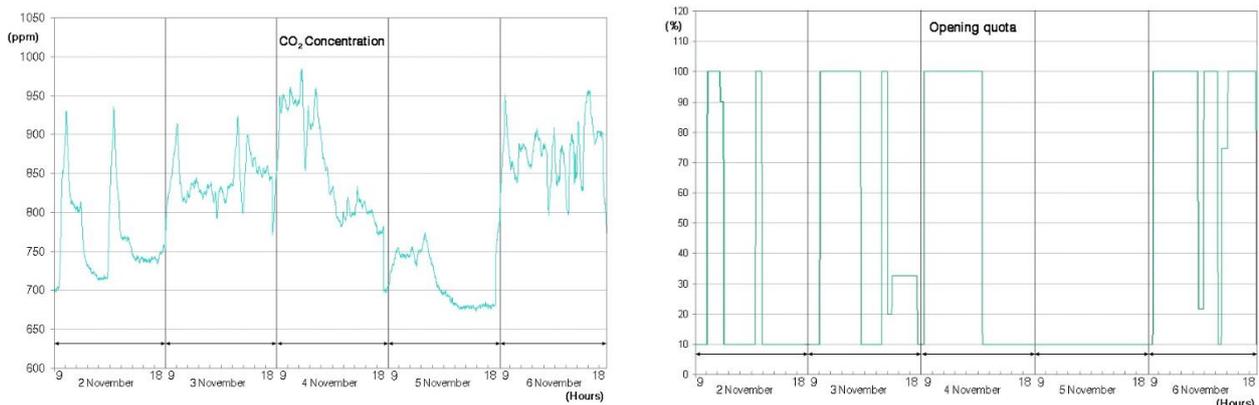
a)

b)

c)

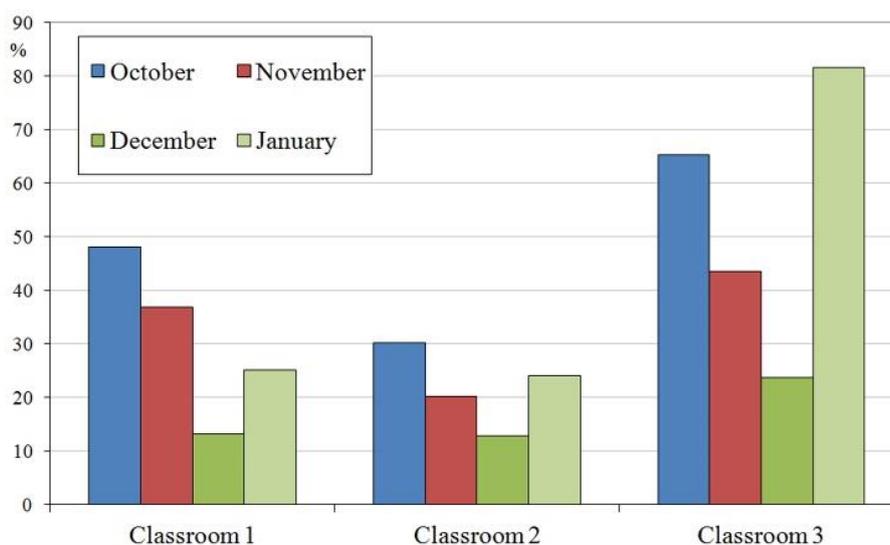
In altri termini le serrande dell'aria di rinnovo aprono a 900 ppm e chiudono a 800 ppm, un'apertura minima pari al 10% viene comunque sempre mantenuta per assicurare un minimo ricambio d'aria durante le ore di attività. In questo modo si è assicurata una concentrazione sempre inferiore a 1000 ppm (valore di riferimento ASHRAE) nonostante l'elevata oscillazione che caratterizza il controllo di questo parametro rispetto ad altri (temperatura e umidità) e che è dovuto alle elevate inerzie tipiche della risposta degli ambienti, dei regolatori preposti e delle serrande motorizzate.

Figura 18. Livelli di concentrazione della CO₂ (ppm) e corrispondenti quote di apertura (%) delle serrande di ventilazione in un'aula durante le ore di funzionamento in una settimana tipica



A tale proposito si osservi nella figura l'estrema variabilità degli andamenti misurati della concentrazione di CO₂ e dei livelli di apertura delle serrande relativamente ad un condizionatore presente in un'aula. Ne consegue la difficoltà di programmare preventivamente le portate di ventilazione e il vantaggio legato alla possibilità di modulare la portata in tempo reale in base al controllo dell'affollamento effettivo permesso dai sensori di CO₂.

Figura 19. Quote medie (%) di apertura delle serrande motorizzate in tre aule



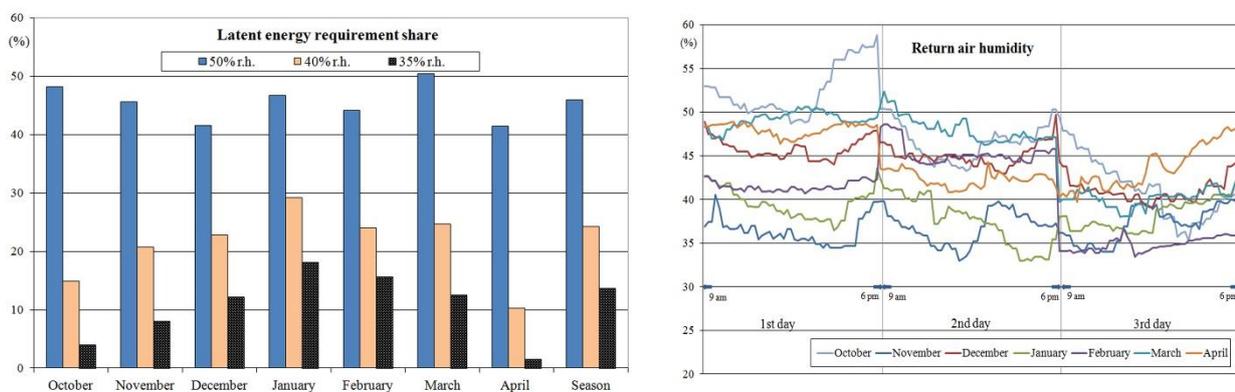
Nella figura successiva si riportano le medie mensili delle quote di apertura delle serrande motorizzate in tre aule nei vari mesi. Ad aperture medie così ridotte rispetto al 100% corrispondono forti riduzioni delle portate d'aria di ventilazione. Si notino anche le differenze significative tra i valori riportati che si riferiscono non solo alla stessa aula in periodi diversi, ma anche alle tre aule dello stesso mese. Si conferma quindi l'efficacia di un controllo basato su una misura continua dell'affollamento effettivo in ciascuna aula. La modulazione della portata permette di ridurre il consumo energetico collegato al trattamento dell'aria immessa e il consumo elettrico dei ventilatori. I dati di monitoraggio hanno permesso un calcolo molto preciso del risparmio annuale così ottenuto rispetto alla soluzione tradizionale di portata di ventilazione meccanica costante durante le ore di funzionamento. Il confronto mette in evidenza una riduzione del 26% della quantità di aria trattata, con un risparmio di energia termica del 31% e del 40% nell'assorbimento elettrico dei ventilatori. Si tratta quindi di risparmi energetici molto rilevanti.

Come insegna l'odierna scienza del benessere è possibile assicurare condizioni di comfort anche per valori dell'umidità relativa interna diversi dal tradizionale valore di progetto pari a 50% normalmente imposto nei capitolati. Per valutare questa possibilità è possibile fare riferimento all'indice PMV (Predicted Mean Vote) oggi accettato dalla norma internazionale come indice di comfort insieme all'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) che è una funzione del PMV. Il PMV si basa sull'applicazione di equazioni di equilibrio del calore al corpo umano e prevede il voto medio che verrebbe valutato da un gruppo di persone in condizioni specifiche all'interno di una scala tra -3 (molto freddo) e +3 (molto caldo). La zona comfort è nell'intervallo tra -0,5 e +0,5, corrispondente ai valori PPD inferiori al 10%. Il PMV è calcolato con una semplice procedura che in questo caso presuppone parametri tipici per una scuola: una temperatura radiante pari alla temperatura dell'aria, un tasso metabolico di 1,2 met e una velocità media dell'aria di 0,1 m/s. In inverno una temperatura dell'aria di 20°C, una resistenza all'abbigliamento di 1,0 clo. In estate una temperatura dell'aria di 26°C e 0,5 clo. In caso estivo si calcola una condizione accettabile fino ad un'umidità relativa del 65% (PMV

= 0,48, PPD = 9,8%). In inverno possiamo scendere al 35% (PMV = -0,42, PPD = 8,8%). Di conseguenza, questi due punti di riferimento per l'umidità relativa sono stati utilizzati durante il periodo di monitoraggio e i loro effetti sono stati studiati e confrontati con gli effetti di set point differenti. I dati di monitoraggio hanno fornito la richiesta energetica latente e totale per le centrali di trattamento in caso di set point al 35%, cioè con l'umidificatore che interviene quando l'umidità relativa misurata sul condotto di ritorno è inferiore al 35% mentre i fabbisogni energetici nel caso virtuale di set point al 40% e al 50% sono stati calcolati ogni dieci minuti considerando l'intervento dell'umidificatore quando l'umidità risulta inferiore al 40% e al 50% rispettivamente.

La figura successiva mostra nel riquadro a) come si riduce la quota (%) di fabbisogno energetico per l'umidificazione (carico latente) nei tre casi per ogni mese e la stagione invernale nel suo complesso. Queste quote ridotte si riferiscono alla domanda di calore totale della centrale di trattamento che serve l'ala Sud dell'edificio e dimostrano che un risparmio energetico elevato sulla domanda di energia latente può essere raggiunto riducendo appunto il valore di set point dell'umidità nel periodo invernale.

Figura 20. Quote di fabbisogno energetico (%) per vari set point di umidità in inverno e andamento dell'umidità (%) dell'aria ripresa dalle aule durante tre giorni nei mesi invernali



a)

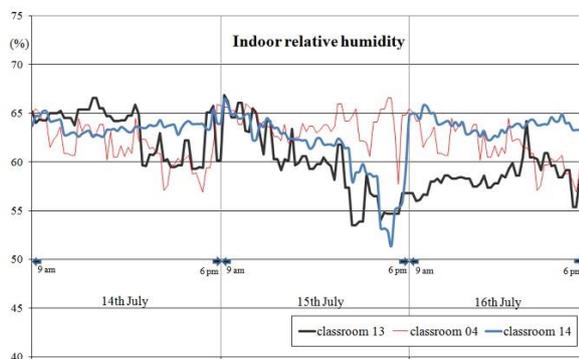
b)

Nel riquadro b) della stessa figura sono riportati gli andamenti dell'umidità dell'aria di ritorno alla centrale di trattamento relativo all'ala Sud dell'edificio durante le ore di funzionamento (9.00 - 18.00) di tre giorni tipici per ogni mese invernale. Il set point reale per l'umidità relativa è al 35%. Tuttavia, l'umidità è spesso sopra questo valore a causa dell'occupazione e dell'umidità esterna. Con il set point pari al 35%, l'intervento dell'umidificazione è quindi raro.

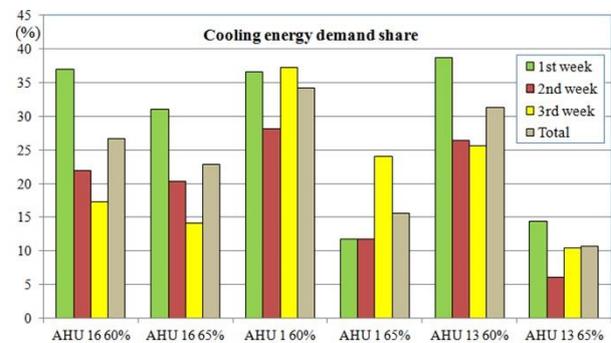
Per quanto riguarda il funzionamento estivo, la figura successiva mostra i profili dell'umidità in tre aule durante le ore di funzionamento di tre giorni scelti entro le tre settimane dal 29 giugno al 19 luglio 2015. In

questo periodo l'occupazione è massima a causa dello svolgimento dei frequentatissimi laboratori di design estivo. La deumidificazione interna agisce con il set point pari al 65%, ma l'umidità è spesso inferiore a questo valore a causa della pre-deumidificazione che si svolge nelle centrali di trattamento sul tetto. Di conseguenza, set point superiori al 50% consentono una riduzione significativa della domanda di raffreddamento delle UTA interne, come quantificato nel riquadro b) della stessa figura per tre UTA ognuna installata in una delle aule analizzate. In dettaglio questa figura mostra le quote ridotte della domanda di raffreddamento per ogni settimana e la quota totale in questo periodo con set point pari rispettivamente al 60% e al 65%, rispetto alla domanda di raffreddamento nel caso di set point pari al 50%.

Figura 21. Umidità (%) in tre aule durante tre giorni estivi e quote (%) della domanda di raffreddamento di tre UTA in estate con set point 60% e 65%



a)



b)

Il **DIAEE** (Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica) di Sapienza in collaborazione con il team DynamicMakers ha svolto durante alla campagna Trenoverde 2017 una serie di misure con un prototipo di sensore integrato di qualità dell'aria chiamato HOPES. I dati raccolti sono disponibili in tempo reale e su mappa all'indirizzo: <https://www.dynamicmakers.com/vss>.

L'intento delle presenti linee guida è quello di porre l'attenzione sulla qualità dell'aria indoor e fornire un valido strumento per la riduzione all'interno dell'edificio dei contaminanti che risultano irritanti e/o nocivi per la salute degli occupanti o che ne riducono il comfort ed il benessere abitativo.

Umidità e muffa

Sia edifici pubblici che privati sono interessati, visto che la proliferazione di umidità e muffa è un rischio presente ovunque. L'umidità persistente, e la crescita batterica su superfici e strutture interne degli edifici, deve essere evitata o minimizzata, al fine di ridurre i rischi per la salute. Gli indicatori di umidità e proliferazione batterica includono la presenza di condensa sulle superfici, muffe visibili, odore di muffa percepibile, ed eventuali infiltrazioni d'acqua passate o presenti. Sono necessarie regolari ispezioni e misurazioni per confermare l'eventuale presenza di questi elementi. Edifici ben progettati, ben costruiti e ben conservati, sono fondamentali per la prevenzione della formazione di umidità. Risulta necessario un rigido controllo sulla ventilazione e sulle fonti di umidità e di vapore. La ventilazione deve essere distribuita uniformemente negli ambienti, e devono essere evitate le aree stagnanti. Inoltre una serie di accorgimenti nella costruzione di un edificio possono ridurre sensibilmente il rischio di formazione di umidità in eccesso negli ambienti interni. Queste misure comprendono la costruzione di tetti spioventi con canali di scorrimento per l'acqua, tubi di areazione per ambienti come bagni e cucine, attici ventilati e protezioni contro il gelo.

VOC: Composti Organici Volatili e Formaldeide

Per migliorare la qualità dell'aria è raccomandata un'accurata scelta dei materiali da costruzione, di arredo e dei prodotti utilizzati per la pulizia cercando di utilizzare prodotti certificati, che rispettino il requisito igiene salute e ambiente.

Ventilazione

Per tenere sotto controllo le concentrazioni di agenti inquinanti è necessario **ventilare** adeguatamente i locali quando vi sono possibili sorgenti certe di VOC (abiti trattati recentemente in lavanderia, fumo di sigaretta, stampanti, fotocopiatrici) e durante e subito dopo la posa di materiali da costruzione e arredi (mobili, moquette, rivestimenti).

Impianti meccanici

Effettuare il **regolare controllo e pulizia** da parte di personale esperto dei sistemi di condizionamento (canne fumarie, camini, canali condensa, filtri). Eventuali sistemi di ventilazione meccanica devono essere dotati di **idonei filtri**, regolarmente controllati.

Utilizzo di materiali

Ridurre al minimo l'uso di materiali contenenti composti organici volatili sia relativamente alle abitudini degli occupanti (cosmetici, deodoranti, prodotti di pulizia ...) che relativamente ai materiali per l'edilizia (colle, adesivi, solventi e vernici utilizzando quando possibile, vernici a base di acqua). Utilizzare il meno possibile le colle per fissare la moquette al pavimento, eventualmente prendendo in considerazione soluzioni alternative. Eliminare o limitare, dove possibile, l'impiego di materiali contenenti formaldeide (tappezzerie, moquette, mobili in truciolato).

NOTA sulle concentrazioni

Elevate concentrazioni di VOC sono riscontrabili, specialmente, nei periodi immediatamente successivi alla posa dei vari materiali o all'installazione degli arredi. L'emissione è più alta all'inizio della vita del prodotto e tende a diminuire notevolmente in tempi abbastanza brevi (da una settimana per vernici e adesivi, a sei mesi per altri composti chimici). Fa eccezione la formaldeide, che tende a presentare rilasci relativamente costanti per molti anni. Un'errata collocazione delle prese d'aria in prossimità di aree ad elevato inquinamento (vie ad alto traffico, parcheggio sotterraneo, autofficina) può determinare un'importante penetrazione degli inquinanti dall'esterno verso l'interno degli edifici.

Particolato

La pericolosità del particolato aerodisperso è dovuta alla capacità delle particelle di adsorbire gas e vapori tossici sulla loro superficie. Tale fenomeno contribuisce ad aumentare le concentrazioni degli inquinanti gassosi che raggiungono le zone più profonde del polmone, trasportati dalle particelle stesse (PM₁₀ e PM_{2.5}). Per gli ambienti indoor le sorgenti principali riguardano tutti gli apparati di combustione e il fumo di tabacco, ma anche l'inquinamento dell'aria proveniente dall'esterno (specie se in prossimità di arterie ad elevato traffico) che in assenza di idonei sistemi di ventilazione filtranti, si trasmette integralmente all'interno e ciò è dovuto al fatto che l'involucro dell'edificio e porte e finestre non sono in grado di fungere da schermo nei confronti del trasporto di particelle. Altre sorgenti di particolato aerodisperso sono costituite dagli spray, dai fumi provenienti dalla cottura degli alimenti, da batteri e spore. Diventa fondamentale quindi dotare l'ambiente di un **sistema di aspirazione verso l'esterno per i fumi** di qualsiasi combustione e nello stesso tempo ridurre l'ingresso di particolato outdoor evitando di aerare i locali nelle ore di elevato traffico ed installando **impianti di ricambio aria con recupero di calore** od **impianti di climatizzazione con presa aria esterna** al fine di introdurre aria in casa solo dopo un'accurata filtrazione.

Glossario: inquinamento indoor

A	<p>Abbattimento</p> <p>Diminuzione delle emissioni o delle concentrazioni di inquinanti o polveri in un ambiente tramite l'utilizzo di varie tecnologie.</p> <p>Aerosol</p> <p>Insieme di particelle solide o liquide con diametro compreso tra qualche nanometro (nm) e decine/centinaia di micrometri (μm), con caratteristiche fisiche e chimico-fisiche che permettono la loro sospensione in atmosfera. Le particelle di aerosol in atmosfera contengono: solfati, nitrati, ammonio, materiali organici, specie cristalline, sale marino, ioni idrogeno e acqua.</p> <p>ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</p> <p>Società globale, fondata nel 1894, atta allo sviluppo di tecnologie sostenibili all'interno di ambienti edificati, per il benessere dell'uomo. Si occupa principalmente di qualità dell'aria indoor, sistemi di costruzione, efficienza energetica, refrigerazione e sostenibilità nelle industrie, attraverso progetti di ricerca, stesura di standard, pubblicazioni e formazione continua.</p> <p>Ambiente INDOOR</p> <p>Ambienti confinati di lavoro e di vita (case, scuole, uffici...), esclusi gli ambienti di lavoro industriali.</p>
B	<p>Benessere microclimatico</p> <p>Stato di soddisfazione di un individuo rispetto allo stato termoisometrico dell'ambiente in cui si trova. Si riferisce a parametri ambientali che influenzano lo scambio termico tra individuo ed ambiente: temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria. E' una parte fondamentale per il raggiungimento del benessere totale.</p> <p>BTEX</p> <p>Sigla che indica la presenza di tre sostanze appartenenti alla classe dei composti organici volatili (VOC): benzene, toluene, xilene. Il loro rilevamento è ritenuto particolarmente significativo in relazione agli effetti sulla salute umana (ampiamente documentati nella letteratura scientifica).</p> <p>Bilancio di massa</p> <p>Approccio utilizzato in un monitoraggio, consistente nel calcolo degli ingressi, degli accumuli, delle uscite e della generazione o distruzione della sostanza interessata, classificando la differenza calcolata come rilascio nell'ambiente considerato.</p> <p>Bioeffluenti umani</p> <p>Composti chimici emessi dal corpo umano (principalmente anidride carbonica).</p>

C	<p>Campagna di monitoraggio indoor</p> <p>Insieme di rilevazioni, eseguite su un periodo medio lungo, dei livelli di concentrazione dei principali inquinanti presenti in ambienti indoor tramite appositi dispositivi tecnici (campionatori, strumenti elettronici etc)</p> <p>Campione</p> <p>Quantità di una sostanza o parte di un materiale prelevato in un determinato posto e che dovrà essere sottoposta ad una o più prove sperimentali in laboratorio.</p> <p>Carbone attivo</p> <p>Materiale contenente principalmente carbonio amorfo avente una struttura con un alto grado di porosità e un'elevata area specifica (cioè elevata area superficiale per unità di volume). Queste qualità comunicano al carbone attivo le caratteristiche di un eccellente adsorbente e lo rendono quindi molto utile per un'ampia varietà di processi, quali filtrazione, purificazione, deodorizzazione e decolorazione.</p> <p>Climatizzazione</p> <p>Insieme di operazioni effettuate per consentire condizioni di temperatura e umidità adeguate all'utilizzo di un ambiente confinato da parte dell'uomo. La climatizzazione di un ambiente comprende, in relazione alle caratteristiche del clima esterno e dell'attività interna, le seguenti funzioni: riscaldamento o raffreddamento, ventilazione con o senza filtraggio dell'aria, umidificazione o deumidificazione.</p> <p>Classi di qualità dell'aria</p> <p>Classi in cui l'aria viene suddivisa a seconda del suo stato di inquinamento complessivo, quindi della presenza e della relativa quantità di inquinanti. La suddivisione in queste classi viene effettuata tramite la definizione dell'indice di qualità dell'aria che associa ad ogni classe i limiti normativi dei vari inquinanti, oltre che un giudizio sulla qualità dell'aria stessa. Le classi risultanti sono 5 da <i>ottima</i> a <i>pessima</i> a seconda del valore dell'indice misurato.</p>
D	<p>Deposizione</p> <p>Costituita dal materiale particolato avente granulometria molto elevata che sedimenta sotto l'azione del campo di gravità. Valutata mediante raccolta in appositi deposimetri. Sulla polvere depositata possono essere eseguite analisi chimiche di diverso tipo.</p> <p>Discomfort</p> <p>Situazione di malessere per la persona evidenziata da valori che superano un limite di accettabilità.</p> <p>Dose</p> <p>Quantità di sostanza necessaria per ottenere un risultato determinato.</p>

<p>U</p>	<p>Esposizione</p> <p>Disposizione di un corpo in un ambiente che permette di ricevere gli effetti da un fonte o una sorgente.</p> <p>EPA: Enviroment Protection Agency</p> <p>Agenzia del governo federale degli Stati Uniti nominata alla protezione della salute umana e dell'ambiente, i cui compiti riguardano la regolamentazione e applicazione delle leggi approvate dal Congresso.</p>
<p>L</p>	<p>Fattore di emissione</p> <p>Valore che lega la quantità di inquinante rilasciato in atmosfera con l'attività responsabile dell'emissione.</p> <p>Filtrazione dell'aria</p> <p>Azione volta ad ottenere un maggior grado di comfort in un ambiente mediante l'impiego di specifici filtri.</p> <p>Fonte</p> <p>Sorgente, spesso indicata come causa dell'inquinamento.</p> <p>Fumo passivo</p> <p>Inalazione del fumo disperso nell'ambiente (comprendente sia il fumo prodotto dalla combustione sia quello prodotto dalla espirazione) prodotto da fattori non dipendenti dalla propria attività.</p> <p>Ftlati</p> <p>Sostanze chimiche organiche che derivano dal petrolio, spesso impiegate come agenti plastificanti ma anche come solventi e ottimizzatori della consistenza di una miscela o di un materiale.</p>

<p>—</p>	<p>IPA: idrocarburi policiclici aromatici</p> <p>Classe di composti formati da due o più anelli aromatici condensati tra loro. Si formano in seguito alla combustione incompleta di sostanze organiche e molte molecole appartenenti a questa gruppo risultano pericolose per l'uomo in quanto classificate come cancerogene.</p> <p>Inalazione</p> <p>Assunzione mediante vie aeree di sostanze inquinanti, in questo caso specifico presenti nell'aria indoor.</p> <p>INDICI di qualità dell'aria</p> <p>Grandezza adimensionale con la quale si rappresenta in modo sintetico e schematico la qualità dell'aria e che considera contemporaneamente dati riguardanti diversi inquinanti atmosferici (particolato, biossido di azoto, ozono, benzene, monossido di carbonio e biossido di zolfo). Viene calcolato rapportando la concentrazione misurata di un dato inquinante con il limite di legge corrispondente. Più basso è il valore, migliore è il livello della qualità dell'aria. Tramite questo indice si costruiscono le classi di qualità dell'aria.</p> <p>Inquinamento Indoor</p> <p>Presenza nell'aria di contaminanti fisici, chimici e biologici in ambienti confinati. Questo tipo di inquinamento può essere provocato da attività personali, dalle attività professionali dei lavoratori, da ventilazione inadeguata, da materiali per la costruzione, dagli arredi e da prodotti particolari impiegati per la pulizia.</p> <p>ISS: Istituto Superiore di Sanità</p> <p>Ente di diritto pubblico che, in qualità di organo tecnico-scientifico del Servizio Sanitario Nazionale (SSN), svolge funzioni di ricerca, controllo, consulenza e formazione in materia di salute pubblica e numerose altre attività secondo le competenze specifiche che gli attribuisce la vigente legislazione.</p>
<p>—</p>	<p>Limite di accettabilità</p> <p>Valori entro i quali un dato risultato può ritenersi accettabile o non accettabile.</p> <p>Livello di accettabilità</p> <p>Livello della concentrazione misurata entro i limiti di accettabilità.</p>

M	<p>Manutenzione periodica</p> <p>Azione condotta attraverso un accurato intervento di verifica dei corretti parametri di funzionamento di un'apparecchiatura. Operazione fondamentale per il mantenimento delle prestazioni e di efficienza iniziali. La manutenzione periodica aiuta a prevenire l'avaria, il malfunzionamento o il deterioramento prima che si manifesti un guasto.</p> <p>Microclima</p> <p>Riferito al complesso dei parametri ambientali della temperatura, dell'umidità relativa e della velocità dell'aria, che condizionano lo scambio termico tra individuo e ambiente. Il microclima influisce in maniera significativa, insieme all'inquinamento dell'aria indoor, sulla qualità degli ambienti in cui si vive e si lavora e quindi sul benessere delle persone.</p> <p>Modello di emissione</p> <p>Strumento utilizzato per indicare e illustrare le caratteristiche tecniche di emissioni inquinanti di un apparecchio, costruito dall'osservazione di dati scientifici.</p> <p>Monitoraggio individuale</p> <p>Rilevazione dell'esposizione ad agenti inquinanti mediante campionatori passivi, attivi o altri eventuali dispositivi di rilevazione personali, cioè mediante dispositivi fissati su di un operatore o sui soggetti esposti che campionano aria nella zona di respirazione.</p>
P	<p>Particolato</p> <p>Insieme delle particelle solide fini (con diametro compreso tra pochi nm e 500 µm) che compongono il pulviscolo atmosferico.</p> <p>Popolazione a rischio</p> <p>Persone soggette a pericoli con possibili ripercussioni sanitarie, o di ordine economico generale.</p> <p>Propagazione degli inquinanti</p> <p>Processi di trasporto e propagazione, di uno o più inquinanti in un sistema, per azioni concomitanti.</p>
R	<p>Risospensione delle polveri</p> <p>Fenomeno riguardante l'ulteriore movimentazione in aria, con successivo stazionamento, di particelle solide deposte precedentemente su una superficie.</p>

S	<p>Sistema di misura automatico</p> <p>Apparato che consente di eseguire una procedura di misura complessa in automatico senza l'intervento di un operatore umano.</p> <p>SBS: Sick Building Syndrome</p> <p>Quadro sintomatologico ben definito, che si manifesta in un elevato numero di occupanti edifici moderni, dotati di impianti di ventilazione meccanica, senza immissione di aria fresca dall'esterno. Generalmente sono adibiti a uffici, scuole, ospedali, case per anziani, abitazioni civili.</p> <p>Sostanze odorogene</p> <p>Sostanze che emettono particolari odori che possono risultare sgradevoli alla percezione degli occupanti gli edifici e creare sintomatologie respiratorie e di malessere generale.</p> <p>Sink-Effect</p> <p>Capacità di differenti materiali da interno di assorbire i contaminanti nell'aria degli ambienti confinati.</p> <p>Simulazione mediante codici di calcolo multi-zona</p> <p>Modellizzazione di un edificio per determinare le portate d'aria necessarie per garantire le adeguate condizione di benessere e qualità dell'aria indoor.</p>
T	<p>TLV: Threshold Limit Value</p> <p>Valore limite di soglia, per le concentrazioni di sostanze chimiche in atmosfera, al di sotto delle quali esse non risultano nocive per la salute, anche per esposizioni ripetute giorno per giorno.</p> <p>Tossicità</p> <p>Capacità di una sostanza chimica di provocare disturbi o danni ad organismi viventi con i quali vengono a contatto.</p> <p>TVOC: Total Volatile Organic Compound</p> <p>Valore che indica le concentrazioni di composti organici volatili totali che possono essere individuate all'interno degli ambienti. In base a questo valore vengono caratterizzate due classi di qualità dell'aria "very polluting building" e "polluting building" per concentrazioni minori di 400 e 1000 µg/m³.</p>

V	<p>Ventilazione naturale</p> <p>Ventilazione di ambiente confinato realizzata tramite aperture sull'involucro edilizio: camini e finestre, sfruttando le differenze di temperatura e pressione, la presenza di atri aspiranti o torri di ventilazione.</p> <p>VMC: Ventilazione Meccanica Controllata</p> <p>Ventilazione di ambienti confinati realizzata attraverso l'impiego di specifici ventilatori che immettono aria nuova e filtrata, espellendo quella inquinata. Garantisce un'ottima protezione anche contro le polveri sottili: PM₁₀ e PM_{2,5}.</p> <p>VOC: Volatile Organic Compound</p> <p>Composti chimici di vario genere, formati da molecole di differente natura, ma tutti caratterizzati da una certa volatilità, cioè dalla capacità di evaporare facilmente nell'aria a temperatura e pressione ambiente.</p>
---	--

Riferimenti

1. Ivo Allegrini, Giuliano Bertoni, Lucia Paciucci; L'Inquinamento da Composti Organici Volatili (VOC) e Semivolatili (SVOC) negli Ambienti Confinati Non Industriali; Ed. CNR-Istituto sull'Inquinamento Atmosferico; 151 pp., ISBN 978-88-6224-001-7, 2008
2. Carla Iacobelli, Gabriella Liberati, Antonello Ottaviani, Lucia Paciucci; Fattori di Inquinamento Ambientale - I composti Volatili Organici (VOCs); Consiglio Nazionale delle Ricerche; 628 pp., ISBN 978-88-8080-087-3, 2008
3. A. De Martino, C. Iacobelli, T. Manna e L. Paciucci; "L'ambiente confinato Rischio chimico fisico e biologico" - Percorsi di Ricerca - Studi di Ambiente. A cura di C. Iacobelli. Università Telematica Guglielmo Marconi; 112 PP. ISBN 88901076-6-9D, 2005
4. Cavallo, P. Carrer, F. Liotti e G. Muzi: "Qualità dell'aria degli ambienti confinati non industriali: indicazioni per la valutazione del rischio e la sorveglianza sanitaria", 2004
5. World Health Organization (WHO): "Selected Pollutants: WHO Guidelines for Indoor Air Quality", 2010
6. Istituto Superiore di Sanità, a cura del "Gruppo di Studio Nazionale sull'Inquinamento Indoor dell'ISS", *Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente indoor*, 2010
7. Istituto Superiore di Sanità, *Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambiente indoor*. Rapporti ISTISAN 13/04, 2013
8. Romagnoli P., Balducci C., Perilli M., Vichi F., Imperiali A., Cecinato A., 2016. Indoor air quality at life and work environments in Rome, Italy. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 3503–3516
9. Boudehane A., Lounas A., Moussaoui Y., Balducci C., Cecinato A., 2016. Levels of organic compounds in interiors (school, home, university and hospital) of Ouargla city, Algeria. *Atmospheric Environment* 144, 266-273
10. NIOSH Alert: Preventing Occupational Respiratory Disease from Exposures Caused by Dampness in Office Buildings, Schools, and Other Nonindustrial Buildings
11. NIOSH, 2007. Department of Health and Human Services - National Institute for Occupational Safety and Health, *Niosh pocket guide to chemical hazards*
12. WHO, 2000. Air quality guidelines for Europe, Second ed., WHO Press, World Health Organization, Geneva
13. WHO, 2006. *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Global update 2005, WHO Press, World Health Organization, Geneva
14. ACGIH, 2003. *Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices, TLVs and BEIs*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 25
15. Gugliermetti, L.; Astiaso Garcia, D. A cheap and third-age-friendly home device for monitoring indoor air quality. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2018, 15, 185

Link utili

1. EPA: "Guide to Air Cleaners in the Home"
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home>
2. ASHRAE: "Indoor Air Quality Guide"
<https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/indoor-air-quality-guide>
3. ASHRAE: "The Standards for Ventilation and Indoor Air Quality"
<https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/standards-62-1--62-2>
4. Ministero della Salute: "Aria Indoor"
http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_4.jsp?lingua=italiano&area=indor
5. European Commission, Air Quality Standards
<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
6. Preventing Occupational Respiratory Disease from Exposures Caused by Dampness in Office Buildings, Schools, and Other Nonindustrial Buildings
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-102/pdfs/2013-102.pdf>
7. Niosh pocket guide to chemical hazards
<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-149/pdfs/2005-149.pdf>
8. NIST: Energy and Environment Division, "CONTAM, a multizone indoor air quality and ventilation analysis computer program"
<https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>